

**CERCHAS PLANAS DE CULMOS DE GUADUA CON UNIONES DE
ABRAZADERAS METÁLICAS**



JUAN CARLOS OREJUELA HOYOS

Cód: 1226917

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL Y GEOMÁTICA
SANTIAGO DE CALI
agosto de 2018**

**CERCHAS PLANAS DE CULMOS DE GUADUA CON UNIONES DE
ABRAZADERAS METÁLICAS**

**PROYECTO DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE:
INGENIERO CIVIL**

**ESTUDIANTE:
JUAN CARLOS OREJUELA HOYOS
Cód: 1226917**

**DIRECTOR:
JOSE JAIME GARCÍA, Ph.D**



**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL Y GEOMÁTICA
GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN BIOMECÁNICA
15 de agosto de 2018**

Nota de aceptación

El presente trabajo de grado fue aprobado por el director del Programa Académico, los jurados y el tutor de la investigación.

MANOLO GALVÁN CEBALLOS, Ph.D.
Director de programa académico de
Pregrado en ingeniería civil.

Laura Villegas
Jurado

Hárold Cárdenas
Jurado

José Jaime García Álvarez, Ph.D.
Universidad del Valle
Director de trabajo de Grado

Santiago de Cali, agosto de 2018

Agradecimientos

Agradezco a Dios en primer lugar por darme fortaleza y voluntad

A mis padres y mi abuela por su paciencia y apoyo en este proceso de formación

A mi tutor por su guía y confianza en este proyecto

A mis compañeros de universidad por contribuir de una u otra forma para la
culminación de este proyecto

A mi novia por su constante apoyo y palabras de ánimo en la etapa final y más
difícil del proyecto.

A todos ellos, muchísimas gracias.

TABLA DE CONTENIDO

ÍNDICE DE FIGURAS Y GRÁFICOS	iv
ÍNDICE DE TABLAS	vii
RESUMEN	viii
1. PROBLEMA	9
1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	9
1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	11
1.3 JUSTIFICACIÓN	11
1.3.1 JUSTIFICACIÓN AMBIENTAL	11
1.3.2 JUSTIFICACIÓN CONSTRUCTIVA	13
1.3.3 JUSTIFICACIÓN SOCIAL	14
1.4 OBJETIVOS	15
1.4.1. OBJETIVO GENERAL	15
1.4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
2. MARCO DE REFERENCIA	16
2.1 MARCO TEÓRICO	16
2.1.1 GUADUA ANGUSTIFOLIA	16
2.1.1.1 PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS DE LA GA	17
2.1.2 ESTRUCTURAS TIPO CERCHA	17
2.2 ANTECEDENTES	18
2.2.1 PRUEBAS PARA USOS EN ESTRUCTURAS DE CUBIERTA	18
2.2.2 DISEÑO DE CONECTORES DE ACERO PARA ELEMENTOS DE BAMBÚ	19
2.3 ESTADO DE ARTE	22
2.3.1 UNIÓN TIPO SIMÓN VÉLEZ	22
2.3.2 UNIÓN PEÑA-RODRÍGUEZ	23
2.3.3 UNIÓN CLAVIJO-TRUJILLO	23
3. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL	25
3.1 FASE DE REVISIÓN Y DISEÑO	25
3.1.1 ANÁLISIS Y SELECCIÓN DE LOS PROTOTIPOS	25

3.1.1.1 ESTRUCTURA CON DIVISIONES CADA 1 m	26
3.1.1.2 ESTRUCTURA CON DIVISIONES CADA 1.5 m	26
3.1.1.3 ALTERNATIVA DIVISIONES CADA 1.5 m CERCHA PRATT	27
3.1.2 ANÁLISIS DE CARGAS	28
3.1.2.1 DIAGRAMAS Y RESULTADOS	29
3.1.3 DIMENSIONAMIENTO	29
3.2 FASE DE TALLER	30
3.2.1 PRODUCCIÓN DE PIEZAS	30
3.2.2 CONSTRUCCIÓN	32
3.3 FASE DE EJECUCIÓN	33
3.3.1 MONTAJE DE PRUEBAS	33
3.3.1.1 ESTIMACIÓN DE LA CARGA	34
3.3.1.2 INDICADORES DE DEFLEXIÓN	34
3.3.2 CARGA APLICADA	35
3.3.3 REALIZACIÓN DE LA PRUEBA	36
3.4 FASE DE ANÁLISIS	37
3.4.1 EXTRACCIÓN DE DATOS	37
3.4.2 ANÁLISIS DE DATOS	38
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	39
4.1 PRIMERA PRUEBA ESTRUCTURA DE 3 METROS	39
4.1.1 RESULTADOS DE DEFLEXIONES	39
4.1.2 DEFLEXIÓN DE LA ESTRUCTURA	40
4.2 SEGUNDA PRUEBA ESTRUCTURA DE 3 METROS	42
4.2.1 RESULTADOS	42
4.2.3 RIGIDEZ DE LA CERCHA	44
4.2.4 RESULTADOS TEÓRICOS	44
4.3 PRIMERA PRUEBA DE PROTOTIPO DE 6 METROS	45
4.3.1 RESULTADOS	46
4.4 SEGUNDA PRUEBA PROTOTIPO DE 6 METROS	47
4.4.1 RESULTADOS	48
4.4.2 MODELAMIENTO Y RESULTADOS TEÓRICOS	50

4.5 PROPUESTA DE USO	52
4.5.1 USO EN CUBIERTAS	54
4.5.2 USO EN ENTREPISOS	55
4.5.3 USO COMO PUENTES EN ZONAS RURALES	56
4.5.3.1 CONSIDERACIONES	57
4.5.3.2 RESULTADOS.....	57
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	59
5.1 CONCLUSIONES DE LA INVESTIGACIÓN.....	59
5.2 RECOMENDACIONES	60
6. BIBLIOGRAFÍA	62

