

## 2. ANTECEDENTES

Uno de los grandes investigadores Colombianos reconocidos a nivel internacional por estudiar a fondo el Bambú, es el Arquitecto *Oscar Hidalgo*, el cual está trabajando junto al INBAR, Institute Of Bamboo And Rattan, en la publicación de una enciclopedia especializada en el Bambú.

Oscar Hidalgo ha concebido en Puerto Rico, un proyecto encaminado en prevenir la deforestación e incentivar la construcción de vivienda con materiales alternativos, económicos y sostenibles. El proyecto persigue la utilización sostenible del bambú como material de base para la realización de un programa de vivienda de interés social y para la industrialización y comercialización de los productos complementarios del bambú. Bajo este proyecto se construyeron 30 unidades familiares, soportando satisfactoriamente un sismo de magnitud 7.5 en la escala de Richer el 22 de Abril de 1991 en Costa Rica<sup>1</sup>.

"*Acero Vegetal*" es la denominación que le ha otorgado a la guadua el Arquitecto *Simón Vélez*. Este Arquitecto es más osado en sus diseños, sometiendo la guadua especialmente a compresión. Construyó el pabellón Zeri, representando a Colombia en la feria mundial de Expo-Hannover en Alemania; de ésta construcción se hizo una replica exacta para someterla a pruebas de carga y resistencia, soportando cargas de 400 kg/m<sup>2</sup>.

Con el trabajo de grado "Comportamiento Sismorresistente de Estructuras en Bahareque", los estudiantes de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional sede Manizales, Felipe López y Mario Silva, hicieron un gran aporte para que la Asociación de Ingeniería Sísmica desarrollara un manual de construcción sismorresistente de viviendas en bahareque encementado<sup>2</sup>. Este manual presenta requisitos adicionales, para el Título E de las Normas NSR-98, en relación con el diseño simplificado y construcción de casas de uno y dos pisos de bahareque encementado de madera y guadua.

En la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional sede Bogota D.C., se han desarrollado los siguientes proyectos de grado vinculados a la investigación del material: Evaluación de uniones a tracción en guadua, por Sandra Clavijo y David Trujillo; Comportamiento de la guadua angustifolia sometida a flexión, Edwin Prieto y Jorge Sánchez; además, paralelamente al desarrollo de este proyecto se esta investigando en: Estudio de elementos solicitados a compresión armados con dos o mas guadas, Maritza Uribe y Alejandro Duran; Estudio de uniones de guadua con ángulo de inclinación entre elementos, Diego Jaramillo y Gisella Sanclemente; Estudio de conexiones en guadua angustifolia solicitadas a momento flector, Isduar Páez y Víctor Camacho, investigaciones dirigidas por la Ingeniera Caori P. Takeuchi.

---

<sup>1</sup> GUTIERREZ G., Jorge A. Comportamiento Estructural y resistencia sísmica de las viviendas de bambú. En CONGRESO MUNDIAL DE BAMBÚ / GUADUA. (1º : 1992 : Pereira). Memorias I Congreso Mundial de Bambú / Guadua. Pereira: 1992; p. 161.

<sup>2</sup> AIS ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERIA SÍSMICA. Manual de Construcción Sismo Resistente de Viviendas en Bahareque Encementado. 2001. Publicación con el auspicio de la Fundación Corona.

## 2.1. ARMADURAS

Una armadura se compone de un conjunto de miembros rectos articulados unos con otros en los puntos llamados nudos. Los miembros de una armadura están conectados solo por sus extremos, por tanto, ningún miembro se prolonga más allá del nudo<sup>3</sup>. En general, las barras de una armadura son miembros rectos esbeltos y solo pueden soportar pequeñas cargas laterales; por esta razón, es recomendable que todas las cargas se apliquen en los nudos y no en las barras.

Se supone además que los pesos de las barras de la armadura están aplicados en los nudos. Al estar las barras conectadas con pasadores, las fuerzas que actúan en cada extremo de una barra, se reducen a una fuerza única sin par de fuerzas. Cada miembro puede tratarse como una barra con fuerzas en sus extremos y la estructura completa puede considerarse como un conjunto de pasadores y barras sometidas a dos fuerzas.

