

Comportamiento estructural de la guadua en Santander

Structural behavior of the bamboo in Santander

RICARDO CRUZ HERNÁNDEZ

Ingeniero Civil Universidad La Gran Colombia. Doctor en Ciencias Técnicas, Technische Universität Wien, Austria. Docente adscrito a la Escuela de Ingeniería Civil; integrante del Grupo de Investigación en Nuevos Materiales y Estructuras (INME), Universidad Industrial de Santander.

racruz@uis.edu.co

JACKSON HERNÁNDEZ MARTÍNEZ

Ingeniero Civil Universidad Industrial de Santander. Integrante del Grupo de Investigación INME.

jakhema@hotmail.com

RAÚL PRIETO ALZATE

Ingeniero Civil Universidad Industrial de Santander. Integrante del Grupo de Investigación INME.

raulprietoalzate@hotmail.com

ANTONIO VICENTE SANTOS MANTILLA

Ingeniero Civil Universidad Industrial de Santander. Integrante del Grupo de Investigación INME.

antoniovicentesantosm@hotmail.com

Fecha de recepción: septiembre 10 de 2004

Clasificación del artículo: Investigación
Fecha de aceptación: diciembre 20 de 2004

Palabras clave: Guadua, propiedades, paneles, uniones.

Key words: Bamboo, properties, panels, joints.

RESUMEN

Para materiales no convencionales y poco estudiados como la guadua, la experiencia obtenida en una región no es aplicable en aquellas en donde la actividad sísmica juega un papel importante en el comportamiento de las edificaciones. Conocer las propiedades del material, de acuerdo con la zona en que se cultiva, es necesario para aplicarlo de manera correcta en la región donde se irá a utilizar. En este artículo se presentan resultados de las propiedades físicas y mecánicas necesarias para la caracterización del material, así como un estudio del comportamiento de paneles que hacen parte de

una vivienda particular y de las uniones que los conforman, con el fin de proponer una herramienta de análisis y diseño para estructuras construidas con guadua y ampliar el conocimiento disponible en la región sobre este material.

ABSTRACT

For non conventional and little investigated materials such as the bamboo, the experience obtained in a region is not applicable to those where the seismic activity plays an important role in the behavior of the edifications. Knowing the

material properties, according with the zone in which it is cultivated is necessary to apply it in a correct manner in the region where it will be used. In this article results of the physical and mechanical properties necessary for the material characterization are presented as well as a study

of the behavior of panels that make part of a particular house and the joints that conform them to propose an analysis and design tool for structures built in bamboo and broaden the available knowledge of this material in the region.

1. Introducción

Para la mayoría de la gente el progreso significa adoptar un pensamiento moderno sepultando las costumbres regionales; en otras palabras, copiar modelos extranjeros de conducta. En las actividades de construcción de vivienda, los sistemas tradicionales que usaban la guadua y la tapia pisada fueron reemplazados por materiales “modernos” como el hormigón y el acero; en consecuencia, disminuyó la investigación en materiales autóctonos.

Desarrollar investigaciones acerca de la guadua es importante porque este material se constituye en una alternativa real para la solución del problema de falta de vivienda, si se complementa con el apoyo de entidades gubernamentales o privadas comprometidas con el desarrollo nacional. El trabajo que aquí se presenta se centra en la zona del Eje Cafetero colombiano, sin mayores antecedentes de estudios previos en la región nororiental de Colombia. Empezar la investigación sobre la guadua en Santander, sitio en el cual sirvió a los antepasados de la zona, puede hacer posible que los campesinos recobren la cultura de su aprovechamiento, que parece perdida, explotando la excelente opción que brinda la guadua como cultivo ambiental y ecológico, y el valor agregado correspondiente a su uso estructural y artesanal.

La primera fase del estudio se inicia con la obtención del material, el cual es extraído de guaduales ubicados en el municipio de Aratoca y la ciudad de Bucaramanga; este es caracterizado en sus propiedades físicas y mecánicas, comparándolas con las de otras regiones del país, para observar la influencia de factores como el suelo de cultivo y el medio ambiente donde se desarrolla. La segunda fase abarca el

estudio de paneles estructurales que hacen parte de una unidad habitacional; en esta etapa se analiza su comportamiento ante cargas sísmicas y verticales generadas por la estructura; asimismo, se plantea una herramienta de diseño y análisis para construcciones en guadua. En la tercera fase se estudian las uniones que conforman los paneles; las primeras son de gran importancia, ya que rigen el comportamiento de los segundos y, por tanto, el de la estructura total.

2. Caracterización del material estructural: guadua

- **Compresión paralela a la fibra.** Fue discriminada en tres tipos de probeta:
 - Tipo A: longitud (L) = 25 cm; compuesta por dos nudos en los extremos; 30 probetas con esta condición (15 de basa y 15 de cepa).
 - Tipo B: L = 25 cm; un extremo con nudo y el otro abierto; 30 probetas con esta condición (15 de basa y 15 de cepa).
 - Tipo C: L = 25 cm; ambos extremos abiertos; 30 probetas con esta condición (15 de basa y 15 de cepa).
- **Tracción paralela a la fibra.** Fue discriminada en dos tipos de probeta:
 - Tipo A: L = 20 cm (ambos extremos abiertos). En total 30 probetas con esta condición (15 para basa y 15 para cepa); de estos ejemplares se extraen las láminas ahusadas.
 - Tipo B: L = 20 cm (con nudo en la parte media). En total 30 probetas con esta condición (15 para basa y 15 para cepa); de estos ejemplares se extraen las láminas ahusadas.