ÍNDICE DE FIGURAS Y GRÁFICOS

Figura 1-1 Detalle de desgarramiento en elemento de guadua causado por concentración de esfuerzos en los orificios de los pernos. (Takeuchi, 2004)	10
Figura 1-2 Uniones de guadua recomendadas por el título G.12 de la norma de sismo resistencia colombiana. Tomado de: NSR-10 (2010)	10
Figura 1-3 Ejemplo de cadena productiva de la construcción. Emisiones de gases de efecto invernadero más representativas en cada fase.....	12
Figura 2-1 Conformación del tallo de guadua. (Reyes & Ramos, 2002)	16
Figura 2-2 Orientación de los ejes dentro de un culmo de guadua. (López & Correal, 2009)	17
Figura 2-3 Prototipo de cercha con latas de guadua para el ensayo. (Villegas, Morán, & García, 2015).....	19
Figura 2-4 Conexiones de guadua angustifolia típicas. De izquierda a derecha: a. ECM3; b. Simón Vélez (SV); c. Alambres (SVW). (Morán, Benítez, Silva, & García, 2016).....	20
Figura 2-5 Propuestas. A. Conexión de abrazaderas, B. Conexión de cartelas (Morán, Benítez, Silva, & García, 2016).....	21
Figura 2-6 Detalle unión propuesta por el arquitecto Simón Vélez. (NTC 5407, 2006).....	22
Figura 2-7 Unión tipo Simón Vélez con platinas laterales. (NTC 5407, 2006).....	23
Figura 2-8 Unión tipo Peña-Rodríguez (Universidad Nacional de Colombia, 1997)	23
Figura 2-9 Unión con abrazadera tipo Clavijo-Trujillo (Clavijo & Trujillo, 2000).....	24
Figura 2-10 Unión con mortero Clavijo-Trujillo (Clavijo & Trujillo, 2000)	24
Figura 3-1 Modelo de cercha tipo Warren con módulos cada 1 m (W1m).	26
Figura 3-2 Cargas axiales del modelo W1m. (Unidades de carga en toneladas)..	26
Figura 3-3 Cercha tipo Warren con modulación a 1.5 m (W15m). (Unidades de carga en toneladas)	26
Figura 3-4 Cargas axiales del modelo W15m. (Unidades de carga en toneladas)	27
Figura 3-5 Cargas axiales de los elementos de la alternativa Pratt con modulación a 1.5 m. (Unidades de carga en toneladas).	27
Figura 3-6 Diagrama de cuerpo libre de la estructura. Esquema de aplicación de carga.....	28
Figura 3-7 Diagrama de fuerzas axiales de la cercha causada por la acción de las cargas aplicada P.	29
Figura 3-8 Vista en alzada del prototipo de guadua. (Dimensiones en centímetros)	29
Figura 3-9 Detalle nodo central de la cuerda inferior. Consta de dos pares de abrazaderas, dos platinas tipo U y dos tipo V a cada lado.....	30

Figura 3-10 Detalle de unión con doble abrazadera, para detener el desplazamiento causado por la deflexión de la estructura.	31
Figura 3-11 Platinas utilizadas para la unión de los culmos y latas de guadua de la estructura. a. Platina "U", b. Platina "J", c. Platina "V".	32
Figura 3-12 Primer prototipo de cercha construida.	32
Figura 3-13 Esquema montaje de pruebas (Vista en planta)	33
Figura 3-14 Montaje de brazo, compuesto por dos perfiles metálicos, para la prueba y carga de los prototipos de estructura en guadua. W es el peso de los ángulos, P la reacción en el nodo y q_0 el peso de la carga aplicada.	34
Figura 3-15 Ubicación y posición (Respecto a la estructura) de los cuatro deformímetros utilizados durante las pruebas.	35
Figura 3-16 Canastillas ubicadas en cada brazo y listas para el inicio de la prueba.	35
Figura 3-17 Primera cercha de guadua durante la prueba, en el séptimo escalón de carga.	36
Figura 3-18 Falla de aplastamiento de la sección de la cuerda superior debido al deslizamiento del nodo inferior del elemento vertical.	36
Figura 3-19 Falla de la estructura en la unión. Deslizamiento de la abrazadera tras la aplicación de la carga.	37
Figura 3-20 Foto del indicador 2 de la estructura durante la fase de prueba experimental.	37
Figura 4-1 Primera cercha probada, elemento de la izquierda (resaltado en el óvalo) desviado debido al deslizamiento de la unión con la cuerda inferior.	40
Figura 4-2 Línea de deflexión de la estructura según el respectivo escalón de carga. Carga en Newtons y deflexión en milímetros.	41
Figura 4-3 Laceración causada sobre la cuerda superior de la estructura debido al deslizamiento de la abrazadera inferior.	41
Figura 4-4 Curvas de deflexión experimentada por la cuerda superior de la estructura.	43
Figura 4-5 Curvas de carga vs deflexión de la estructura.	43
Figura 4-6 Comparación de las curvas carga vs. Deflexión de la prueba teórica y la experimental.	44
Figura 4-7 Estructura en guadua ubicada y trabajando durante prueba de carga.	46
Figura 4-8 Deslizamiento de la abrazadera de la conexión de la diagonal.	46
Figura 4-9 Curva carga vs. Deflexión para la prueba número 3.	47
Figura 4-10 Detalle abrazadera fijada con tornillo autopercutor. Circulo rojo. (Valencia Hernández, 2018)	48
Figura 4-11 Curva de carga y deflexión para todos los indicadores durante la prueba no. 4.	49
Figura 4-12 Detalle llegada de diagonal al nodo, e representa la excentricidad, esquemática.	50

Figura 4-13 Gráficas de resultados tras consideraciones en la calibración.	51
Figura 4-14 Detalle conexión tipo 2 (Cercha de 6 metros)	52
Figura 4-15 Vista en tres dimensiones de la modelación del puente en guadua con luz de 6 m.	57