Se puede obtener una estructura rígida mas grande añadiendo dos barras a una armadura triangular básica; ésta operación puede repetirse las veces que se desee y la estructura resultante será rígida, si cada vez que se añadan dos nuevos elementos, se unen a dos nudos diferentes y se conectan una a la otra en un nuevo nudo. Este tipo de armadura se conoce con el nombre de *Armadura Simple*.

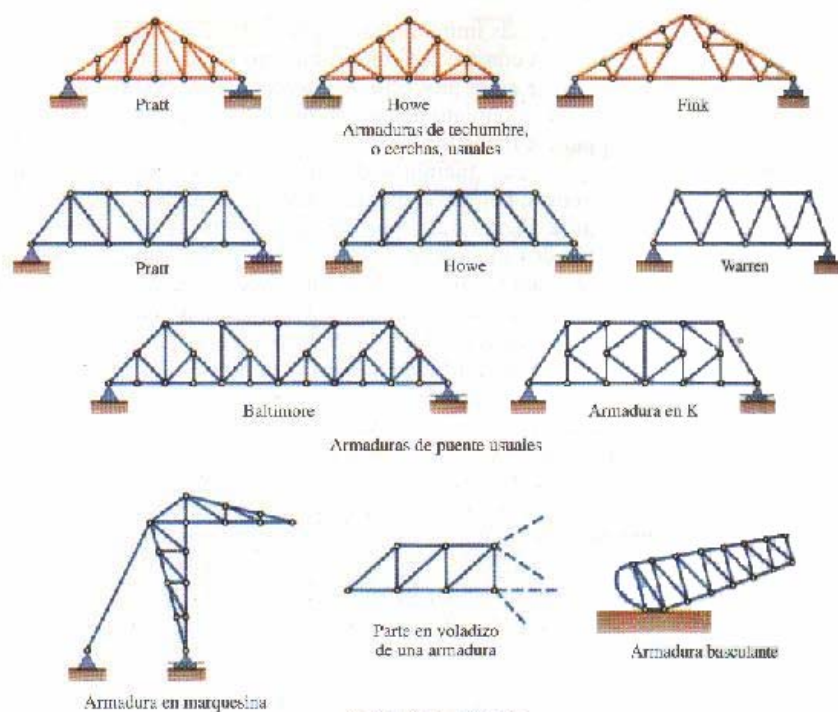
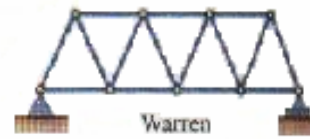


FIGURA N° 2. Tipos de armaduras<sup>4</sup>

<sup>3</sup> En algunos casos experimentales o prácticos, los cordones de la armadura se constituyen con un solo elemento el cual esta afectado por pasadores que generan los nudos.

<sup>4</sup> BEER, Ferdinand Y JOHNSTON, Russell. Mecánica Vectorial Para Ingenieros. p. 272.

Para el desarrollo de este trabajo se optó por utilizar una armadura simple, clasificada como un modelo *Warren* "Invertido", de 11 elementos y 7 nudos, con un total de 5 paños.



**FIGURA N° 3.** Armadura tipo Warren

Análogamente a las armaduras construidas con madera, las construidas en guadua presentan ventajas para la solución de puentes y cubiertas en general por su posibilidad de cubrir luces mayores que usando sistemas a base de viguetas, lo que posibilita una mayor flexibilidad en el diseño, evitando la construcción de paneles interiores portantes. Por su bajo peso se hacen más manejables en el montaje que en otros sistemas.



**FOTOGRAFIA N° 1.** Armaduras.

El diseño que se propone en este trabajo es solo una de varias posibilidades en las armaduras. Generalizando la información básica de diseño para armaduras ligeras, es recomendable utilizarlas en uso residencial o en pequeñas edificaciones con luces hasta de 12 metros.

### **2.1.1. Formas Y Proporciones**

Existen dos aspectos básicos para considerar en el dimensionamiento inicial de una armadura: la forma exterior, que para una luz determinada se refiere a la altura de la armadura o su pendiente, y la distribución interna de las barras, que es función de su máxima longitud recomendable y la necesidad de su triangulación para transmitir las cargas a los apoyos, la ubicación de las correas que recibe la cobertura influye también en la ubicación de los nudos y del número de paños.

El contorno exterior depende del tipo de cobertura, de la arquitectura de la estructura y de la luz por cubrir.

