

DISEÑO DE UNIONES Y ELEMENTOS EN ESTRUCTURAS DE GUADUA

LUIS FELIPE LÓPEZ MUÑOZ

E-mail: luisfl@yahoo.com

DAVID TRUJILLO CHEATLE

E-mail: davidtrujilloch@hotmail.com

RESUMEN

El diseño de estructuras de guadua se ha visto limitado pues no ha existido un procedimiento de diseño, a pesar de que se ha realizado gran cantidad investigaciones sobre sus propiedades mecánicas. Este trabajo parte de los resultados de las propiedades mecánicas para luego poder determinar los esfuerzos admisibles. Con base en esto se proponen procedimientos de diseño de elementos sometidos a compresión (columnas, pie-derechos y pie-de-amigos) y de elementos sometidos a flexión (vigas, viguetas y correas). Se propone además una forma de selección de uniones, de acuerdo a las necesidades de resistencia de cada caso.

ABSTRACT

Designing guadua structures has been limited due to the absence of a design procedure, in spite of the great amount of testing that has been done with respect to its mechanical properties. This paper starts with the results of the mechanical properties of guadua, and moves on to determine its allowable stresses. Then it proposes procedures for designing pieces subject to compression and for pieces subject to flexion. A procedure for selecting joints is proposed also, according to the strength needed.

PROPIEDADES MECANICAS DE LA GUADUA ANGUSTIFOLIA

Tracción

La prueba de tracción es uno de los ensayos de materiales más comunes para determinar propiedades mecánicas; sin embargo, para la guadua no ha resultado tan común, pues quienes se habían interesado por estudiarla siempre indagaron acerca del comportamiento del tallo completo, y se encontraban con cierta dificultad al tratar de sujetarlo para halar de él sin que los efectos locales del mecanismo de sujeción lo dañaran. Quizá sea esa la razón por la que casi no se cuenta con registros de datos de ensayos a tracción; en consecuencia se optó por hacer el ensayo con latas de guadua, y mas recientemente con latas de guadua ahusadas (ver figura 1) para facilitar el agarre de las probetas según la recomendación del *INBAR STANDARD FOR DETERMINATION OF PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF BAMBOO*, que trata de homologar los ensayos de bambú a partir de 1999.

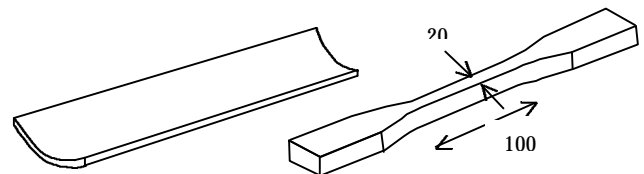
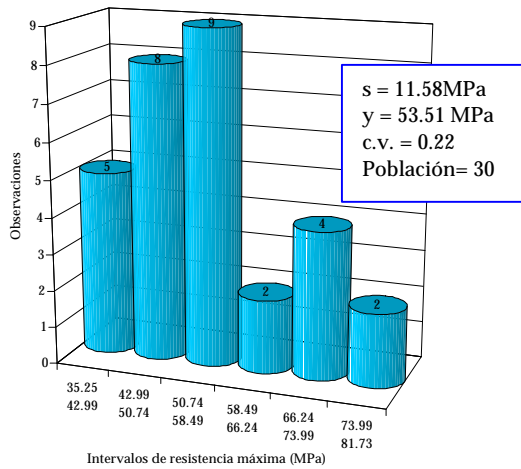


Figura 1. Latas de guadua , entera y ahusada

Con el uso de estas últimas probetas, se proporciona una buena zona de agarre y además se induce a que la falla ocurra hacia el centro de la probeta, donde las tensiones son más uniformes y fáciles de calcular.

Los resultados de los ensayos de tracción se muestran en la distribución de la gráfica 1, donde se observa que la tendencia es normal, los datos se agrupan alrededor de la media, 53.51 MPa, con una desviación estándar de 11.6 MPa. Con base en este gráfico se determinará un valor de diseño para tracción.

Gráfica 1. Histograma de resistencia máxima a la tracción



Valor de diseño por esfuerzos admisibles a tracción.

Utilizando un criterio según el cual, el esfuerzo resistente en condiciones últimas es el que corresponde al límite de exclusión del 5% (es decir, se espera que de toda la población de dicha especie, solo el 5% tenga una resistencia menor)¹, ordenando los resultados de los ensayos en forma creciente, el valor que define el límite de exclusión del 5% es el ensayo número $0.05 * n$, siendo n por lo general un número pequeño de muestras, en este caso 30.

Límite de exclusión = $0.05 * 30 = 1.5 \approx 1$

El esfuerzo último corresponde al valor más bajo registrado en los ensayos.

$$u = 35.25 \text{ MPa}$$

Para determinar el esfuerzo admisible se debe reducir el esfuerzo último con varios factores de seguridad; en el caso de la tracción se utilizan dos:

FS = 1.2 (Factor de servicio y seguridad, mediante el cual se busca exigir el material por debajo del límite de proporcionalidad).

FDC = 1.11 (Factor de duración de carga).

$$f = \frac{1}{FS * FDC}$$

$$S_{adm} = f * S_u$$

$$S_{adm} = 0.75 * 35.25 = 26.4 \text{ MPa}$$

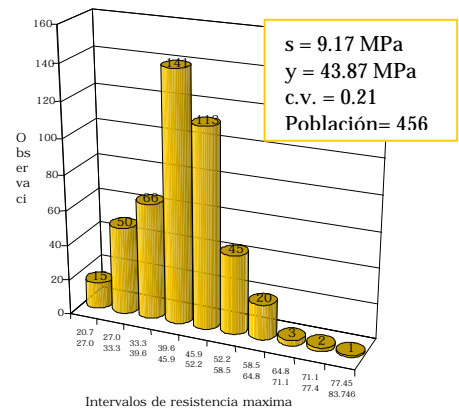
Este valor de esfuerzo admisible a tracción paralela, es aplicable solo a latas de guadua, para el caso en el que se tengan elementos de guadua rolliza sometidos a tracción el análisis se debe concentrar en la unión.