Velocidad de la prueba: 0,5 mm/seg.

- **Cortante paralelo a la fibra.** Discriminadas en dos tipos de probeta:
 - Tipo A: L = 20 cm (ambos extremos abiertos). En total 30 probetas con esta condición (15 de basa y 15 de cepa).
 - Tipo B: L = 20 cm (con nudo en la parte media). En total 30 probetas con esta condición (15 de basa y 15 de cepa).
- **Flexión.** Discriminadas en dos tipos de probeta:
 - Tipo A: L = 100 cm, asegurando que la probeta estuviese compuesta por tres nudos (carga aplicada en entrenudos). En total 30 probetas (15 de basa y 15 de cepa).
 - Tipo B: L = 100 cm teniendo en cuenta que la probeta estuviese compuesta por cuatro nudos (carga aplicada en los nudos). En total 30 probetas (15 de basa y 15 de cepa).

Además se analizaron los parámetros de compresión perpendicular a la fibra y cortante perpendicular a la fibra.

Los especímenes de ensayo se fabricaron de acuerdo con las normas INBAR (*International Network of Bamboo And Rattan*) y las Normas Técnicas Colombianas NTC y ASTM (*American Society for Testing and Materials*) para los ensayos en particular. La guadua usada proviene de cultivos, por ahora no

tecnificados, de la región santandereana. Se comparan los resultados obtenidos con datos de guadua cultivada en la región del eje cafetero (AIS, 2000) con el fin de deducir la influencia del ambiente y el suelo de cultivo en las propiedades. Los resultados sobre propiedades químicas del suelo se muestran en la tabla 1 y las propiedades mecánicas de la guadua en la tabla 2. Para efectos de comparación, en las tablas 3 y 4 se suministran los datos de propiedades de la guadua del eje cafetero. La tabla 5 presenta los esfuerzos de la guadua.

Tabla 1. Comparación de las propiedades químicas (suelo de Santander) con las ideales

Ensayo	Suelo Analizado	Valor teórico
pH	4,8	5,5 - 6,0
P ppm	5	20 - 30
Ca me/100 mg	0,72	5
Mg me/100 mg	0,18	1,84
K me/100 mg	0,06	0,6
Na me/100 mg	0,11	0,21 - 0,27
B ppm	0,18	0,15 - 0,2
Fe ppm	153,4	280 - 300
Mn ppm	1,02	30 - 35
Cu ppm	0,59	1 - 5
Zn ppm	0,36	8 -10
TEXTURA	FCO-Arenoso	FCO-Arenoso

Tabla 2. Valores de esfuerzos para los diferentes ensayos (guadua de Santander)

Solicitud	Esfuerzo último (kg/cm ²)	Factor reducción por calidad	Factor reducción por tamaño	Factor reducción por servicio carga	Factor reducción por duración	Esfuerzo admisible (kg/cm ²)
Compresión paralela	393,79	0,80		1,60	1,25	157,52
Compresión perpendicular	11,37			1,60		10,86
Tracción paral sin nudo	2.505,60	0,80	0,90	1,20	1,15	1.307,27
Tracción paral con nudo	509,57	0,80	0,90	1,20	1,15	265,86
Cortante paral sin nudo	59,05			4,00		14,76
Cortante paral con nudo	59,35			4,00		14,84
Cortante perpendicular	82,53			1,60		51,58
Flexión	288,36	0,80	0,90	1,15	2,00	90,27
Módulo de elasticidad	107.244	kg/cm ²				
Módulo de cortante	13.167	kg/cm ²				

Tabla 3. Esfuerzos últimos y admisibles (guadua del Eje Cafetero) (López, 2000)

	Tracción	Compresión paralela a la fibra (kg/cm²)	Corte paralelo a la fibra (kg/cm²)
Esfuerzo promedio	535,1	438,7	68,7
Desviación estándar	116	91,7	17
Esfuerzo último	352,5	280	43,1
Esfuerzo admisible	264	140	11

Tabla 4. Módulo de elasticidad a flexión (guadua del Eje Cafetero) (Sánchez, 2000)

Módulo de elasticidad (kg/cm²)	Luz libre	
	<i>L < 1,5 m</i>	<i>L > 1,5 m</i>
Mínimo	30.000	60.000
Promedio	65.000	115.000

Tabla 5. Esfuerzos en guadua cebolla y macana (guadua del Eje Cafetero) (Martínez, 1992)

Tipo de guadua	Compresión perpendicular a la fibra		Flexión		Compresión paralela a la fibra	
	Esfuerzo _U (kg/cm ²)	Esfuerzo _{adm} (kg/cm ²)	Esfuerzo _U (kg/cm ²)	Esfuerzo _{adm} (kg/cm ²)	Esfuerzo _U (kg/cm ²)	Esfuerzo _{adm} (kg/cm ²)
Cebolla	35	17	170	60	290	115
Macana	23	11	175	60	343	135