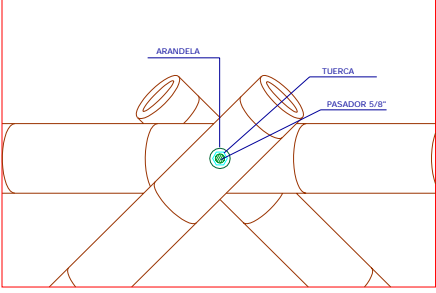
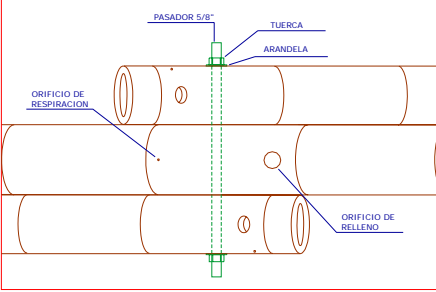
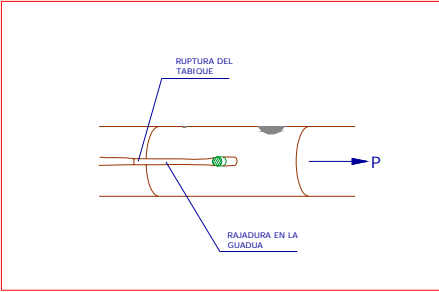
Los esfuerzos por flexión del cordón superior se pueden evitar ubicando las correas directamente sobre los nudos de la armadura; además para evitar secciones pesadas en este mismo cordón es recomendable que los elementos no excedan los 2.5 metros de longitud.

La configuración de los elementos internos de la armadura, debe resultar en paños tales que reduzcan el número de nudos, así mismo, entre menos nudos se presenten, se reducirá el costo por mano de obra.

La esbeltez en los elementos en compresión no debe ser excesiva, ya que la capacidad de carga disminuye proporcionalmente con el incremento de esbeltez.

## 2.2. UNIONES

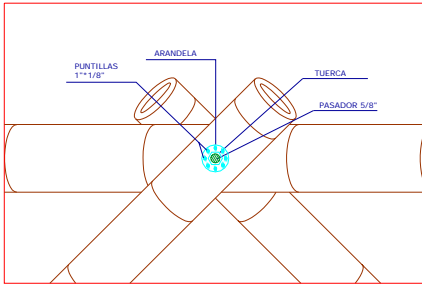
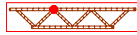
### 2.2.1. Uniones Con Excentricidad

<b>TIPO: SIMON VELEZ</b>	
 <p><b>FIGURA N° 4.</b> Alzado, unión Simón Vélez.</p>	<p><b>Descripción</b></p> <p>Propone una unión a tensión que consiste en trabajar la guadua a tensión atravesando una varilla de 1/2" por un cañuto, dicho cañuto se rellena posteriormente con mortero.</p>
 <p><b>FIGURA N° 5.</b> Planta, unión Simón Vélez.</p>	<p><b>Resistencia</b></p> <p>3000Kg por cada cañuto relleno de mortero en la unión del elemento a tensión<sup>5</sup>.</p>
 <p><b>FIGURA N° 6.</b> Falla esperada, unión Simón Vélez.</p>	<p><b>Observaciones</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ El mortero tiene poca adherencia con las paredes de la guadua.</li> <li>✓ La falla es inducida por el nudo y no porque se sobrepase la resistencia a tracción del material, especialmente las fibras longitudinales<sup>6</sup>.</li> <li>✓ La unión falla rompiendo el nudo y rasgando la guadua por el orificio de la varilla de 1/2".</li> </ul>

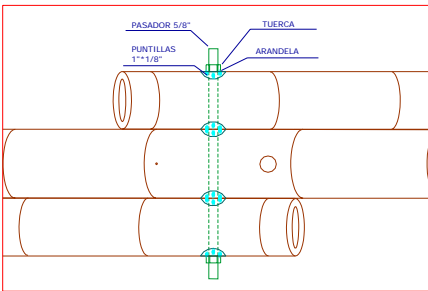
**TABLA N° 14.** Unión tipo Simón Vélez.

<sup>5</sup> - <sup>6</sup> GARZON CAICEDO, Jenny. Optimización de estructuras en guadua. Santa Fé de Bogotá, 1996. Trabajo de grado (Arquitectura). Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Artes. Departamento de construcción; p. 106.