Compresión paralela a la fibra

La propuesta de normas internacionales para ensayos de bambú "INBAR STANDARD FOR DETERMINATION OF PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF BAMBOO", especifican para el ensayo de compresión una altura de la probeta entre 1 y 2 veces el diámetro, precisamente para que el ensayo resulte evaluando las propiedades del material, sin que sea afectado por efectos secundarios como el pandeo.

La gráfica 2, muestra la distribución de las resistencias máximas a compresión. Como se mostró al principio de este capítulo, el comportamiento de las columnas está condicionado por la longitud de las mismas, por lo que, para hacer esta distribución se trató de dejar a un lado el problema del pandeo, las columnas largas e intermedias fueron convertidas en cortas y sus resistencias máximas a compresión convertidas en resistencias máximas para columnas equivalentes de longitud 0.12 m, mediante un procedimiento aproximado.

Gráfica 2. Histograma de resistencias máximas a compresión



Dentro del intervalo central, se localiza el 31% del total de la población y entre los dos más importantes suman el 56% de los ensayos, apenas un 29% está por debajo del intervalo más importante, mientras que por encima está el 40%.

Cuadro 1. Resumen de resultados a compresión

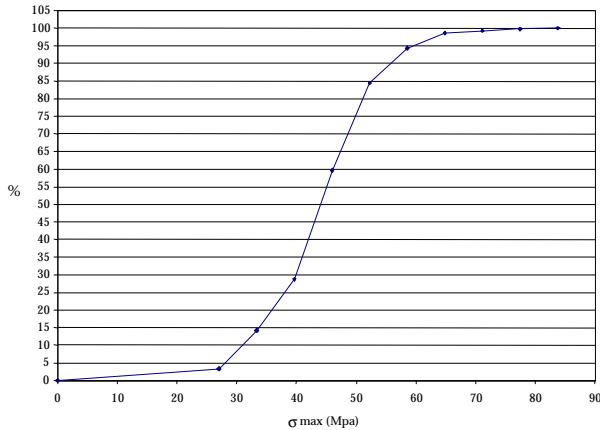
Longitud (m)	Probeta	promedio (MPa)	Desviación estándar (MPa)	C.V
0.12	30	47.7	10.23	0.21
0.5	61	42.46	11.66	0.27
1.0	42	36.28	6.39	0.18
2.0	44	26.36	4.82	0.18
3.0	41	16.77	4.91	0.29

¹ MANUAL DE DISEÑO PARA MADERAS DEL GRUPO ANDINO, Junta del acuerdo de Cartagena, Lima, Perú, 1984.

Valor de diseño por esfuerzos admisibles a compresión.

De la gráfica 3. se obtiene el valor del esfuerzo último para 5%, percentil correspondiente a una resistencia de 28 MPa. Se optó por utilizar este criterio por tratarse de una población considerable.

Gráfica 3. Frecuencias acumuladas de esfuerzos últimos a compresión



Para determinar el esfuerzo admisible se debe reducir el esfuerzo último con varios factores de seguridad; en el caso de la compresión se utilizan dos:

FS = 1.6 (Factor de servicio y seguridad, mediante el cual se busca exigir el material por debajo del límite de proporcionalidad).

FDC = 1.25 (Factor de duración de carga).

$$f = \frac{1}{FS * FDC}$$

$$S_{adm} = f * S_u$$

$$S_{adm} = 0.5 * 28 = 14 MPa$$

FLEXIÓN

Una viga constituye un miembro estructural que se somete a cargas que actúan transversalmente al eje longitudinal. Las cargas originan acciones internas, o resultantes de esfuerzo en forma de fuerzas cortantes y momentos flexionantes, éstos son función de la distancia x medida sobre el eje longitudinal. figura 2.

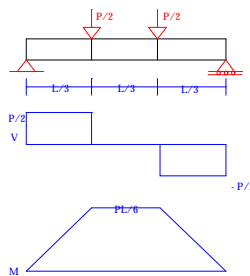


Figura 2. Diagramas de fuerza cortante y momento flector

Al realizar el análisis de la viga se debe tener en cuenta que los mayores esfuerzos son los normales (perpendiculares a la sección). Cada fibra de la viga esta sometida a tracción o compresión (ésto es, las fibras están en un estado de esfuerzo uniaxial).

Así, los esfuerzos normales que actúan sobre la sección transversal varían linealmente con la distancia "y" medida a partir de la superficie neutra. Se debe tener en cuenta que los esfuerzos máximos se presentan en los puntos más alejados del eje neutro. En el caso de la guadua ésto sería igual a un radio exterior. Para calcular los esfuerzos máximos de flexión en una viga de guadua se utiliza la siguiente ecuación:

$$S_x = \frac{My}{I}$$

Donde:

σ_x = Esfuerzo normal máximo.

M = Momento máximo (PL/6).

y = Radio exterior.

I = Momento de inercia.

Pruebas de laboratorio y procesamiento de bases de datos.

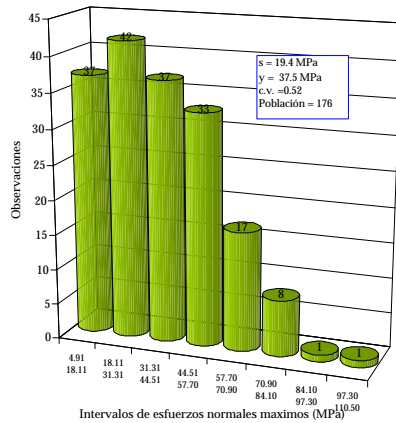
Los ensayos realizados dentro del convenio AIS-FOREC en la Universidad Nacional sede Medellín se hicieron teniendo en cuenta la norma del INBAR para ensayos de flexión "INBAR STANDARD FOR DETERMINATION OF PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF BAMBOO".

Los parámetros de diseño para las probetas fueron el no utilizar probetas de menos de 0.7 m, para prevenir el aplastamiento (debido a que en probetas cortas, no se alcanza la flexión pura), ni mayores a 1.4 m y además debían tener 4 nudos (los dos de los extremos para los apoyos y dos centrales para la aplicación de las cargas). Los resultados de los ensayos se pueden ver en la gráfica 4.