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1 Cuadro comparativo construcción convencional vs. Construcción con bambú guadua. (Hammond & Jones, 2011)	13
Tabla 2-1 Especificaciones identificadas para comparación durante la investigación. (Morán, Benítez, Silva, & García, 2016)	21
Tabla 4-1 Lectura de los cuatro indicadores sobre la cuerda superior en la primera prueba.....	40
Tabla 4-2 Resumen de todos los valores de carga y deflexión obtenida para todos los indicadores.	42
Tabla 4-3 Resultados de carga vs. deflexión para la prueba de la estructura con tornillos drywall.	49
Tabla 4-4 Límites de deflexión para cargas de servicio para elementos contruidos con GA y con una longitud entre apoyos de 3000 mm. (NSR10, Min. ambiente, vivienda y desarrollo territorial, 2010)	53
Tabla 4-5 Pesos de elementos no estructurares más utilizados, para cubiertas y entrespisos.	54
Tabla 4-6 Chequeo de carga de uso para cubierta.	54
Tabla 4-7 Chequeo de carga para estructuras de entrespiso según sus usos.....	55

RESUMEN

La guadua es uno de los materiales naturales más utilizados en la construcción. Tiene excelentes propiedades mecánicas que se complementan con baja densidad y costo. En Colombia la guadua ha sido tradicionalmente utilizada para la construcción de viviendas pequeñas y estructuras temporales. Después del sismo de Armenia la guadua fue redescubierta, el desastre permitió vislumbrar la efectividad de la guadua ante fuerzas sísmicas. Con esto empezó un nuevo auge para el acero vegetal, como se le conoce.

Uno de los retos en la construcción con guadua es el diseño de las uniones, en las que se suelen causar fallas por aplastamiento y fisuras longitudinales, ya que los elementos utilizados para fijar los culmos tienden a rasgarlos. Esto reduce la capacidad de transmitir fuerzas y la estabilidad de la estructura. Muchas alternativas razonablemente buenas se han propuesto, con el uso de pasadores metálicos que atraviesan el material y la inyección de mortero para mejorar la resistencia transversal. No obstante, estas uniones tradicionales suelen causar fallas frágiles y no se prestan para construir elementos prefabricados.

En esta investigación se analizó el comportamiento de cerchas de culmos de guadua unidos mediante uniones compuestas por abrazaderas metálicas, diferentes a las usadas tradicionalmente. En los prototipos desarrollados se aplicaron las cargas sobre los nodos de la cuerda superior y se midieron las deflexiones y rigidez para conocer el rango de aplicación de las cerchas. Así mismo, se calibró un modelo teórico en el cual se modificó la rigidez de las uniones.

Este sistema con unión de abrazaderas mostró gran potencial y versatilidad para ser usado en la construcción. En una prueba típica, un prototipo de 3 m de longitud tuvo una deflexión máxima de alrededor de 5 cm y no mostró falla ante una carga de 2579 kg. Sin embargo, se encontró que es necesario aumentar la rigidez de las uniones para aprovechar mejor el material.

Se realizó una comparación teniendo en cuenta la capacidad y las deflexiones obtenidas durante las pruebas para proponer recomendaciones y usos de las cerchas con base en la norma colombiana.

Palabras clave: Guadua, Uniones, Abrazaderas, Cerchas, Construcción

1. PROBLEMA

Problema

Las uniones tradicionales más utilizadas actualmente en estructuras de guadua se caracterizan por tener poca eficiencia mecánica, demandar mucho tiempo de construcción y porque suelen agregar peso extra que actúa como lastre en la estructura.

1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Dentro de la industria de la construcción, hay factores que juegan papeles determinantes en el momento de tomar decisiones, tales como el costo, el peso y la apariencia son muy importantes para escoger un material o un sistema constructivo dentro de una obra y la guadua, es un material natural que cumple con varias de estas ventajas que le dan un potencial para ser atractiva dentro de la construcción de vivienda, principalmente.

Este material al ser sometido a los procesos de cuidado necesarios puede hacer frente a diferentes configuraciones de carga sin presentar mayores problemas. Las investigaciones sobre las propiedades estructurales de la guadua han demostrado excelentes resultados sobre su resistencia y ductilidad bajo ciertas condiciones de carga (Orozco, Villegas, & García, 2014).

La guadua está conformada por fibras longitudinales muy fuertes con una alta resistencia a tracción en dirección paralela a ellas. Al realizar un corte transversal al tallo de guadua se evidencia la estructura circular hueca de los culmos, que le brinda una gran inercia de área generando una excelente resistencia a compresión paralela a las fibras (Takeuchi, 2004). Sin embargo, la *Guadua angustifolia* presenta un comportamiento anisótropo, típico de los materiales vegetales, por lo que su resistencia a tracción y compresión circunferencial es considerablemente más baja que la longitudinal y recurrentemente presenta fallas en el plano de las fibras (Figura 1-1).

En lo que respecta al diseño, la construcción y el uso de estructuras de guadua, las uniones juegan un papel muy importante en la estabilidad y consecuentemente la vida útil y funcionalidad. Las conexiones tradicionales suelen ser puntos críticos de la estructura, ya que están sometidas a estados de esfuerzo en diferentes planos, que incluyen cortante, tracción y compresión circunferencial que causan fallas prematuras que impiden que los elementos desarrollen la alta resistencia longitudinal por la que son reconocidos.



Figura 1-1 Detalle de desgarramiento en elemento de guadua causado por concentración de esfuerzos en los orificios de los pernos. (Takeuchi, 2004)

En Colombia, la norma de sismo resistencia (NSR-10) en su título G ha avalado uniones de guadua que requieren de cortes especiales previos (Figura 1-2). Algunos de estos cortes pueden llegar a ser dispendiosos y presentar errores si no se tienen los debidos cuidados.