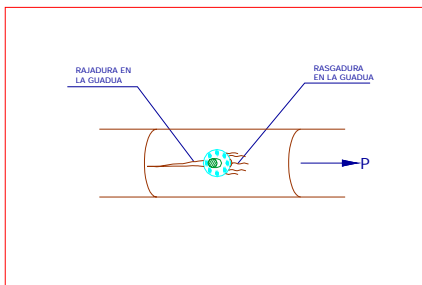
**TIPO: UNIÓN MECÁNICA<sup>7</sup>**



**FIGURA N° 7.** Alzado, unión mecánica.



**FIGURA N° 8.** Planta, unión mecánica.



**FIGURA N° 9.** Falla esperada, unión mecánica.

**Descripción**

Consiste en un sistema de conectores conformados por una lámina circular perforada a la que se le introduce un pasador de 1/2" y ocho puntillas de 1" de longitud y 1/8" de diámetro. Para introducir el pasador y las puntillas se pretaladra para evitar que la guadua se raje. Esta unión ensambla más rápidamente, a un costo bajo y es más liviana que la de Simón Vélez.

**Resistencia**

1000 kg por cada par de conectores instalados sobre la guadua a tensión.

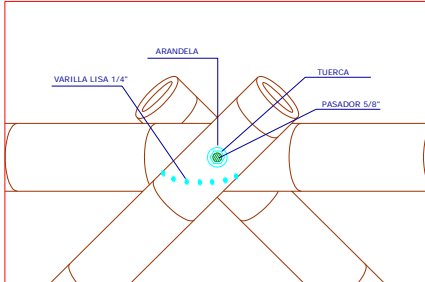
**Observaciones**

- ✓ La unión falla rasgando la guadua por el orificio de la varilla de 1/2" y las puntillas de 1".

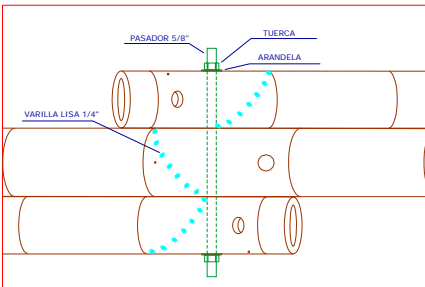
**TABLA N° 15.** Unión mecánica.

<sup>7</sup> PEÑA MUÑOZ, Cesar A. Y RODRÍGUEZ H., Hugo A.. Propuesta de uniones mecánicas para estructuras de guadua. Santafé de Bogotá, 1997. Trabajo de grado (Arquitecto). Universidad Nacional de Colombia. Departamento de construcción; p. 108.

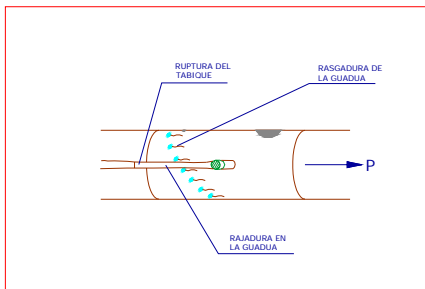
**TIPO: UNION CON MORTERO Y MADEROS O VARILLAS<sup>8</sup>**



**FIGURA N° 10.** Alzado, unión con mortero y maderos o varillas.



**FIGURA N° 11.** Planta, unión con mortero y maderos o varillas.



**FIGURA N° 12.** Falla esperada, unión con mortero y maderos o varillas.

**Descripción**

Consiste en tomar un cañuto de la probeta y pretaladrar 8 orificios de manera que no queden colineales ni verticalmente ni horizontalmente. Luego se introducen varillas lisas de 1/4" en cada orificio. Se taladran dos orificios de 5/8" para poder atravesar el pasador, que es una varilla roscada de 5/8" y otro orificio de 1 1/4" para introducir el mortero al interior del cañuto.

**Resistencia**

Se obtuvo una resistencia de 6565 kg en uniones a tensión.

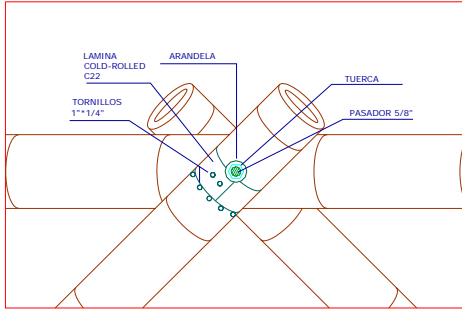
**Observaciones**

- ✓ Cuando el mortero falla, se abre empujando las paredes de la guadua hacia fuera, lo que acelera la falla de la guadua, porque se separa longitudinalmente.
- ✓ El número de varillas no es el principal determinante en la resistencia de la probeta.
- ✓ Es costosa con respecto a la unión mecánica, además es una unión pesada.