En la gráfica 4. se muestra la distribución de las resistencias de todos los ensayos disponibles de flexión. Se observa que los datos tienen una marcada tendencia hacia las resistencias más bajas, nuevamente se pone de manifiesto la gran dificultad que involucran los ensayos de flexión, que en la mayoría de los casos son dominados por fallas debidas a efectos locales como el aplastamiento. De todas formas la resistencia media es 37.5 MPa, con una desviación estándar de 19.4 MPa y un coeficiente de variación de 0.52.

Puesto que los dos intervalos iniciales representan el 45% del total de la muestra, que la dispersión de la misma es excesivamente alta y que no presenta una distribución normal, no es aplicable el criterio utilizado anteriormente para obtener valores de diseño a flexión, pues como ha quedado demostrado, en estos ensayos no se pudo eliminar la influencia del aplastamiento y en contados casos se alcanzó la falla por flexión pura.

Gráfica 4. Histograma general de resistencias a



A raíz de lo anterior los ingenieros Edwin Prieto S. Y Jorge Sánchez P. En su trabajo de grado *COMPORTAMIENTO DE LA GUADUA ANGUSTIFOLIA SOMETIDA A FLEXIÓN* (Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá 2001) desarrollaron una metodología mas completa en la determinación de los esfuerzos a flexión, en sus ensayos se utilizaron probetas cortas de 0.5m y 1 m, además elementos largos de 1.5m, 2m, 2.5m y 3m.

Para prevenir el efecto del aplastamiento de las probetas se rellenaron los cañutos con mortero de cemento en los apoyos y en los puntos de aplicación de las cargas.

Eliminado el problema del aplastamiento se presentan solo dos tipos de fallas; por cortante en probetas cortas y por flexo-compresión en probetas largas.

Los resultados de esta investigación son :

Para elementos cortos (< 1.5m) el módulo de elasticidad mínimo es de 3000 MPa, el módulo de elasticidad promedio es de 6500 MPa y el esfuerzo admisible a flexión es 10.7 MPa. Para elementos largos (>1.5m) el módulo de elasticidad mínimo 6000 MPa, el módulo de elasticidad promedio es de 11500 MPa y el esfuerzo admisible a flexión es de 15 MPa.

Sin embargo para el diseño de elementos se recomienda utilizar los resultados para probetas largas, porque los elementos cortos tienden a fallar por cortante y/o aplastamiento.

Corte paralelo a la fibra

El esfuerzo cortante medio τ_m , se define como :

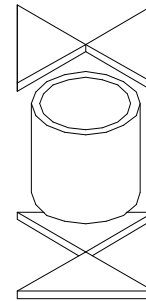
$$\tau_m = V/A$$

Cuando el esfuerzo cortante es generado por acción de fuerzas directas que tratan de cortar el material, se trata de cortante directo o simple; el esfuerzo cortante se presenta también de manera indirecta en miembros que trabajan a tracción, torsión y flexión. La distribución de esfuerzos cortantes sobre una sección, se sabe que es mayor en el centro y se hace nula en los extremos.

Pruebas de laboratorio.

Las pruebas de laboratorio que se detallan a continuación, se realizaron con el objeto de determinar la resistencia máxima de la guadua al esfuerzo cortante y con base en la propuesta de normativa para ensayos de bambúes, INBAR STANDARD FOR DETERMINATION OF PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF BAMBOO.

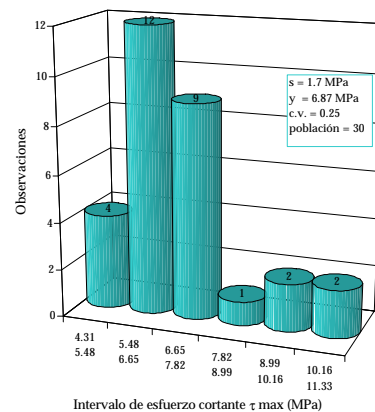
Figura 3. Ensayo de corte



En la gráfica 5, se muestra la distribución de las resistencias al corte de las 30 probetas. El comportamiento es dominado por dos intervalos donde se concentran el 70% del total de las muestras.

La media es 6.87 MPa y se localiza en el segundo intervalo más importante. La desviación estándar fue de 1.7 MPa que resulta pequeña comparada con los ensayos de tracción, compresión y flexión, lo que muestra una homogeneidad en la resistencia al corte de la guadua. El coeficiente de variación resultó 0.25 que por tratarse de un material natural es aceptable.

Gráfica 5. Histograma de resistencias máximas al corte



Valor de diseño por esfuerzos admisibles a esfuerzo cortante.

Utilizando el mismo criterio que para el valor de diseño a tracción, en el cual, el esfuerzo resistente en condiciones últimas es el que corresponde al límite de exclusión del 5%.

$$\text{Limite de exclusión} = 0.05 \cdot 30 = 1.5 > 1$$

Es decir, el esfuerzo último corresponde al valor más bajo registrado en los ensayos.

$$u = 4.31 \text{ MPa}$$

Para determinar el esfuerzo admisible se debe reducir el esfuerzo último con varios factores de seguridad. En el caso del esfuerzo cortante se utiliza:

$FS = 4$ * (Factor de servicio y seguridad, mediante el cual se busca exigir el material por debajo del límite de proporcionalidad).

* incluye factor por concentración de esfuerzos = 2

$$f = \frac{1}{FS}$$

$$S_{adm} = f * S_u$$

$$S_{adm} = 0.25 * 4.31 = 1.1 MPa$$

En los resultados obtenidos por Prieto y Sánchez el esfuerzo admisible a cortante fue de 1.2 MPa, lo que es llamativo dado que este resultado fue determinado de forma indirecta en los ensayos de flexión.

Para el diseño de elementos estructurales de guadua; se pueden utilizar los valores de esfuerzo admisible que se muestran en el cuadro 2 junto a sus respectivos esfuerzos máximos promedio obtenidos de los ensayos.