G.12.11.1.1 — En ningún caso se permitirán uniones clavadas, ya que los clavos inducen grietas longitudinales debido a la disposición de las fibras de la guadua.
G.12.11.2 — TIPOS DE CORTES, Corte recto, corte boca de pescado y corte pico de flauta

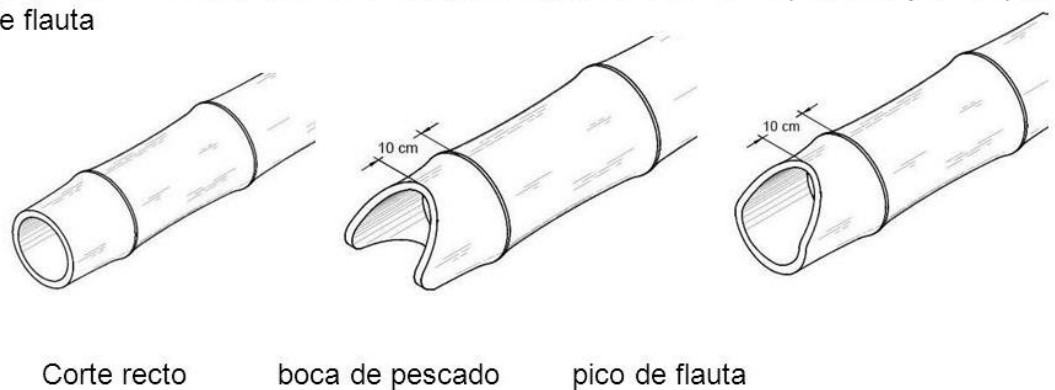


Figura 1-2 Uniones de guadua recomendadas por el título G.12 de la norma de sismo resistencia colombiana. Tomado de: NSR-10 (2010)

Investigaciones del Grupo de Biomecánica han mostrado que la guadua se comporta como un material dúctil cuando se somete a compresión en la dirección del espesor de la sección (Orozco, Villegas, & García, 2014). Esta condición aún no ha sido aprovechada para desarrollar uniones de culmos de la *Guadua*

angustifolia, pero ya se encuentra caracterizada en investigaciones anteriores del grupo de biomecánica (Benítez, 2017).

Esta investigación buscó cuantificar y cualificar el comportamiento mecánico de las cerchas planas compuestas de culmos de guadua unidos gracias a abrazaderas metálicas, permitiendo un ajuste para los elementos sin la necesidad de perforar el material para no perjudicar la integridad estructural de la guadua.

1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

¿Cómo se comportan las cerchas planas de culmos de *Guadua angustifolia* unidos mediante sistemas de abrazaderas metálicas para reducir las fallas por desgarramiento de las uniones tradicionales?

1.3 JUSTIFICACIÓN

1.3.1 JUSTIFICACIÓN AMBIENTAL

En Colombia, el sector de la construcción ha tomado un papel protagónico y envidiable en el desarrollo económico del país, según el DANE para el primer semestre del año 2014 la actividad económica con mayor crecimiento e influencia dentro del P.I.B. fue la construcción, con un crecimiento mayor al 10% (Diario EL PAÍS, 2014).

Desde una perspectiva económica el panorama es bastante alentador, pero por otro lado, ambientalmente ese crecimiento es preocupante pues las industrias del sector de la construcción se encuentran ubicadas entre las que emiten la mayor cantidad de gases (39%) y elementos contaminantes como residuos sólidos (30%) para el medio ambiente (GrowingBuildings, 2015). Las emisiones contaminantes de las industrias del sector de la construcción abarcan desde la producción y explotación de los materiales para la construcción, pasando por la ejecución de los procesos constructivos, entrega y uso del proyecto (Figura 1-3).

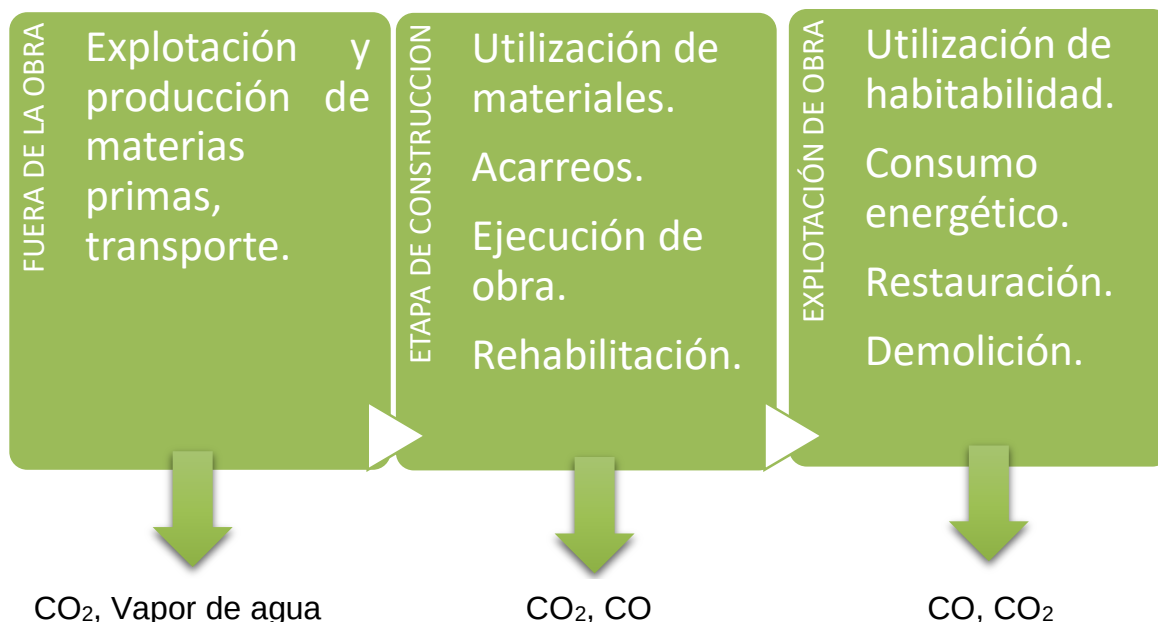


Figura 1-3 Ejemplo de cadena productiva de la construcción. Emisiones de gases de efecto invernadero más representativas en cada fase.

Actualmente los materiales con mayor demanda en la construcción son el acero y el concreto (cemento, arena, grava, agua y aditivos químicos en algunos casos). La gran mayoría de las construcciones en la actualidad utilizan estos materiales como insumo principal para la conformación de los elementos del sistema estructural y de igual forma para la construcción de elementos no estructurales.

La demanda de estos materiales representa, además de las emisiones comentadas previamente, altos consumos energéticos, debido en gran medida a las altas temperaturas alcanzadas durante el proceso de producción y la gran cantidad de agua consumida durante la transformación y producción del material. Pese a que esta situación ya ha sido identificada, no es fácil encontrar materiales que sustituyan totalmente a los materiales tradicionales en la construcción.