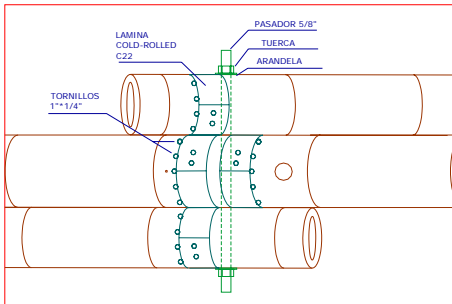
**TABLA N° 16.** Unión con mortero y maderos o varillas.

<sup>8</sup> ORTIZ CLAVIJO, Sandra C. y TRUJILLO CHEATLE Jorge D. Evaluación de uniones a tracción en guadua. Santa Fé de Bogotá, 2000. Trabajo de grado (Ingeniero). Universidad Nacional de Colombia.

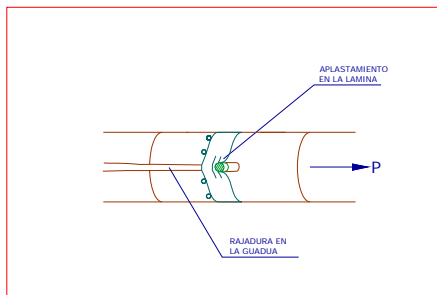
**TIPO: UNION CON ABRAZADERA<sup>9</sup>**



**FIGURA N° 13.** Alzado, unión con abrazadera.



**FIGURA N° 14.** Planta, unión con abrazadera.



**FIGURA N° 15.** Falla esperada, unión con abrazadera.

**Descripción**

Se taladran dos orificios de 5/8" para poder atravesar el pasador, que es una varilla roscada de 5/8". En el lado del pasador donde se va a inducir la falla se utiliza lámina collr-Rolled calibre 22 de 4cm de ancho, enrollándola en la guadua con cinco vueltas, y utilizando 12 tornillos ordinarios de 1" de largo por 1/4" de ancho de cabeza hexagonal en el lado opuesto al pasador, restringiendo el movimiento de la lamina.

**Resistencia**

Se obtuvo una resistencia de 10500 kg en uniones a tensión.

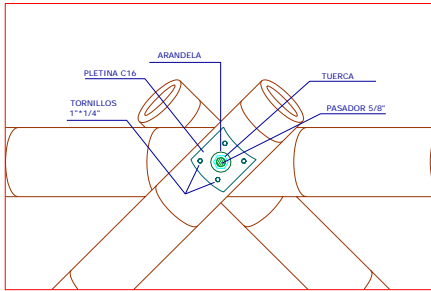
**Observaciones**

- ✓ La falla se da por rasgamiento de las paredes de la guadua a causa de los tornillos o por rajadura en la guadua por efecto del pasador.
- ✓ Es una unión relativamente liviana.

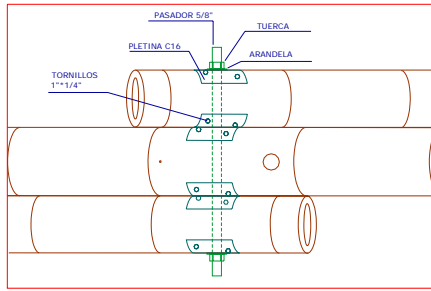
**TABLA N° 17.** Unión con abrazadera.

<sup>9</sup> ORTIZ, Op Cit.