Cuadro 2. Esfuerzos máximos promedio y admisibles para guadua

Ensayo	ϕ	σ_{medio} (MPa)	σ_{adm} (MPa)
Tracción	0.75	53.5	26.4
Compresión	0.5	43.9	14.0
Flexión	0.48		15.0
Corte	0.25	6.9	1.1

Esfuerzos Admisibles (MPa)

Grupo	Flexión f_m	Tracción Paralela f_t	Compresión Paralela $f_{c=}$	Compresión Perpendicular $f_{c\perp}$	Corte Paralelo f_v
A	21	14.5	14.5	4	1.5
B	15	10.5	11	2.8	1.2
C	10	7.5	8	1.5	0.8
Guadua	15	26.4	14	(Mortero)	1.1

Módulos de Elasticidad (MPa)

Grupo	E_{min}	$E_{promedio}$
A	9500	13000
B	7500	10000
C	5500	9000
Guadua	6000	11500

DISEÑO DE ELEMENTOS SOMETIDOS A COMPRESIÓN.

En las estructuras de guadua es muy común encontrar elementos sometidos a compresión es el caso de las columnas, pie-derechos y pie-de-amigos. Un elemento sometido a compresión esta por lo general de forma vertical dentro de la estructura y recibe cargas de tipo axial.

Este procedimiento de diseño se basa en la tesis de grado "Determinación de la resistencia a la compresión paralela

a la fibra de la guadua de castilla" de los ingenieros agrícolas José Virgilio Martín B y Lelio Rafael Mateus T. (Universidad Nacional De Colombia 1981), Además de resultados obtenidos por el convenio AIS-FOREC en el año 2000.

El Título E.7 de la NSR 98 estipula que en columnas de guadua en una estructura de bahareque, el número de guadas se determina así: $N_c = P_u / (A_G \cdot F_c)$, donde N_c es el número de columnas, P_u la carga, A_G el área de la guadua y F_c el esfuerzo a compresión admisible (8MPa). El procedimiento para madera aserrada propuesto por la Junta del Acuerdo de Cartagena, JUNAC, se puede utilizar también para la guadua.

Compresión axial

- 1) Definir bases de Cálculo
 - a) Cargas a considerarse en el diseño
 - b) Condiciones de apoyo y factor de longitud efectiva
- 2) Determinar esfuerzos máximos
- 3) Establecer los esfuerzos admisibles, módulo de elasticidad y C_k
- 4) Seleccionar una sección adecuada extraer las propiedades geométricas de la sección elegida
- 5) Calcular la esbeltez λ
- 6) Calcular la carga admisible

Condiciones de apoyo y factor de longitud efectiva

El diseño de elementos sometidos a compresión o flexo-compresión debe hacerse tomando en cuenta su longitud efectiva l_{ef} . Longitud efectiva es la longitud teórica de una columna equivalente con articulaciones en sus extremos. Esta longitud de la columna doblemente articulada es la que interviene en la determinación de la carga máxima por pandeo que puede soportar una columna. Esta se obtiene multiplicando la longitud, l , por un factor de longitud efectiva, k , que considera las restricciones o el grado de empotramiento que sus apoyos extremos le proporcionan.

$$l_{ef} = k * l$$

Esbeltez

A diferencia de las columnas de madera aserrada cuya sección es por lo general de forma rectangular lo que hace que tenga una dirección mas débil que la otra en la guadua no se presenta esto dado que es simétrica en todas las direcciones.

En columnas de guadua la esbeltez esta dada por la expresión:

$$\lambda = l/i$$

Donde λ es la esbeltez, l la longitud de la columna y i es el radio de giro.

Entonces el radio de giro i es igual a:

$$i = \sqrt{I/A}$$

Donde I es el momento de inercia de la sección y a es el área. Simplificando la ecuación anterior nos queda

$$i = \sqrt{(de^2 + di^2)/4}$$

donde de es el diámetro exterior y di el diámetro interior de la guadua.

Martin y Mateus en su trabajo determinaron el C_k que corresponde al punto donde las columnas intermedias pasan a ser largas en la gráfica de esfuerzo contra esbeltez.

$$C_k = 2.72 * \sqrt{\frac{E}{f_{adm}}}$$

Factor de seguridad aplicado a Euler, sólo 2.0.

Clasificación de Columnas

Para columnas de guadua

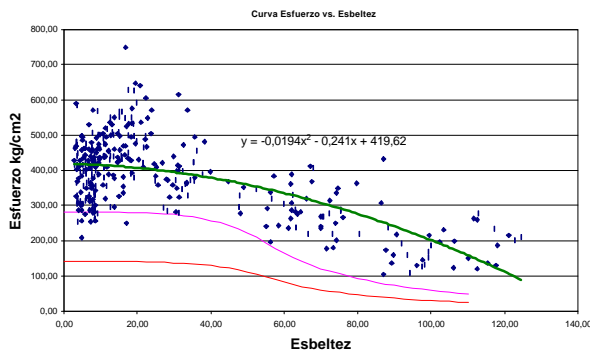
Columnas Cortas $\lambda < 30$

Columnas Intermedias $30 < \lambda < C_k$

Columnas Largas $C_k < \lambda < 150$

$\lambda > 150$ es inaceptable

Grafica 1. Esfuerzo vs esbeltez

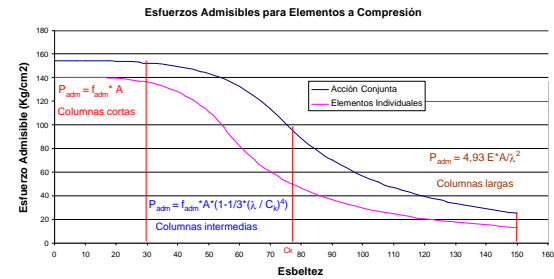


En la gráfica 1 la nube de puntos representa todos los ensayos a compresión recopilados y la línea verde es la línea de tendencia de los mismos. Cada punto representa el esfuerzo al que la probeta fallo, utilizar la línea de tendencia de dichos puntos para diseñar elementos a compresión además de arriesgado sería irresponsable; es por eso que se utiliza el criterio del percentil 5 y los factores de seguridad.