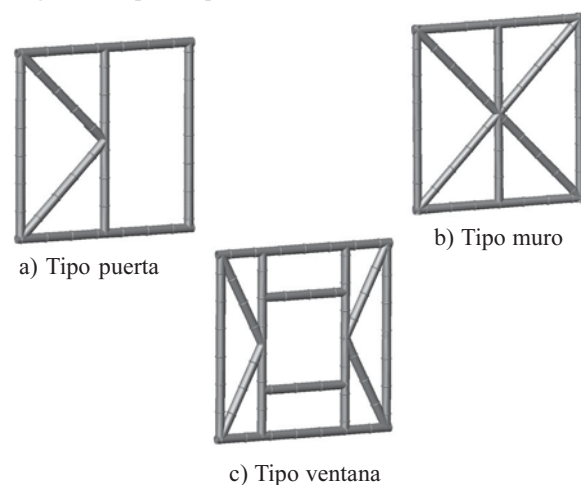
3. Modelamiento de paneles

Para el estudio de paneles se realizó un censo; los más apropiados fueron seleccionados teniendo en cuenta aspectos como cantidad de guadua empleada, tiempo de construcción y configuración estructural apropiada; luego se modelaron ante sollicitación de carga gravitacional y sísmica, empleando el programa de diseño estructural SAP2000 para obtener las fuerzas axiales en los elementos constitutivos del panel.

Para seleccionar los paneles óptimos se calculó la relación beneficio-costo. El beneficio se midió en términos del mejor o peor comportamiento de cada panel a causa del efecto de sus fuerzas axiales internas; el costo se calculó en términos de los precios de materiales necesarios para la construcción y la mano de obra. El modelamiento tiene en cuenta las propiedades físicas y mecánicas de la guadua, considerando el material como isotrópico. Los paneles escogidos

representarán los tres módulos básicos de una unidad habitacional; un panel de puerta, un panel de muro y un panel de ventana, como se muestra en la figura 1.

Figura 1. Tipos de paneles

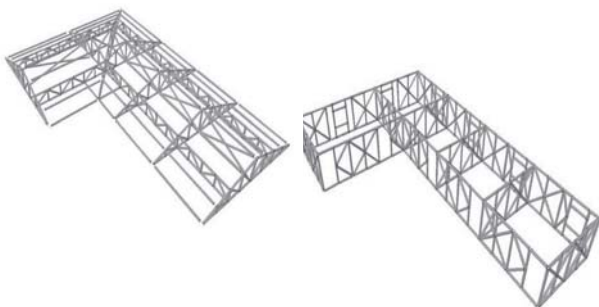


Para el análisis se utiliza el método de esfuerzos admisibles que proporciona mejor comprensión para trabajos de investigación en ingeniería (Parker, 2000: 15). Este método no tiene en cuenta coeficientes de mayoración en las cargas aplicadas, dado que no existe normatividad para estructuras en guadua.

En construcciones flexibles como las realizadas con guadua, la estructura de cubierta se comporta como un diafragma horizontal flexible. Este tipo de análisis es complejo porque implica suponer que cada muro de corte toma la carga horizontal resultante, producto de las cargas verticales actuantes en su área de influencia; además debe analizarse el efecto de cierta rigidez en los diafragmas horizontales que influya en la distribución de las cargas laterales sobre el panel. Para edificaciones pequeñas en las que puede limitarse la distancia entre muros paralelos (4 m) y distribuirlos de manera más o menos uniforme, es posible suponer que la estructura del techo actúa como un diafragma rígido, lo que permite distribuir la fuerza cortante total proporcionalmente a las rigideces de los muros (Junta del Acuerdo de Cartagena, 1984).

Para validar la información obtenida en el ensayo de los paneles se toma un modelo de vivienda particular propio de la región (figura 2), se calculan las cargas en los paneles producto de las sollicitaciones propias de la estructura y se realizan los ensayos para obtener los resultados que mostrarán su eficiencia.

Figura 2. Modelo de vivienda



Los paneles ensayados son de 2 x 2 m cada uno. El mecanismo de prueba, instalado en el marco perteneciente al Grupo INME¹, transmite las cargas simulando el efecto de un sismo. El dispositivo de transmisión de carga horizontal consiste en un gato hidráulico y un manómetro calibrado con capacidad de 40 t. La carga vertical se aplica por medio de peso muerto (cilindros de concreto con 180 kg/m, para un total de 360 kg/panel). Una vez se carga el panel en forma vertical, la carga horizontal se aplica en cuatro ciclos provocando la pérdida de resistencia en la probeta. La deformación horizontal se registra en la solera superior y en el desplazamiento relativo de los pies derechos.

Figura 3. Mecanismo de prueba

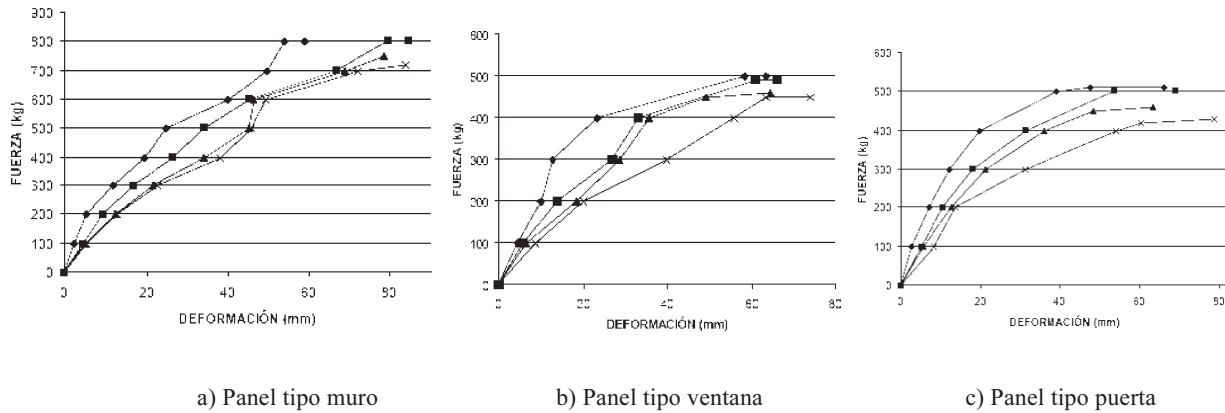


4. Comportamiento de los paneles

Para cada tipo de panel, la relación entre la carga aplicada y la deformación obtenida en el cuarto ciclo es: a) panel tipo puerta: 570 kg, con 30,3 cm; b) panel tipo muro: 900 kg con 22,5 cm; c) panel tipo ventana: alcanza 540 kg con 31,7 cm.