Una alternativa viable para reducir el uso de materiales convencionales, es la utilización paulatina de materiales más amigables con el medio ambiente, materiales renovables, que entren a ser en primer medida un complemento, bien sea, directo o indirecto de los materiales típicos.

La *Guadua angustifolia* goza de un sobresaliente comportamiento mecánico y una gran capacidad para captar las emisiones de CO₂, dañinas para la capa de ozono, esto sumado a que es un recurso natural renovable se convierte en una opción excelente para utilizar en la construcción. Un estudio liderado por CENICAFÉ determinó, para la *Guadua angustifolia*, la capacidad de captación de

54 toneladas de dióxido de carbono por hectárea en 6 años a partir de siembra nueva (Villegas M. , 2005) es decir, alrededor de 9 toneladas por hectárea en un año. Por otro lado, la construcción con guadua puede reducir hasta en un 68.6% las emisiones de CO₂ (Tabla 1-1) con respecto a la construcción convencional, durante la fase constructiva.

Tabla 1-1 Cuadro comparativo construcción convencional vs. Construcción con bambú guadua. (Hammond & Jones, 2011)

Emisiones de CO ₂ para una vivienda de 100 m ²	Emisiones CO ₂ construcción [Ton]	Emisiones CO ₂ vida útil (50 años) [Ton]	Total emisiones CO ₂ [Ton]
Cons. Convencional	83.9	134.5	218.4
Cons. Con guadua	26.3	127.9	154.2
Ahorro de emisiones [Ton]	57.6	6.6	64.2
Ahorro de emisiones %	68.6%	5%	29%

De igual forma se lograrían reducciones en los consumos de energía en las fases de explotación de material, transformación de la materia prima y construcción de la obra.

1.3.2 JUSTIFICACIÓN CONSTRUCTIVA

Las alternativas para uniones utilizadas actualmente presentan marcadas falencias que son contraproducentes a las bondades del material. En primer lugar, encontramos que las uniones tradicionales, con alambre y clavos, muy usadas en la construcción tradicional son inseguras, pues son incapaces de garantizar la estabilidad total de la estructura ante grandes solicitaciones. Además, las uniones más técnicas, avaladas por la NSR-10 de Colombia son dispendiosas y suelen presentar fallas frágiles por desgarramiento debido a la concentración de esfuerzos causada por la acción de aplastamiento sobre los pernos.

Uniones normalizadas proponen eliminar esta debilidad de la guadua llenando las secciones pernadas con un mortero de cemento (NTC 5407, ICONTEC, 2006). Si bien esta alternativa logra evitar los problemas de desgarramiento ya mencionados adiciona a la estructura cargas de lastre debido al peso propio, perdiendo una de las bondades más atractivas de la guadua, su bajo peso por

elemento. Entonces se hace necesario considerar alternativas de uniones como las basadas en abrazaderas metálicas.

En primer lugar, las abrazaderas actúan confinando el elemento, contribuyendo de esta manera a evitar colapsos por aplastamiento en las paredes del material, permitiendo también utilizar elementos ligeramente agrietados contribuyendo así a la optimización del material. También la ubicación de las abrazaderas no es intrusiva en el elemento, por lo que se elimina el riesgo de desgarramiento causado por los pernos y el peso añadido es mucho menor al del mortero que ya se utiliza para dar resistencia a algunos tipos de uniones peroadas. Finalmente, la instalación de las abrazaderas y su ubicación sobre el elemento son procedimientos sencillos.

Por esto la propuesta de unión con abrazaderas metálicas tiene gran potencial para suplir y corregir los aspectos constructivos y procedimentales donde las demás alternativas de unión, ampliamente utilizadas, suelen presentar carencias.

1.3.3 JUSTIFICACIÓN SOCIAL

Es una realidad que Colombia, tradicionalmente, ha sido un país ligado ampliamente con el sector rural, según datos del banco mundial más del 23,5% (BANCO MUNDIAL, 2015) de la población colombiana habita en el campo, es decir más de 11,3 millones de colombianos habitan las zonas rurales de Colombia.

Pese a la importancia que tiene el campo colombiano en diversos aspectos de la cotidianidad del país, la población rural experimenta grandes dificultades de circulación debido al marcado atraso de los caminos rurales, donde la gran mayoría son caminos de herradura y trochas que han sido trazados por el tránsito repetitivo de animales y labriegos; el problema se agrava cuando se evidencia la falta de infraestructura para evitar los constantes accidentes geográficos causados por el relieve y la hidrografía del país.

La simplicidad y la accesibilidad que representa la construcción con guadua utilizando el sistema de unión con abrazaderas metálicas, se presenta como una alternativa para la construcción e implementación de puentes livianos y, además, de bajo coste, que permitirían a la población rural saltar los obstáculos geográficos que puedan encontrarse, facilitando de esta forma el tránsito de personas, animales y mercancía dentro de las zonas rurales, contribuyendo a mejorar las condiciones de vida de esta población, además de contribuir la mejora y eficiencia de la productividad del campo colombiano.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1. OBJETIVO GENERAL

- Desarrollar cerchas planas de culmos de guadua unidos con abrazaderas metálicas para probar su comportamiento ante carga vertical y el desempeño de sus uniones ante carga axial.

1.4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Diseñar las uniones con abrazaderas metálicas para cerchas planas típicas de culmos de guadua.
- Caracterizar el comportamiento mecánico de modelos a escala mediante pruebas experimentales.
- Ajustar modelos teóricos para predecir el comportamiento mecánico de este tipo de cerchas.
- Realizar análisis comparativos de los resultados teóricos y experimentales con las normas de construcción vigentes en Colombia, sobre las ventajas y desventajas del sistema.
- Concluir sobre el análisis de resultados realizados y recomendar soluciones, investigaciones complementarias y usos más favorables para las estructuras.

2. MARCO DE REFERENCIA

2.1 MARCO TEÓRICO

2.1.1 GUADUA ANGUSTIFOLIA

Conocida técnicamente como *Guadua angustifolia* Kunth (de ahora en adelante GA), es una planta del tipo gramínea gigante nativa de las zonas intertropicales de América, con alta presencia en el centro y sur del continente. Esta especie ha sido catalogada como uno de los mejores bambúes del mundo, esto gracias a sus sobresalientes propiedades físico-mecánicas, aspectos que también le han permitido gozar de un papel importante en el desarrollo de algunas regiones de Colombia como el eje cafetero después del sismo de Armenia en 1999 (Redacción El Tiempo, 2000).