La línea de color violeta representa el percentil 5 ósea que solo el 5% de los resultados quedaron por debajo de esta línea, finalmente a este resultado se le aplica los factores de seguridad mencionados en el capítulo de propiedades mecánicas y obtenemos la curva de esbeltez para columnas de guadua línea naranja.

Para poder diseñar elementos a compresión se requiere una gráfica de esbeltez en el caso de la guadua es la siguiente

Grafica 2. Curvas de esbeltez para guadua



En la gráfica 2 la línea azul corresponde a la curva de esbeltez para entramados o conjunto de pie-derechos. La línea violeta es la curva de esbeltez para una columna sola.

Columnas cortas

Las columnas cortas ($\lambda < 10$) fallan por compresión o aplastamiento su carga admisible puede calcularse como:

$$P_{adm} = f_{adm} * A$$

Donde P_{adm} corresponde a la carga axial admisible, f_{adm} es el esfuerzo admisible para compresión paralela a la fibra y A es el área de la sección.

Columnas intermedias

Las columnas intermedias ($30 < \lambda < C_k$) fallan por una combinación de aplastamiento e inestabilidad lateral (pandeo). Su carga admisible puede estimarse como:

$$P_{adm} = f_{adm} * A * \left[1 - \frac{1}{3} * \left(\frac{l}{C_k} \right)^4 \right]$$

Donde:

l : relación de esbeltez.

$$C_k = 2.72 \sqrt{E/f_{adm}}$$

E = Modulo de elasticidad de la guadua.

Para columnas intermedias, se ha adoptado la ecuación empírica propuesta por el National Forest Products Laboratory de Madison, Wisconsin, EE.UU.

Columnas largas

La carga admisible de columnas largas ($C_k < \lambda < 150$) se determina por consideraciones de estabilidad.

Considerando una adecuada seguridad al pandeo la carga crítica P_{adm} según la teoría de Euler se reduce a:

$$P_{adm} = 4.93 * \left(\frac{E * A}{l^2} \right)$$

Elementos sometidos a flexo-compresión

Estos elementos deben diseñarse para satisfacer la siguiente ecuación:

$$\frac{P}{P_{adm}} + \frac{k_m * |M|}{Z * f_m} < 1$$

donde:

f_m = esfuerzo admisible a flexión.

k_m = factor de magnificación de momentos debido a la presencia de la carga axial.

$|M|$ = Momento flector máximo del elemento (valor absoluto)

P_{adm} = carga axial admisible calculada.

Z = modulo de sección.

P = carga axial aplicada

$$k_m = \frac{1}{1 - 1.5 * \frac{P}{P_{cr}}}$$

P_{cr} = Carga crítica de Euler.

$$P_{cr} = \frac{p^2 * E * I}{l_{ef}^2}$$

Obsérvese que la carga crítica no depende directamente de la resistencia del material, sino que es inversamente proporcional al cuadrado de la longitud y se puede aumentar utilizando material más rígido (mayor E) o utilizando secciones con más momento de inercia.

Esta es una buena razón para afirmar que la guadua es buena para soportar pandeo, su sección transversal es un tubo. La manera más efectiva de poner masa alejada del centroide es poniéndola alrededor; en otras palabras entre varias secciones de igual área, la más efectiva para resistir pandeo es el tubo, pues tiene mayor momento de inercia.

DISEÑO DE ELEMENTOS SOMETIDOS A FLEXIÓN

Los elementos sometidos a flexión son elementos horizontales o casi horizontales que soportan cargas perpendiculares, o casi perpendiculares a su eje. Vigas, viguetas y correas son algunos ejemplos. Este procedimiento de diseño se basa en el propuesto en el "Manual de Diseño para Maderas del Grupo Andino" de la Junta del Acuerdo de Cartagena, y se basa en los resultados de la tesis de grado "Comportamiento de la guadua angustifolia sometida a flexión" de los ingenieros civiles Edwin Prieto y Jorge Sánchez (Universidad Nacional sede Bogotá, 2001). La adaptación de los resultados de Prieto y Sánchez a este procedimiento es de mi autoría.

El procedimiento para madera aserrada propuesto por la Junta del Acuerdo de Cartagena, JUNAC, consta de nueve puntos, el adaptado para la guadua consta de tan sólo siete.

Procedimiento de Diseño:

- 1) Definir bases de cálculo
 - a) Cargas a considerarse en el diseño
 - b) Deflexiones admisibles
 - c) Luz de cálculo y espaciamiento.
- 2) Efectos máximos: máximo momento flector M y máxima fuerza cortante V
- 3) Establecer los esfuerzos admisibles de flexión, corte, compresión perpendicular y módulo de elasticidad
- 4) Calcular el momento de inercia I , necesario por deflexiones.
- 5) Calcular el módulo de sección Z , necesario por resistencia.
- 6) Seleccionar la sección mayor de las calculadas en los pasos 4 y 5.
- 7) Verificar el esfuerzo cortante.

1.b) Deflexiones Admisibles

La guadua es un material sumamente elástico y flexible, y se deforma mucho antes de fallar, sobre todo los elementos de gran longitud. Sin embargo en una construcción no se pueden tolerar grandes deformaciones en vigas y viguetas, porque tiene un aspecto desagradable, porque puede dañar un cielorraso y porque estaría asociado a grandes vibraciones. Todo esto implica que es necesario asegurar la rigidez al igual que la resistencia.

Para determinar las deflexiones admisibles se debe considerar las deflexiones diferidas, es decir las causadas en el tiempo y las deflexiones cortas, es decir las vibraciones.

Las deflexiones diferidas se calculan con la suma de la carga muerta, más la carga viva. Sin embargo la carga muerta se incrementa en un 80% debido a la fluencia plástica del material o "creep". Una vez se determina cuanta va a ser la deflexión diferida se asegura que sea menor que:

- < $L / 300$ en edificaciones con cielo raso de yeso
- < $L / 250$ en edificaciones sin cielo raso de yeso
- < $L / 200$ en edificaciones industriales o en techos inclinados

Las vibraciones se calculan sólo con la carga viva. Esta deflexión debe ser menor que:

- < $L / 350$ en todo tipo de vivienda
- < $L / 480$ si se desea minimizar la vibración

L es la distancia entre caras de apoyos. Así por ejemplo una viga de 3.50 m no debe deflectarse más de 1 cm debido a la carga viva.