¹ Grupo de Investigación en Nuevos Materiales (INME), adscrito a la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad Industrial de Santander (UIS) en Colombia.

Figura 4. Relación fuerza-deformación (cuatro ciclos)



Las uniones incrementan su deformación después de la aplicación de cada ciclo de carga, asemejándose a un ciclo de histéresis; esta deformación se evidencia en la disminución de la resistencia en el último ciclo de carga: 18% para el panel puerta, 10% para el muro y 10% para la ventana, aproximadamente.

El límite proporcional se toma como la carga en el punto donde la línea de tendencia (creada a partir de los valores que muestran linealidad) corta la curva *carga versus deformación* del panel. El límite proporcional de cada panel es: a) panel puerta: 425 kg; b) panel muro: 680 kg; c) panel ventana: 450 kg. Al comparar los valores que pueden obtenerse de la figura 4 con las cargas últimas se encuentra que la carga en el límite proporcional para el panel puerta es un 74,6% de la carga última; para el panel muro es un 75,6% y para el panel ventana, un 83,3%.

En las curvas carga *versus* deformación de la figura 4 se observa que los paneles no tienen un comportamiento lineal; por esto el cálculo de la rigidez para cada uno de ellos depende del valor de la deformación para cada carga. Aplicando el siguiente procedimiento puede obtenerse la rigidez real de cada panel, que consiste en igualar la fuerza cortante total² actuante sobre los paneles de corte de la estructura con la fuerza horizontal resistente, así:

$$F_{HA} = F_{HR} \quad (1)$$

$$F_{HA} = \sum_i^n \#_{\text{PANELES}} * F_i \quad (2)$$

$$F_i = K_i * \Delta_i \quad (3)$$

$$F_{HA} = \#_{\text{MURO}} * K_M * \Delta_M + \#_{\text{PUERTA}} * K_P * \Delta_P + \#_{\text{VENTANA}} * K_V * \Delta_V \quad (4)$$

En las ecuaciones anteriores:

F_{HA} : Fuerza horizontal actuante sobre la estructura

F_{HR} : Fuerza horizontal resistente

$\#_{\text{MURO}}, \#_{\text{PUERTA}}, \#_{\text{VENTANA}}$: Número de paneles en la dirección en estudio

K_M, K_P, K_V : Rigidez en los paneles muro, puerta y ventana

\hat{f}_i : Deriva del panel i

F_i : Fuerza de servicio actuante sobre el panel i

K_i : Rigidez en el panel i

² La fuerza cortante total se asimila como la fuerza horizontal equivalente.

Para la validez del procedimiento anterior, se supone que al actuar la fuerza horizontal en la estructura todos los paneles de un eje tendrán un mismo valor de deformación, independientemente del valor de su rigidez, por no presentarse desplazamientos relativos entre ellos.

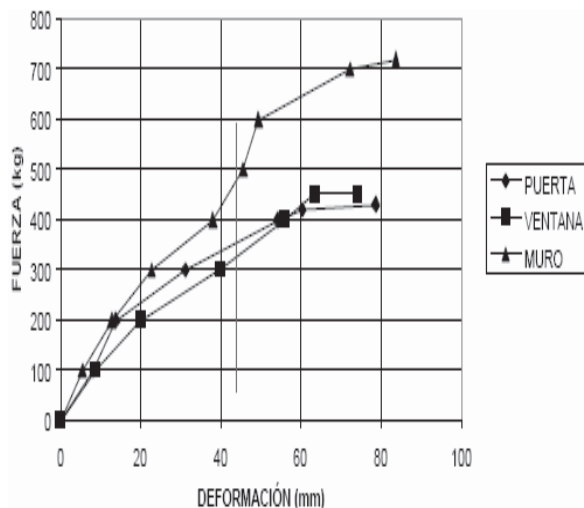
$$F_{HA} = \Delta * (\#_{MURO} * K_M + \#_{PUERTA} * K_P + \#_{VENTANA} * K_V) \quad (5)$$

Con dicha suposición, la ecuación se simplifica de la siguiente manera:

$$F_{HA} = \#_{MURO} * F_M + \#_{PUERTA} * F_P + \#_{VENTANA} * F_V \quad (6)$$

Para encontrar la cantidad de paneles que resistan una fuerza horizontal dada sobre una estructura, en la figura 5 se introduce un valor establecido de deformación y se hallan las cargas de servicio sobre cada panel. Para desarrollar la ecuación debe conocerse el número de paneles puerta y ventana del diseño arquitectónico estudiado. La carga de servicio debe estar por debajo de la carga en el límite proporcional para garantizar un comportamiento adecuado de los paneles en condiciones normales y la validez de la hipótesis del comportamiento lineal y elástico cuando se trabaja con este tipo de cargas.