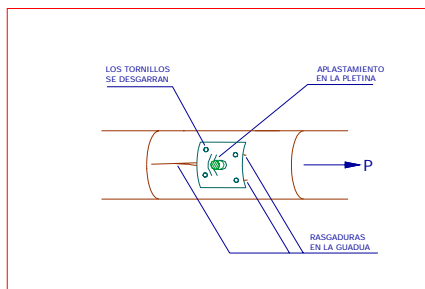
**TIPO: UNIÓN MECÁNICA MODIFICADA**



**FIGURA N° 16.** Alzado, unión mecánica modificada.



**FIGURA N° 17.** Planta, unión mecánica modificada.



**FIGURA N° 18.** Falla esperada, unión mecánica modificada.

**Descripción**

Consiste en un sistema de conectores conformados por una lámina rectangular calibre 16 perforada a la que se le introduce un pasador de 5/8" y cuatro tornillos ordinarios de 1" de largo por 1/4" de ancho de cabeza hexagonal. Para introducir el pasador y los tornillos se pretaladra para evitar que la guadua se raje. Esta unión ensambla rápidamente, a un costo bajo y es más liviana que la de Simón Vélez.

**Resistencia**

No conocida.

**Observaciones**

- ✓ La falla se da por rasgamiento de las paredes de la guadua.
- ✓ En el momento de falla los tornillos se desprenden.
- ✓ La pletina sufre aplastamiento.
- ✓ Es una unión relativamente liviana.

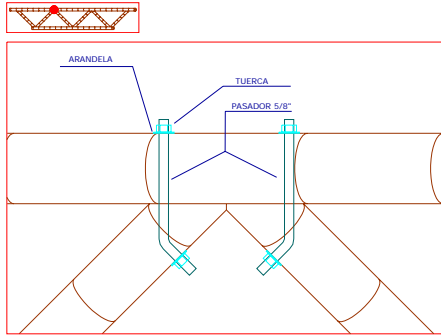
**TABLA N° 18.** Unión mecánica modificada.

## 2.2.2. Uniones Sin Excentricidad

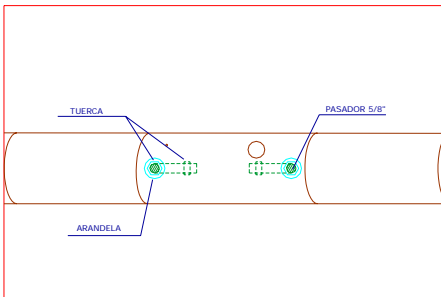
<b>TIPO: UNION CON PLETINAS</b>	
<p><b>FIGURA N° 19.</b> Alzado, unión con pletinas.</p>	<p><b>Descripción</b></p> <p>Es un sistema de transmisión de esfuerzos por medio de un par de pletinas metálicas calibre 12 perforadas para introducir un pasador de 5/8" por cada elemento de la armadura. Se confinan con mortero los cañutos afectados por el pasador.</p>
<p><b>Resistencia</b></p>	<p>No conocida.</p>
<p><b>FIGURA N° 20.</b> Planta, unión con pletinas.</p>	<p><b>Observaciones</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ La falla se da por rasgamiento de las paredes de la guada.</li> <li>✓ Es una unión pesada y costosa.</li> <li>✓ Requiere mayor trabajo en su elaboración.</li> <li>✓ No presenta excentricidad en los elementos que la conforman.</li> </ul>
<p><b>FIGURA N° 21.</b> Falla esperada, unión con pletinas.</p>	

**TABLA N° 19.** Unión con pletinas.

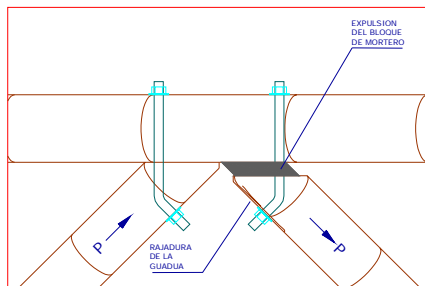
**TIPO: UNIÓN POR ANCLAJE**



**FIGURA N° 22.** Alzado, unión por anclaje.



**FIGURA N° 23.** Planta, unión por anclaje.



**FIGURA N° 24.** Falla esperada, unión por anclaje.

**Descripción**

Por medio de un pasador de 5/8" se sujetan dos elementos que forman un ángulo  $\alpha$  entre ellos. El pasador es doblado el mismo ángulo  $\alpha$  con el fin de atravesar perpendicularmente los elementos. Se confinan con mortero los cañutos afectados por el pasador.

**Resistencia**

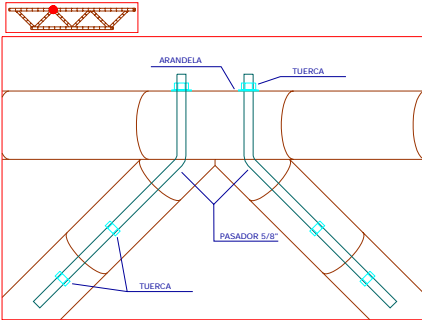
No conocida.