Las deflexiones causadas por una carga distribuida sobre una viga simplemente apoyada se calculan con la fórmula:

$$\Delta_{m\acute{a}x} = \frac{5wl^4}{384EI}$$

1.c) Espaciamiento

Cuando se utilizan guaduas como viguetas o correas, si se tiene problemas de resistencia o rigidez, una solución simplemente consiste en acercar entre si los elementos.

3) Esfuerzos admisibles y módulo de elasticidad

Cuando se estén diseñando vigas se utiliza el esfuerzo admisible de la tabla y el módulo de elasticidad que figura como E_{min} . En el caso de las viguetas se usa el esfuerzo admisible más 10% y el $E_{promedio}$, siempre y cuando haya por lo menos 4 viguetas y posibilidad de redistribución de la carga.

4) Cálculo del Momento de Inercia Necesario

Para que el elemento no se deforme excesivamente es necesario tener un momento de inercia (I) suficiente para que esto no ocurra. Transformando la ecuación de deflexión admisible se obtiene que:

$$I_{elemento} \geq I_{necesario} = \frac{5wl^3 \cdot k}{384E}$$

Donde I es el momento de inercia del elemento, w la carga distribuida, k la deflexión admisible (según el caso), y E el módulo de elasticidad. Este cálculo debe hacerse dos veces, una por deflexiones diferidas (k = 200, 250 ó 300) y otra por vibraciones (k = 350 ó 480).

5) Cálculo del Módulo de Sección Necesario

Para que el elemento no vaya a fallar es necesario tener un módulo de sección (Z ó S) suficiente para que esto no ocurra. El esfuerzo flector que sufre una viga es igual al momento flector dividido por el módulo de sección.

$$S_m = \frac{M \cdot c}{I} = \frac{M}{Z}$$

Esta ecuación puede ser reorganizada para obtener el módulo de sección necesario:

$$Z_{elemento} \geq Z_{necesario} = \frac{M}{f_m}$$

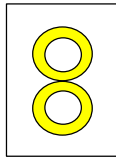
Donde Z es el módulo de sección, M es el máximo momento flector y f_m es el esfuerzo admisible a flexión de la guadua.

6) Cálculo del Momento de Inercia y el Módulo de Sección del Elemento

Una vez que sabemos cuanto es el momento de inercia necesario, se busca la guadua o configuración de guaduas que cumplan este requisito. Para ello se pueden usar tablas o fórmulas, por ejemplo:

Para una guadua:

Para una viga de dos guaduas (una encima de la otra):



$$I = \frac{\rho(d_e^4 - d_i^4 - 4d_e^2 d_i^2)}{32}$$

$$Z = \frac{\rho(d_e^4 - d_i^4 - 4d_e^2 d_i^2)}{32d_e}$$

Una vez que se conoce cuanto es el módulo de sección necesario, se busca la guadua o configuración de guaduas que cumplan este requisito. La mayor de las guaduas o configuración de guaduas se escoge como el elemento a utilizar.

7) Verificar el esfuerzo cortante

Por último debe cerciorarse de que no vaya a ocurrir una falla por cortante. En una sola guadua se revisa que no ocurra en la pared de la guadua en una configuración debe revisarse también la unión entre guaduas.

El esfuerzo cortante de un elemento sometido a flexión obedece a la fórmula:

$$\tau = V \cdot Q / b \cdot I$$

Donde V es la fuerza cortante en la sección, Q es el momento estático de la parte de la sección transversal por encima de las fibras en que se genera τ , b es el ancho de la sección a la altura de estas fibras, e I es el momento de inercia.

Para una guadua el esfuerzo cortante se define como:

$$t_{m\acute{a}x} = \frac{4V}{3A} \frac{d_e^2 + d_e^2 d_i^2 + d_i^2}{d_e^2 - d_i^2}$$

En donde $\tau_{\text{máx}}$ es el esfuerzo cortante, V es la fuerza cortante, A el área, d_e el diámetro externo de la guadua y d_i el diámetro interno. El esfuerzo cortante máximo debe ser menor que el admisible (f_v).

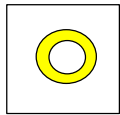
$$\tau_{\text{máx}} < f_v$$

En elementos apoyados en la parte inferior y cargados en su parte superior se verifica el cortante a d_e del borde (excepto en voladizos).

Estabilidad

Debe arriostrarse para evitar el pandeo lateral de las fibras en compresión.

1 guadua es estable naturalmente.



$$I = \frac{\rho d_e^4 - d_i^4}{64} \quad Z = \frac{\rho d_e^4 - d_i^4}{32 d_e}$$

2 o más guaduas son necesariamente inestables requiere restricción en los apoyos.

UNIONES ESTRUCTURALES

El cálculo de elementos con guadua, al igual que con madera puede llevar a una situación muy peligrosa: que los elementos sean suficientemente fuertes para el trabajo deseado, pero que las uniones sean débiles. Todo el que ha trabajado con guadua sabe que las uniones requieren de mucho cuidado y son el eslabón más débil.

La madera cuenta con múltiples tecnologías para solucionar las uniones. Para la guadua existen soluciones tradicionales, pero la dificultad se manifiesta cuando se trata de hacer uniones que soporten esfuerzos a tracción.

Las cerchas que se han construido con guadua realmente no funcionan como tal, pues las uniones trabajan pobremente a tracción, generalmente son unos pocos clavos. Uno de los primeros en realizar un estudio académico de las cerchas de guadua fue el ingeniero holandés Dr. Jules Janssen quien en 1974 probó en la Universidad Tecnológica de Eindhoven (Países Bajos) más de 50 uniones diferentes con bambú filipino, con base en las cuales construyó 5 cerchas de 8 metros de luz, a las que sometió a esfuerzos. Las cargas eran análogas a las de una cubierta en asbesto cemento o zinc. Primero diseñó una cercha similar a la montante maestro, y luego con base en los resultados planteó una similar a la Howe. Esta última resultó más resistente y rígida. Estas cerchas se probaron acostadas en el piso del laboratorio. Los diseños propuestos por Janssen son simples, y satisfacen las necesidades de una comunidad que necesita una cubierta.