Figura 5. Último ciclo de carga para cada tipo de panel



Los valores de las rigideces reales halladas mediante el procedimiento anterior y los de las rigideces teóricas se muestran en las tablas 6-8.

Por las magnitudes de las cargas manejadas en este análisis, las cargas verticales aplicadas sobre cada panel no son determinantes de los valores de resistencia obtenidos para estos. La carga vertical incrementa la compresión en los elementos verticales, mientras que en el panel las fuerzas críticas son de tensión, provocadas por la fuerza horizontal; estas últimas aumentarían si se retira por completo la carga vertical.

Tabla 6. Rigidez K real y K teórica para cada tipo de panel

Panel	K real (kg/cm)	K teórico (kg/cm)
Muro	108	8.074
Puerta	81	2.712
Ventana	74	2.250

En los paneles ensayados, la rigidez ante cargas horizontales es determinada solo por el entramado del panel con diagonales. Teniendo en cuenta que en el momento de la construcción este panel se revocará al menos por una cara, se le sumará la rigidez del revoque, que se supone de malla de metal expandido con un espesor de 0,8 mm, aberturas de 10*20 mm, clavos doblados sobre la malla a 10 cm en extremos de malla y a 20 cm en la zona interior y mortero de cemento arena 1:4 de 1,5 cm de espesor, construido en dos capas para aportar una rigidez de 150 kg/cm*m (Junta del Acuerdo de Cartagena, 1984). El revestimiento solo cumple el papel de aportar rigidez al panel, más no resistencia, ya que el esqueleto de guadua resiste toda la sollicitación calculada que pueda presentarse.

Con base en los valores de carga horizontal en el límite proporcional de cada tipo de panel y en los valores de carga de diseño para sollicitación por carga muerta, viva, viento y sismo, conforme a la combinación de cargas más crítica (D+L+0,7E), en la tabla 9 se muestra la carga de diseño como porcentaje de la carga en el límite proporcional.

Tabla 7. Rigidez K real para cada tipo de panel

Panel	Carga de servicio horizontal (kg)	Carga vertical aplicada (kg)	∅ (cm)	K (kg/cm)
Muro	470	360	4,35	108
Puerta	353	360	4,35	81
Ventana	322	360	4,35	74

Tabla 8. Rigidez K real y K teórica para cada tipo de panel

Panel	K real (kg/cm)	K teórico (kg/cm)
Muro	470	360
Puerta	353	360
Ventana	322	360

Tabla 9. Porcentaje de la carga de servicio en el límite proporcional

Panel	Carga de diseño horizontal (kg)	Carga en el límite proporcional (kg)	%
Muro	470	680	69,1
Puerta	353	425	83,1
Ventana	322	450	71,6

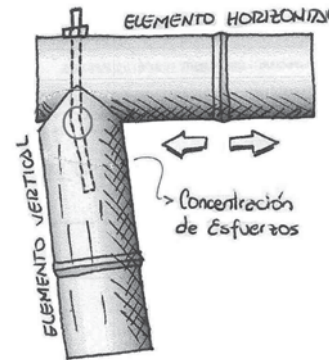
Al calcular las cargas de servicio en función de las rigideces reales, el análisis teórico señala que el panel ventana asumiría una carga de servicio de 198 kg en sentido horizontal; deberá ahora diseñarse para soportar una carga de servicio de 322 kg, bastante superior (62% adicional). Así, el análisis y diseño de los elementos para distintas sollicitaciones deberán realizarse teniendo en cuenta las rigideces reales.

5. Optimización de uniones ante fuerza sísmica

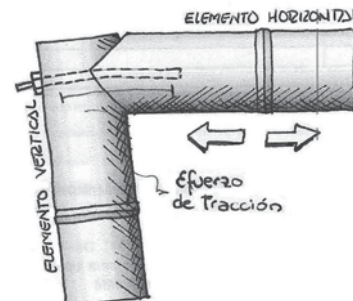
La primera modificación a realizar es la configuración de elementos en las uniones esquineras. Dado que la sollicitación más importante será la

carga horizontal, el elemento horizontal debe colocarse a un costado y no encima del elemento vertical, como puede apreciarse en la figura 3.

Figura 6. Tipo de unión a analizar



Caso 1



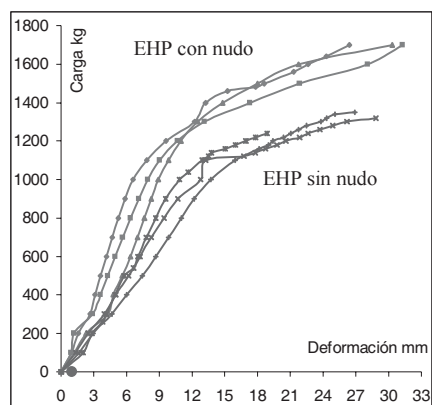
Caso 2

En el caso 1, la respuesta de la unión a la sollicitación será respondida exclusivamente por el pasador que conecta los dos elementos en forma incorrecta (esfuerzo cortante). En el caso 2, dado que el perno estará en mejores condiciones de responder a la fuerza (esfuerzo normal), las paredes de la guadua y el pasador serán en últimas los encargados de resistir los desplazamientos generados; se planeó evaluar cada elemento por separado, considerando el comportamiento que tendrían al estar conformando la unión y estar sollicitados a la fuerza actuante.