La GA alcanza su altura definitiva a los 6-7 meses de emerger el renuevo reportando incrementos hasta de 21 cm/día y logrando la madurez del culmo entre los 4-6 años de edad (Londoño 1992). Debido a la morfología ahusada del culmo, el diámetro y el espesor de la pared decrecen desde la porción basal hacia la porción apical, mientras que la longitud de los entrenudos se incrementa. El tallo tiene un diámetro exterior entre 80 y 160 mm y un espesor variable entre 8 y 15 mm; los entrenudos una longitud promedio de 20 cm a 35 cm (Ghavami & Marinho, 2005).

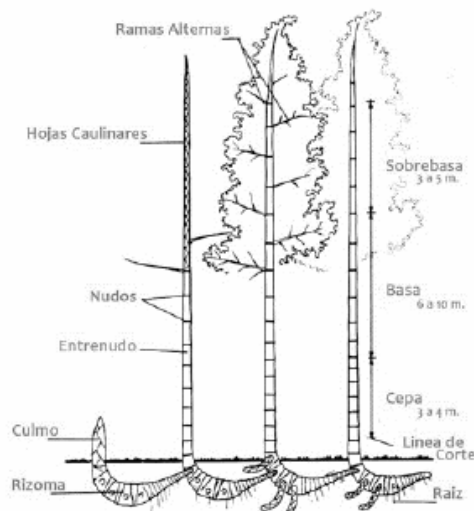


Figura 2-1 Conformación del tallo de guadua. (Reyes & Ramos, 2002)

Su excelente comportamiento, versatilidad y costo han permitido que sea utilizada en diferentes labores y en distintas disciplinas, las cuales abarcan desde la construcción hasta la decoración y las artesanías.

2.1.1.1 PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS DE LA GA

Diferentes investigaciones concuerdan en que los bambúes ven influenciado su comportamiento mecánico por el porcentaje de fibras, el porcentaje de los tejidos conductivos y el porcentaje de parénquima (Londoño, 2002) y (Liese, 1998)

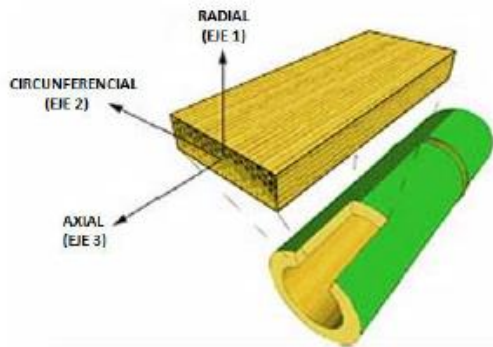


Figura 2-2 Orientación de los ejes dentro de un culmo de guadua. (López & Correal, 2009)

En ensayos de latas de guadua de la pared externa sin nudos, se encontró una resistencia a la tracción promedio de 251 MPa, en fibra externa con nudo de 162 MPa, en la pared completa sin nudo de 153 MPa y en pared completa con nudo de 86 MPa (Carvajal, Ortigón, & Romero, 1981).

Por otro lado, la resistencia a la compresión paralela a las fibras es menor que la resistencia a la tracción de la guadua aun considerando la pared completa y con nudo. En diferentes estudios se ha encontrado resistencias desde 65 MPa, para una humedad del 12% y una edad comprendida entre 3 y 5 años (Martín & Mateus, 1981).

También la resistencia a la compresión perpendicular a las fibras (aplastamiento) es muy baja, Martínez Cáceres encontró valores de esfuerzos últimos en guadua macana de apenas 2.3 MPa.

2.1.2 ESTRUCTURAS TIPO CERCHA

La principal característica de las cerchas es que su estructura se constituye a totalidad de elementos de dos fuerzas, es decir, sus componentes solo se ven

solicitados por cargas axiales, pero para que esto suceda se debe garantizar que las cargas sean aplicadas únicamente sobre los nodos.

Las cerchas por su comportamiento, funcionamiento y su bajo peso son utilizadas generalmente para el ensamblaje de estructuras de cubierta o entrepisos livianos, de igual forma se utilizan en puentes como estructura de soporte para el tablero y son apoyadas generalmente en estribos de concreto armado.

2.2 ANTECEDENTES

En Colombia la doctora *Caori Patricia Takeuchi*, profesora de la Universidad Nacional ha realizado numerosas investigaciones sobre la GA. En un estudio sobre las uniones (Takeuchi, 2004) se expone el comportamiento estructural de la guadua y se identifican: su alta resistencia a tracción en la dirección longitudinal y a la torsión, como también su baja resistencia en los planos de la fibras, lo que hace a la guadua vulnerable a esfuerzos como cortante y tracción circunferencial. Además el documento registra el comportamiento mecánico de algunas de las conexiones más utilizadas para la construcción y muestra el tipo de falla que se presenta en cada una.

La Universidad del Valle y la Pontificia Universidad Católica de Rio de Janeiro investigaron sobre las propiedades del bambú (García, Rangel, & Ghavami, 2012). En el documento se determinan las constantes elásticas de la GA por medio de anillos de culmos debido a la dificultad para llevar a cabo pruebas uniaxiales circunferenciales o radiales de manera correcta. Se identifican los valores de la razón de Poisson (0.43, 0.14 y 0.12) para la parte superior, media e inferior del culmo respectivamente; un módulo de Young igual a 398 MPa y un módulo elástico cortante igual a 581 MPa.

Las conclusiones de este documento son relevantes para esta investigación puesto que las abrazaderas que se proponen como una alternativa de unión entre elementos tienen una gran influencia en la dirección radial del culmo.

2.2.1 PRUEBAS PARA USOS EN ESTRUCTURAS DE CUBIERTA

El grupo de biomecánica de la universidad del Valle propuso una estructura para soporte de cubiertas utilizando cerchas con latas de GA. Partiendo de conocer de investigaciones previas que la GA tiene un comportamiento dúctil ante cargas de compresión a lo largo del espesor de la pared del culmo (Orozco, Villegas, & García, 2014) se desarrolló una unión pernada entre dos latas de GA.