Uniones a Tracción

Estas propuestas de cerchas son válidas, y curiosamente no muy conocidas en nuestro medio. En Colombia la historia de las uniones a tracción en guadua ha tenido otro enfoque, ante la necesidad de mejores uniones algunos constructores empezaron a rellenar el canuto con mortero, y así lograr que un tornillo no rasgara las paredes de la guadua, sino que parte de la fuerza se transfiriera al tabique o diafragma. Este invento se le adjudica al arquitecto Simón Vélez. Esto ha sido parte del secreto de sus grandes obras, y sin embargo él procura que en sus diseños la guadua trabaje principalmente a compresión y flexión, y en algunas situaciones en que se enfrenta a la tracción se ayuda con el acero.

En 1996, Yenny Garzón, una estudiante de arquitectura de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá, estudió estas uniones en su tesis de grado titulada "Optimización de estructuras de guadua" (Universidad Nacional, 1996). Las uniones estudiadas consisten en una varilla roscada que atraviesa el canuto. A esta varilla se le dice el pasador. El canuto a su vez se llena con mortero de cemento. La resistencia de esta unión es del orden de 3500kgf. (35kN) por canuto relleno. Si se requiere una resistencia mayor se rellenan más canutos, y se conectan entre sí por medio de pletinas de acero. En este texto la autora recomienda un factor de seguridad de tres.

Inspirados por este trabajo Cesar Peña y Hugo Rodríguez estudiantes de arquitectura de la misma universidad propusieron una unión diferente en su tesis de grado titulada "Propuesta de uniones mecánicas de guadua" (Universidad Nacional, 1997), pues les pareció que el peso del mortero era un gran defecto, aunado a esto el hecho de tener que esperar 28 días antes de que el mortero fraguara, y la necesidad de fundirse el mortero una vez que estuviese puesta la guadua. La propuesta de ellos consiste en una arandela de 5cm de diámetro que es atravesada por 8 puntillas y un pasador (varilla roscada) de $\frac{1}{2}$. Los resultados de esta investigación mostrarían que estas uniones soportan del orden de 40kN. Para tener mejores resistencias se pueden utilizar más pares de arandelas. Los autores recomiendan también un factor de seguridad de tres.

En 1998 dos estudiantes de ingeniería civil de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá, Sandra Clavijo Ortiz y David Trujillo Cheatle decidieron investigar en el tema de cerchas de guadua como el tema de su tesis de grado. Para ello se necesitarían uniones confiables y muy resistentes. Las dos tesis mencionadas con anterioridad eran un punto de partida, pero se necesitaban uniones más resistentes.

Para una unión confiable se requería diseñar una transición efectiva entre el pasador y las paredes de la guadua. En la unión con mortero esto se hace transfiriendo la carga del pasador al mortero, y éste a su vez al tabique o diafragma, que se lo transmite a las paredes de la guadua.

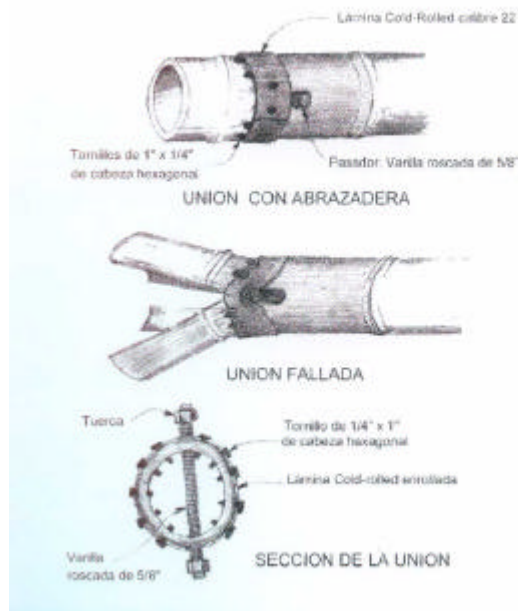
Clavijo y Trujillo reorientaron su trabajo de grado y se centraron en lograr uniones efectivas a tracción. Lo primero que se debía comprender cabalmente, era cuanto carga soporta la pared de la guadua cuando una puntilla o un tornillo trata de rasgarla, es decir que está sometida a cizallamiento. Esta fue la primera fase del experimento. Para esto se probaron 106 probetas de guadua en las que se variaban intencionalmente los espesores, los diámetros de los tornillos, la posición de los nudos respecto al tornillo y otras variables, para ver como se relacionaba la resistencia con éstas.

El siguiente paso sería diseñar un elemento que fuera una transición efectiva entre un pasador y la pared de la guadua. La primera fase de experimentación demostró que se deben usar varios elementos de 1/4" de diámetro, sin embargo se necesita una forma de lograr esta transición entre muchos elementos pequeños y un elemento grande: el pasador. El pasador a su vez le transmitiría la carga a otro elemento. En aras que el diseño fuera sencillo de construir y de tecnología conocida se llegó a dos propuestas: un elemento externo (una abrazadera) y un elemento interno (mortero). Después de varias propuestas se llegó a las dos siguientes:

Unión con lámina de acero:

La 1ª utiliza un zuncho de acero, o abrazadera, que sirve como transición de esfuerzos entre una sucesión de tornillos fijados a la pared de la guadua y un elemento conector que permita la construcción de la unión. Se utilizan 12 tornillos de 6.35mm (1/4"), 1x0.04m de lámina calibre 22 y un pasador de 1.58 cm (5/8"). (Figura 3).