Para conocer el grado de optimización que tendrá la unión y el comportamiento esperado del material ante las solicitaciones presentadas, a cada elemento de la unión tipo se aplicaron las fuerzas a las que estarían sometidos sin ningún anclaje especial. Las probetas se denominaron EHP para el elemento que queda horizontal y EVP para el elemento que queda vertical; en ambos casos se tomaron probetas con nudo y sin nudo en el extremo, para conocer la incidencia de este elemento en la resistencia final.

En la figura 7 puede apreciarse que la guadua podrá resistir la fuerza que actúa sobre la conexión en el elemento horizontal sin ningún anclaje especial. Cuando la guadua no presenta nudo en el extremo de falla, la carga resistida se encuentra entre 1.000 y 1.400 kg, si se tiene una distancia del perno de 5/8" al borde de por lo menos 15 cm.

Figura 7. Elemento horizontal pernado con y sin nudo en el extremo



Cuando el elemento presenta nudo, la capacidad aumenta a 1.500-1.800 kg. El elemento transmisor de la fuerza (perno transversal) es una varilla roscada 5/8" grado 2, con sus respectivas tuercas y arandelas; como elemento conector entre los dos elementos de guadua se emplea una varilla roscada 1/2" grado 2. Las probetas con nudo en el extremo presentaron primero un abollamiento por efecto del pasador en la pared de la guadua para terminar en un cortante paralelo a las fibras en dos planos distintos. Las que no tenían nudo en el extremo de falla solo presentaron cortante paralelo en un solo plano.

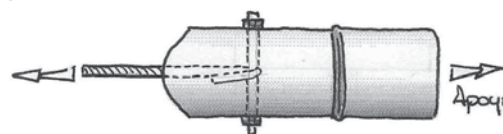
Figura 8. Cortante || en dos planos



Figura 9. Cortante || en un plano

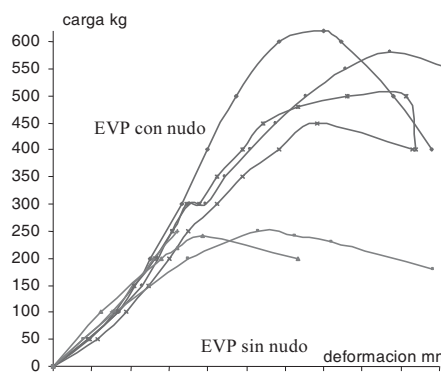


Figura 10. EHP



En el elemento vertical, el esfuerzo al que estará sometido será de corte perpendicular a las fibras o aplastamiento, alcanzando valores de menos de 300 kg cuando no tienen nudo en el extremo de falla, y de 500 kg con nudo, consiguiéndose rigideces menores de 30 kg/mm. El elemento transmisor es una varilla roscada de 1/2" grado 2, que vendría siendo el mismo presentado en el elemento horizontal.

Figura 11. Elemento vertical pernado con y sin nudo en el extremo



Las fallas se muestran en las figuras 12-14; las probetas con nudo en el extremo presentaron cortante perpendicular a las fibras en dos planos distintos. Las probetas que no tenían nudo en el extremo de falla solo presentaron cortante perpendicular en un solo plano.



Figura 12. Cortante \perp en dos planos

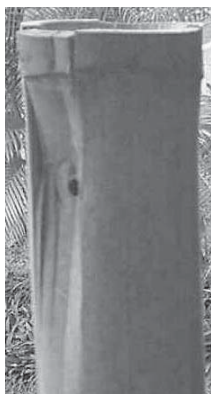


Figura 13. Cortante \perp en un plano

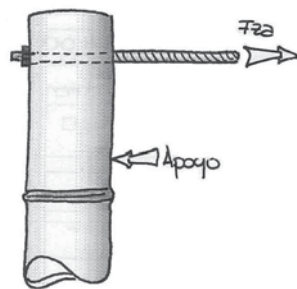


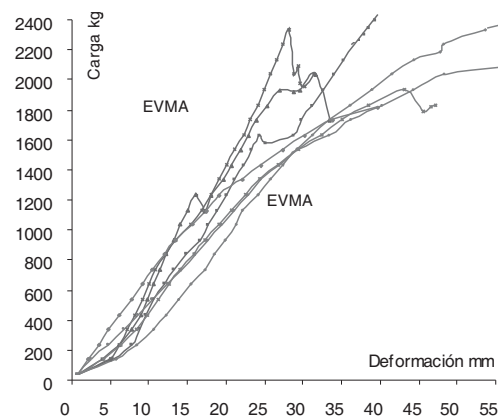
Figura 14. EVP

La unión de las dos probetas (EHP y EVP) conforma el tipo de unión estudiado. De acuerdo con lo anterior, se hace necesario optimizar el elemento que quedará vertical, el cual queda sometido a

esfuerzos perpendiculares a la fibra haciendo que la capacidad última de resistencia de la unión sea regida por este elemento y no por el horizontal. Además, dado que la ausencia del nudo en el extremo de falla incide negativamente en la resistencia de la conexión, en las siguientes probetas se ensayará esta condición.

Para el elemento vertical se estudian varias alternativas: embeber mortero dentro del canuto, introducir tacos de madera para volver rolliza la guadua y/o utilizar aglomerado (cemento y viruta). En la figura 15 se hace una comparación entre las probetas que tienen embebido mortero en los canutos (EVMo) y las probetas a las que se les han introducido tacos de madera tipo B (copillo) de diámetro exacto al del interior de la guadua con longitudes de 15 cm (EVMa). En ambas probetas el comportamiento fue muy parecido; las que tenían mortero embebido obtuvieron rigideces de 60 kg/mm y las que tenían taco de madera, rigideces de 50 kg/mm. La optimización en términos de rigidez obtenida para el elemento vertical fue de un 100%, alcanzándose la carga necesaria para resistir la fuerza horizontal (1.400 kg).