La unión se logró perforando las latas cercanas a los extremos y ubicándolas juntas enfrentando las caras internas de cada una de las latas y aplicando compresión radial mediante un perno y dos platinas curvas actuando como confinamiento. El estudio demostró que la unión propuesta tenía más resistencia que las uniones sin compresión radial.

Un prototipo de cercha tipo Warren de 3 m de longitud y 310 N de peso (Figura 2-3) unido con las uniones propuestas que fue sometido a una carga distribuida equivalente a 4080 N/m presentó deflexiones elásticas máximas de 12.5 mm y completa integridad en las uniones y asimismo de los elementos sometidos a compresión (Villegas, Morán, & García, 2015).

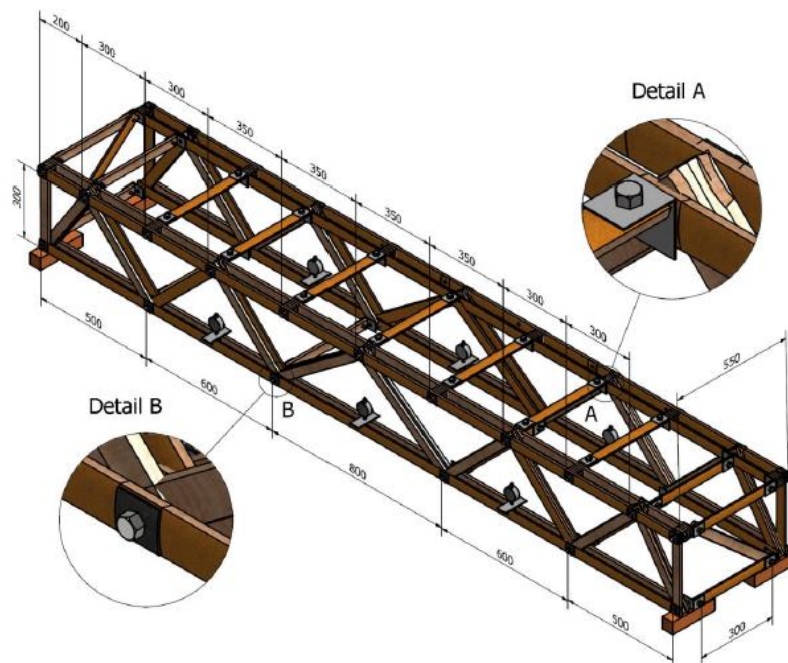


Figura 2-3 Prototipo de cercha con latas de guadua para el ensayo. (Villegas, Morán, & García, 2015)

2.2.2 DISEÑO DE CONECTORES DE ACERO PARA ELEMENTOS DE BAMBÚ

El uso de elementos de acero para uniones en estructuras de bambú guadua no es nada nuevo, pues se encuentran diversos autores que basan sus investigaciones en el desempeño de uniones, combinando elementos metálicos como pernos, tornillos, alambres y barras.

Sin embargo, muchas de esas conexiones no tienen aplicación o funcionalidad en la práctica, por su alta flexibilidad, complejidad o costo de construcción.

En 2016, Morán realiza comparaciones de conexiones para elementos de guadua y escogió como referencia tres conexiones típicas ampliamente usadas para estructuras de GA (Figura 2-4) que están basadas en cortes tipo boca de pescado (Figura 1-2), mortero de relleno, y barras roscadas; estas conexiones fueron utilizadas como referencia de comparación. Estas conexiones fueron identificadas previamente por Camacho (Camacho & Páez, 2002) como: ECM3, SV (Simón Vélez) y conexión con alambres (SVW).

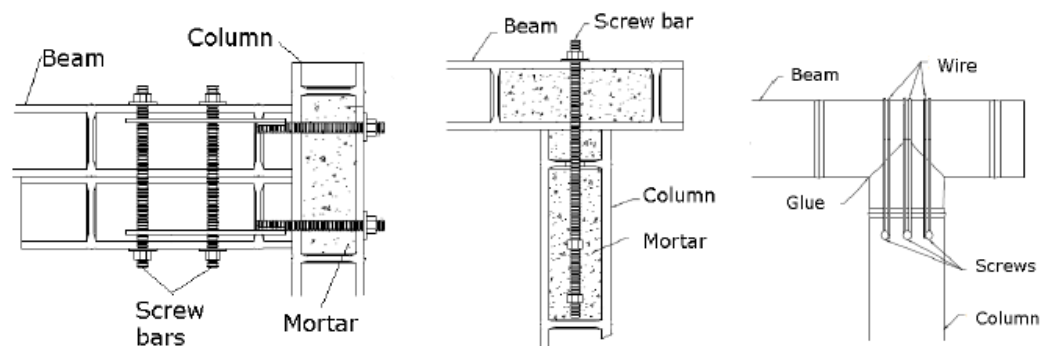


Figura 2-4 Conexiones de *guadua angustifolia* típicas. De izquierda a derecha: a. ECM3; b. Simón Vélez (SV); c. Alambres (SVW). (Morán, Benítez, Silva, & García, 2016)

Durante esta investigación se probaron dos propuestas de conectores para cubrir las necesidades y especificaciones que fueron identificadas y definidas previamente (Tabla 2-1).

En la primera conexión (Figura 2-5A), se encuentran abrazaderas de 3.175-mm de espesor (1/8") y 25.4-mm de ancho (1") que fueron utilizadas para transferir las cargas desde un elemento a otro. Como las abrazaderas aplican compresión radial en la superficie de los culmos de GA, fue posible evitar la falla típica por separación y colapso de las fibras longitudinales.

En la segunda conexión (Figura 2-5B), cada una de las cartelas lograron ser ubicadas fácilmente y fijadas a las paredes de los culmos de GA mediante el uso de pernos de 9.5-mm (3/8") de diámetro y 25-mm de longitud.