Figura 3



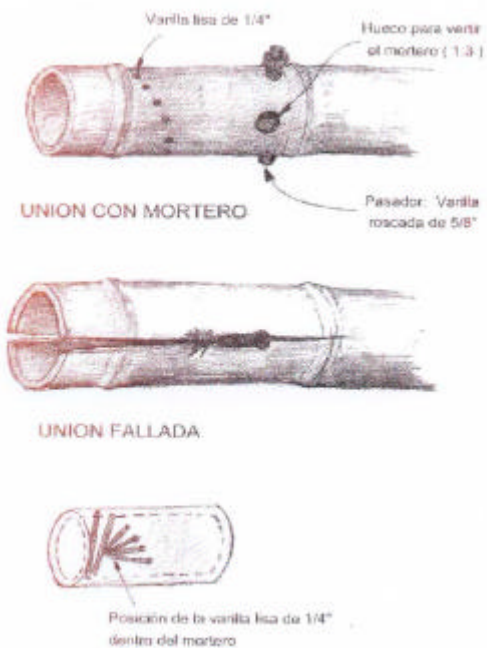
Esta unión cuando falla "ahorca" a la guadua e induce a que se raje. Luego de que la lámina haya "ahorcado" la

guadua, y que la cabeza de los tornillos se entierre en la pared de la guadua, se produce la falla. Su resistencia última promedio es de 9648 kgf. (96 kN). Su gran defecto radica en que sufre grandes deformaciones antes de fallar.

Unión con mortero y varilla:

La segunda propuesta utiliza mortero, pero supera la unión estudiada por Yenny Garzón al transmitir las cargas del mortero a las paredes de la guadua por medio de una serie de varillas lisas de 6.35mm (1/4") de diámetro. Su gran defecto radica en que el mortero falla rápidamente, seguramente se puede mejorar esta unión mejorando la calidad del mortero. La resistencia última promedio de esta unión es de 5970 kgf. (60 kN).

Figura 4



De los resultados, y tras establecer una correlación múltiple se llegó a las siguientes ecuaciones:

$$P = -600 + 2400 \cdot D_e - 2500 \cdot D_i \quad : \text{ unión con mortero}$$

$$P = 5000 + 2200 \cdot D_e - 2400 \cdot D_i \quad : \text{ unión con lámina de acero}$$

Donde P es la resistencia en kilogramos fuerza de la unión, D_e es el diámetro externo de la guadua y D_i es el diámetro interno, ambos en centímetros. De esta forma teniendo las dimensiones de una guadua se puede establecer cuanto puede soportar una unión. Esto sería una herramienta de diseño importante.

Estas fórmulas serían tan fáciles de usar como el siguiente ejemplo.

Ejemplo 1: Se requiere que una unión soporte una carga de 3000kgf. (30kN), se dispone de una guadua con un diámetro externo de 9.5 cm y diámetro interno de 7 cm ¿será suficiente?

Cálculo:

Con mortero: $-600 + 2400(9.5) - 2500*(7) = 4700\text{kgf.}$*

Con lámina: $5000 + 2200(9.5) - 2400*(7) = 9100\text{kgf.}$*

La unión con mortero ofrece un factor de seguridad de: 1.57

La unión con lámina ofrece un factor de seguridad de: 3.03

Sería preferible usar la unión con lámina, o escoger otro diámetro de guadua.

De usarse la unión de Yenny Garzón se tendría que hacer 3 uniones. Para la unión de Peña y Rodríguez tendría que usarse por lo menos dos pares de arandelas.

BIBLIOGRAFÍA

ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERÍA SISMICA. 1998. Normas Colombinas de diseño y construcción sismoresistente. Bogotá: AIS.

CLAVIJO ORTIZ, Sandra Cecilia Y TRUJILLO CHEATLE, David Jorge. Evaluación de uniones a tracción en guadua. Trabajo de grado (Ingeniería Civil). Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil. P. 120

GARZON CAICEDO, Jenny Varinia. Optimización de estructuras en guadua. Santafe de Bogotá, 1996. Trabajo de Grado (Arquitectura). Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá, Facultad de Artes. P. 106.

GERE, James M y TIMOSHENKO, Stephen P. Mecánica de materiales. 1984. México, D.F: Grupo editorial Iberoamericana S.A. de C.V.

GÓMEZ, Carlos y RUBIO, Fabio. 1990. Esfuerzos de trabajo para elementos estructurales de guadua (bambusa guadua). Bogotá: Universidad Pontificia Javeriana facultad de Ingeniería departamento de Ingeniería Civil,

GONZÁLEZ, Eugenia y DIAZ, Jhon. 1992. Propiedades físicas y mecánicas de la guadua. Universidad Nacional de Colombia sede Medellín, Facultad de Ciencias Agropecuarias.

JANSSEN, Jules J. 1998 Building with bamboo a handbook. Holanda: Intermediate technology publications.

JUNTA DEL ACUERDO DE CARTAGENA. Manual de diseño para maderas del grupo Andino. Lima Perú: JUNAC, 1984.

LIESES, Walter. Bamboo: biology, silvics, properties, utilization. GTZ. Eschborn, 1985.

LÓPEZ, Luis F. Y SILVA, Mario F. Comportamiento sismorresistente de estructuras en bahareque. Manizales: Universidad Nacional de Colombia ingeniería civil, 2000.

MARTIN, Jose W. y MATEUS, Lelio R. Resistencia a la compresión paralela a la fibra de la guadua de Castilla. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia Facultad de ingeniería departamento de Ingeniería agrícola, 1981.

PEÑA MUÑOZ, César Y RODRÍGUEZ, Hugo. Propuesta de uniones mecánicas para estructuras de guadua. Santafe de Bogotá, 1997. Trabajo de grado (Arquitectura). Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá, Facultad de Artes. P 108

PRIETO SÁNCHEZ, Edwin y SÁNCHEZ PINEDA, Jorge. Comportamiento de la guadua angustifolia sometida a flexión. Trabajo de grado (Ingeniería Civil). Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil. 2001. P. 101

HE INTERNATIONAL NETWORK FOR BAMBOO AND RATTAN. Inbar standart for determination of physical and mechanical properties of bamboo. INBAR., 1999

AUTORES

LUIS FELIPE LÓPEZ MUÑOZ

Ingeniero civil - Universidad Nacional de Colombia sede Manizales
E-mail: luisfl@yahoo.com

DAVID TRUJILLO CHEATLE

Ingeniero civil - Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá
E-mail: davidtrujilloch@hotmail.com