Figura 15. Elemento vertical con mortero *versus* madera



Las fallas se muestran a continuación (figuras 16 y 17); el mortero y el taco de madera fallaron después de fallar la guadua, ya que ésta sufrió múltiples cortantes perpendiculares a la fibra.

Figura 16. Falla en EVMa



Figura 17. Falla en EVMo



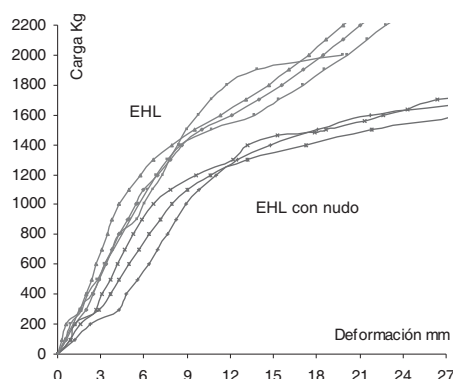
Como alternativa para aumentar la rigidez de los elementos vertical y horizontal en la unión estudiada se utilizó como material de relleno un aglomerado de aserrín previamente mineralizado con cloruro de calcio, cemento y agua en proporciones establecidas en investigaciones previas (Rojas, 1978). Con esto se busca obtener una guadua rolliza que responda mejor a las solicitaciones que se presentarán, con la ventaja de utilizar aserrín como material agregado de bajo peso reduciendo la carga a resistir, generada por la fuerza horizontal equivalente, y aprovechando la facilidad de elaboración proporcionada por un mortero con cemento. Además, la guadua se enrolla con una lámina *cold rolled* calibre 22 de 5*100 cm, que pueda dar varias vueltas al diámetro de la guadua. Los elementos transmisores de la fuerza entre lámina y guadua serán clavos de acero de 1/8"

de diámetro * 1" de largo. Los conectores (clavos) se colocarán dentro de la lámina buscando que ésta resista el cambio de dirección de sollicitación.

Para los elementos horizontales (cortante paralelo a las fibras), con la lámina se busca aumentar la rigidez de las paredes de la guadua, para evitar el abollamiento inicial que sufre el material debido al desplazamiento del pasador hasta inducir el corte. Para los elementos verticales (cortante perpendicular a las fibras) se busca que la lámina mantenga cerrada la guadua, ya que los múltiples cortes inducen al material a abrirse.

El aumento de rigidez para el elemento horizontal puede apreciarse en la figura 18, en la cual se comparan los resultados de probetas con nudo en el extremo sin ningún anclaje especial (EHP) con las probetas con el anclaje propuesto (EHL), es decir, con el aglomerado y la lámina enrollada.

Figura 18. Comportamiento del elemento horizontal sin anclaje *versus* el propuesto



Para una carga de 1,4 t el anclaje EHL sin nudo presenta una deformación de 14 mm ($K = 100 \text{ kg/mm}$), esto es, 75 kg/mm más que la presentada en las probetas con nudo sin anclaje especial. El perno transversal se colocó a 15 cm del borde con 14 clavos sujetando la lámina. Las fallas de estas probetas se debieron también al efecto del cortante paralelo a las fibras cuando la carga supera el valor de 3,5 t; elementos con pernos situados a distancias menores de 10 veces su diámetro del extremo presentaron falla con cargas de tan solo 1,6 t.

Figura 19. Falla de la pared para EHL



Figura 20. Falla del aglomerado EHL



Para el elemento vertical los resultados no fueron los esperados, ya que el aglomerado no resultó tan fuerte como se esperaba. Su comportamiento se aprecia en la figura 21, en la cual se lo compara con las probetas con taco de madera.

Figura 21. Comportamiento del elemento vertical, con taco de madera *versus* el propuesto

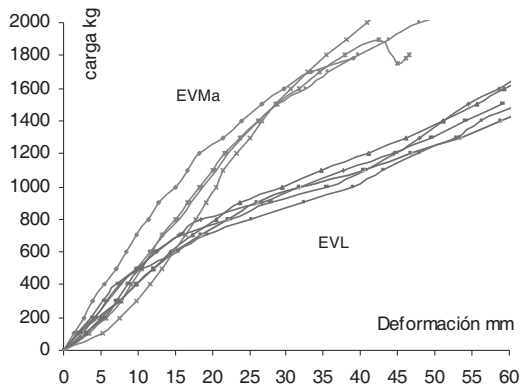
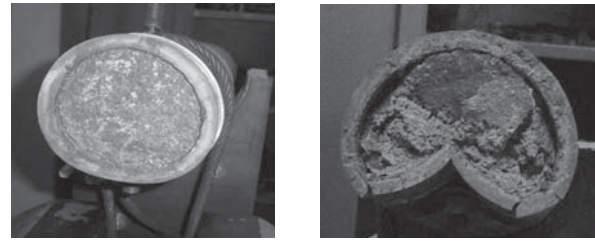


Figura 22. EVL antes y después de la falla



6. Conclusiones

Para el cultivo tecnificado de la guadua en la región nororiental de Colombia se hace necesario adecuar los suelos de siembra, preparar tecnológicamente los sectores agroindustrial y de la construcción y realizar campañas de concientización de los posibles usuarios de vivienda en guadua.