**Observaciones**

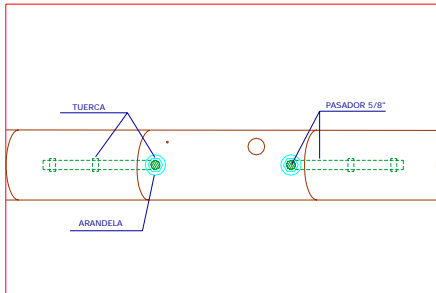
- ✓ La falla se da por rasgamiento de las paredes de la guadua.
- ✓ En el momento de falla, el bloque de mortero es expulsado del cañuto.
- ✓ Es una unión pesada.
- ✓ No presenta excentricidad en los elementos que la conforman.

**TABLA N° 20.** Unión por anclaje.

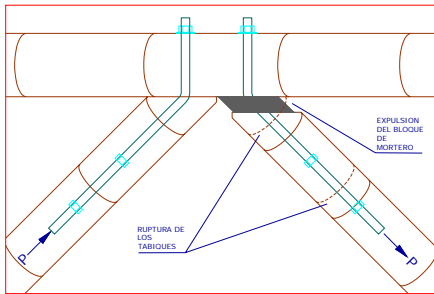
**TIPO: UNIÓN CON ANCLAJE AXIAL**



**FIGURA N° 25.** Alzado, unión por anclaje axial.



**FIGURA N° 26.** Planta, unión por anclaje axial.



**FIGURA N° 27.** Falla esperada, unión por anclaje axial.

**Descripción**

Por medio de un pasador de 5/8" se sujetan dos elementos que forman un ángulo  $\alpha$  entre ellos. El pasador es doblado el mismo ángulo  $\alpha$  con el fin de atravesar perpendicularmente uno de los elementos y permanecer embebida en mortero en el interior del otro. Se confina con mortero el cañuto afectados perpendicularmente por el pasador.

**Resistencia**

No conocida.

**Observaciones**

- ✓ La falla se da por rasgamiento de las paredes de la guadua.
- ✓ En la falla se presenta expulsión del bloque de mortero.
- ✓ Es una unión pesada.
- ✓ Para facilitar la construcción, se debe fundir el mortero en dos etapas.
- ✓ No presenta excentricidad en los elementos que la conforman.

**TABLA N° 21.** Unión por anclaje axial.

### 2.3. MÓDULO DE ELASTICIDAD

En el trabajo *Determinación de la resistencia a la compresión paralela a la fibra de la Guadua Castilla*<sup>10</sup>, se demostró que las propiedades mecánicas a compresión de la guadua, varían inversamente con el contenido de humedad por debajo del punto de saturación de la fibra y permanecen constantes por encima del mismo, siendo éste para todos los grupos de edades de la guadua (1 a 3 años, Grupo N° 1; 3 a 5 años, Grupo N° 2; mayores a 5 años, Grupo N° 3) de  $23.03 \pm 2.36\%$  de contenido de humedad. Con base en la teoría desarrollada para maderas propuesta por Motoi Ota<sup>11</sup>, en su trabajo sobre especies japonesas de Bambú, los autores encontraron relaciones entre el módulo de elasticidad a la compresión y la función del contenido de humedad de la guadua para cualquier grupo de edad en que esta clasificada.

Para el primer grupo de edad, el módulo de elasticidad a compresión ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ ), se calcula con la siguiente expresión, siempre y cuando el contenido de humedad sea menor que el punto de saturación de la fibra:

$$E = 151765 * 10^{-0.013043143 * \text{CH}\%}$$

En el caso que el contenido de humedad sea mayor al punto de saturación de la fibra, el módulo de elasticidad es:

$$E = 66125 \text{ kg}/\text{cm}^2$$

Las guaduas con edades entre los 3 y los 5 años, pertenecientes al grupo de edad número 2, tienen un módulo de elasticidad a compresión ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ ) relacionado con el contenido de humedad, siendo éste menor al punto de saturación de la fibra:

$$E = 262775 * 10^{-0.027908912 * \text{CH}\%}$$

Si el contenido de humedad del grupo de edad 2 es mayor que el punto de saturación de la fibra, el módulo de elasticidad a compresión es:

$$E = 67897 \text{ kg}/\text{cm}^2$$

Similarmente a los grupos anteriores, los autores encontraron para las guaduas mayores a 5 años, las siguientes relaciones:

$$E = 183202 * 10^{-0.021398072 * \text{CH}\%}$$

si el contenido de humedad es menor al punto de saturación de la fibra; en caso contrario, el módulo de elasticidad a compresión es:

---

<sup>10</sup> MARTÍN, José Virgilio y MATEUS, Lelio Rafael. *Determinación de la resistencia a compresión paralela a la fibra de la guadua de Castilla*. Bogotá 1981. Trabajo de grado (Ingeniero Agrícola). Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Agrícola.

<sup>11</sup> OTA, Motoi. *Studies on the Properties of Bamboo Stem. On the relation between compressive strength parallel to grain and moisture content of Bamboo splint*. Bulletin of Kyushu University Forest N° 22. 1953

$$E = 58333 \text{ kg/cm}^2$$

Para guaduas con contenido de humedad del 12%, los módulos de elasticidad a compresión referenciados por los autores se presentan en la Tabla N° 22, a continuación:

Edad de la Guadua	Módulo de Elasticidad (kg/cm <sup>2</sup> )
1 – 3 años	105804
3 – 5 años	121528
Mayores a 5 años	101427

**TABLA N° 22.** Módulo de elasticidad a compresión con contenido de humedad del 12%

Utilizando la teoría propuesta por *Motoi Ota*, Martín y Mateus encontraron también la relación entre el esfuerzo máximo a compresión de la guadua y el contenido de humedad para los 3 grupos de edades expuestos en la Tabla N° 23:

Grupo N°	$\sigma_{MAX}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	
	C.H.% < P.S.F.	C.H.% > P.S.F.
1	$\sigma_{MAX} = 742.31 * 10^{-0.013940543 * CH\%}$	322.36
2	$\sigma_{MAX} = 1255.65 * 10^{-0.02317557 * CH\%}$	415.03
3	$\sigma_{MAX} = 964.56 * 10^{-0.01959553 * CH\%}$	402.74

**TABLA N° 23.** Relación entre el esfuerzo máximo a compresión y el contenido de humedad<sup>12</sup>.

En su trabajo de grado los autores Sánchez y Prieto<sup>13</sup> determinaron el módulo de elasticidad de la guadua sometida a flexión (kg/cm<sup>2</sup>) relacionados con la luz libre, valores que se presenta en la Tabla N° 24:

Módulo de Elasticidad	Luz Libre	
	L < 1.50m	L > 1.50m
E <sub>MINIMO</sub>	30000	60000
E <sub>PROMEDIO</sub>	65000	115000

**TABLA N° 24.** Módulo de elasticidad a flexión en función de la luz libre.

De acuerdo con estos módulos de elasticidad determinados en el trabajo "*Comportamiento de la guadua angustifolia sometida a flexión*", los autores clasificaron

<sup>12</sup> MARTÍN, Op. Cit. Grafica 4.3.

<sup>13</sup> SANCHEZ, Jorge y PRIETO, Edwin. Comportamiento de la guadua angustifolia sometida a flexión. Bogotá 2000. Trabajo de grado (Ingeniero Civil). Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Civil.

la guadua Macana como perteneciente al grupo estructural C propuesto por el manual de diseño para maderas del grupo andino.

Los estudiantes de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional sede Bogotá, Maritza Uribe y Alejandro Duran<sup>14</sup>, determinaron una expresión para calcular el módulo de elasticidad con respecto al contenido de humedad, sin tener en cuenta la afección de las probetas con contenido de humedad mayor al punto de saturación de la fibra:

$$E = 146249.95 * e^{-0.044402 * CH\%}$$

Esta expresión fue la que se decidió utilizar para el desarrollo de este trabajo, debido a que las probetas utilizadas para determinar la expresión que rige el módulo de elasticidad, pertenecen al mismo lote de guadua utilizado para la elaboración de este proyecto.

---

<sup>14</sup> URIBE, Maritza y DURAN, Alejandro. Estudio de elementos solicitados a compresión armados con dos o mas guadas. Bogotá 2002. Trabajo de grado (Ingeniero Civil). Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería. Departamento de Ingeniería Civil.