La guadua cultivada en Santander posee propiedades fisicomecánicas apropiadas para su uso en construcción, siempre que se garantice su explotación en forma técnicamente apropiada, siguiendo las especificaciones establecidas mundialmente para ello.

Las rigideces reales de los paneles son extraordinariamente más bajas que las teóricas, producto de los mayores desplazamientos. Las discrepancias se deben principalmente a que, cuando se aplica carga en el panel, las uniones tienden a separarse, producto de la deformación de los pasadores que transmiten la fuerza axial a las paredes de la guadua.

El cálculo de las rigideces reales con el método propuesto en esta investigación optimiza el diseño de los paneles, ya que supone un comportamiento más cercano al real de la estructura en cuanto a distribución de la carga horizontal sobre cada tipo de panel y desplazamientos. Así, se ha generado una herramienta poderosa para el diseñador que, conociendo las solicitaciones de una vivienda, puede calcular el número de paneles necesarios para un diseño satisfactorio.

Los cortes que se realizan en los elementos que conforman los paneles para el ensamblaje deben

ser hechos de tal manera que la fuerza axial actuante sea transmitida a su correspondiente empalme y distribuida en la mayor parte de sección transversal de guadua, para evitar la concentración y la generación de esfuerzos secundarios críticos.

La resistencia de los paneles es determinada por las conexiones, siendo estas los puntos críticos por concentración de esfuerzos, altas deformaciones y por ineficiencia para transmitir los mismos en la totalidad de la sección transversal del elemento.

En el tipo de unión estudiada, debido a su posición en el panel, el elemento horizontal presentó los menores inconvenientes de comportamiento, pues solo está sometido a fuerzas axiales, es decir, a tracción o compresión; la primera es la sollicitación más importante, pues por ella se dificulta el anclaje entre elementos. Para esta clase de elementos el pasador transversal debe estar por lo menos a una distancia no menor a 10 veces el diámetro del perno; en este caso sería de 15 cm para una varilla de 5/8".

El elemento horizontal será capaz de resistir una fuerza de 1,4 t, con una deformación correspondiente de 17 mm, si dispone de un diafragma en el borde de falla presentado ($K = 82 \text{ kg/mm.}$). Si

el elemento no presenta un nudo en el extremo, se hace necesario ayudarlo a resistir el cortante mediante algún accesorio externo (el tipo de anclaje propuesto).

Debido a la forma de conexión dada, la poca rigidez al cortante que presenta el perno transversal hace que las deformaciones en el elemento horizontal se deban al perno y no a la guadua.

El elemento vertical consiste en una varilla roscada de $\frac{1}{2}$ " de diámetro grado 2, y su esfuerzo de fluencia es de 4.200 kg/cm^2 , como elemento transmisor de fuerza. La distancia del perno al borde de falla tiene un valor constante de 6 cm.

La utilización de madera puede ser considerada una alternativa viable como material de relleno por su comportamiento parecido al del mortero, además de su bajo peso; no obstante, su costo puede resultar mayor y su proceso constructivo menos eficiente.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su reconocimiento a los demás integrantes del grupo de investigación, ingenieros Hernán Darío Herrera y José Luis Gabrielle por su participación en este proyecto.



Referencias bibliográficas

- [1] AIS, Asociación de Ingeniería Sísmica (2002). *NSR-98 Normas colombianas de diseño y construcción sismorresistente*. Bogotá, AIS.
- [2] _____ (2000). *Comportamiento sísmico de bahareque encementado de guadua y madera*. Bogotá: Fondo para la Reconstrucción y Desarrollo del Eje Cafetero (Forec), 42 p.
- [3] CLAVIJO, S. y D. TRUJILLO (2000). *Evaluación de uniones a tracción en guadua*. Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.
- [4] GABRIELE, J. L. y H. D. HERRERA (2004). *Parámetros de diseño de elementos de guadua cultivada en el municipio de Aratoca, Santander*. Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad Industrial de Santander, Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, Bucaramanga.
- [5] HERNÁNDEZ J. y A. SANTOS (2004). *Estudio sobre el comportamiento de paneles en guadua para la conformación de vivienda*. Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad Industrial de Santander, Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, Bucaramanga.
- [6] JUNTA DEL ACUERDO DE CARTAGENA (1984). *Manual de diseño para maderas del Grupo Andino*. Lima, Perú.
- [7] LÓPEZ, L. F. y M. F. SILVA (2000). *Comportamiento sismorresistente de estructuras en bahareque*. Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales, Facultad de Ingeniería, Manizales.

- [8] MARTÍNEZ, D. E. (1992). "Puentes en do mayor". En *Memorias I Congreso Mundial de Bambú/Guadua*. Pereira (tesis de grado), p. 173.
- [9] PARKER, H. y J. AMBROSE. *Diseño simplificado de estructuras en maderas*. México, Limusa, p. 15.
- [10] PRIETO, R. (2004). *Optimización de unión en guadua ante sollicitación de fuerza sísmica*. Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad Industrial de Santander, Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, Bucaramanga.
- [11] ROJAS, W. (1978). *Informe sobre la investigación de materiales autóctonos para construcción de vivienda económica*. Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad Industrial de Santander, Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, Bucaramanga.
- [12] SÁNCHEZ J. y E. PRIETO (2000). *Comportamiento de la guadua angustifolia sometida a flexión*. Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil, Bogotá.