Tabla 2-1 Especificaciones identificadas para comparación durante la investigación. (Morán, Benítez, Silva, & García, 2016)

		Cost (COP)	Weight (Kg)	Elastic moment resistance (N.m)	Moment stiffness (N/mm)	Ductility (RD)	Assembly operations (Steps)
Competitor products	SV	19888	8.35	100	9.5	7	9
	SV W	10863	0.75	100	5.87	13	13
	ECM3	56130	5.2	800	36.5	3.2	20
Specifications	Target values (Delighted)	35000	2.5	1000	25	6	10
	Threshold values (Disgusted)	60000	5.2	500	10	3	28

Alrededor de los orificios y en los laterales de las paredes de los culmos, se usaron arandelas curvas de acero, las cuales tenían el objetivo de confinar el material y prevenir el agrietamiento una vez los pernos fueron ajustados.

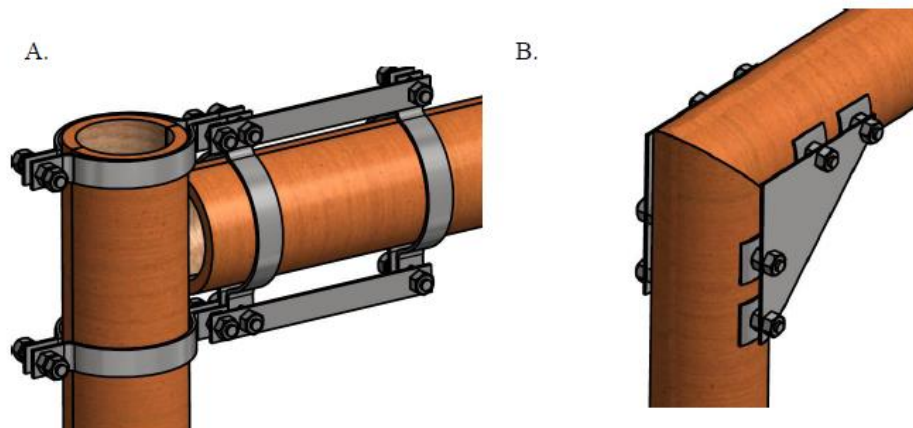


Figura 2-5 Propuestas. A. Conexión de abrazaderas, B. Conexión de cartelas (Morán, Benítez, Silva, & García, 2016)

El estudio concluye que los conectores metálicos delgados y, relativamente, livianos, son propuestas atractivas y posibles para mejorar el desempeño de las conexiones en estructuras de GA.

Además, las dos conexiones propuestas que fueron analizadas y comparadas con las tres conexiones típicas (Figura 2-4), representan alternativas apropiadas para potenciar la construcción con elementos de GA puesto que estas gozan de

ventajas respecto a las tradicionales, pues su relativa simpleza facilita el montaje y pueden ser fácilmente adaptables para ajustarse a distintos tamaños e irregularidades de los culmos de guadua.

2.3 ESTADO DE ARTE

Para el análisis y diseño de estructuras en guadua es necesario identificar el comportamiento de las conexiones empleadas, pues éstas tienen gran influencia sobre las limitaciones y ventajas de todo el sistema estructural. A continuación se mencionan algunas uniones desarrolladas en la actualidad.

2.3.1 UNIÓN TIPO SIMÓN VÉLEZ

El arquitecto Simón Vélez propone una unión a tensión que consiste en rellenar los culmos con mortero que permitan actuar como confinamiento para una varilla de 3/4 de pulgada ubicada dentro de los tallos de guadua. Esta unión ha sido probada obteniendo una resistencia de 3000 kg por cada entrenudo rellenado (Garzón, 1996)

Las conexiones (Figura 2-6 y Figura 2-7) han sido homologadas por la NTC 5407, sin embargo esta propuesta aumenta el peso de la estructura además de la dificultad para inyectar adecuadamente el mortero y garantizar la adherencia entre los materiales.

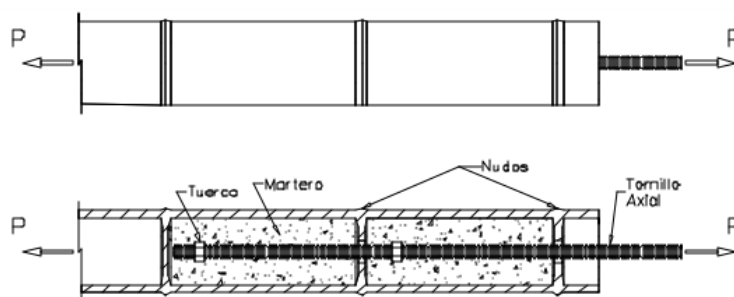


Figura 2-6 Detalle unión propuesta por el arquitecto Simón Vélez. (NTC 5407, 2006)

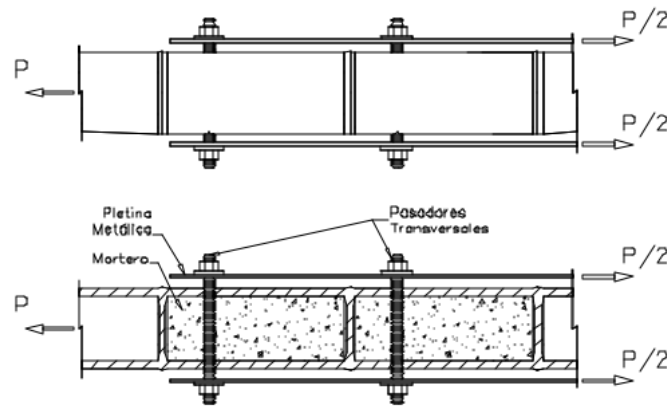


Figura 2-7 Unión tipo Simón Vélez con platinas laterales. (NTC 5407, 2006)

2.3.2 UNIÓN PEÑA-RODRÍGUEZ

Esta propuesta (Figura 2-8) hecha por estudiantes de la Universidad Nacional de Colombia (*Peña y Rodríguez, 1997*) consiste en una arandela calibre 18 atravesada por un pasador de 1/2 de pulgada y ocho puntillas de 1 pulgada de longitud y 1/8 de pulgada de diámetro. Esta unión resiste 1000 kg por cada par de conectores instalados sobre la guadua, sin embargo, aunque es mucho más liviana y menos costosa que la unión tipo Simón Vélez, la guadua se rasga en la conexión cuando está bajo solicitación.

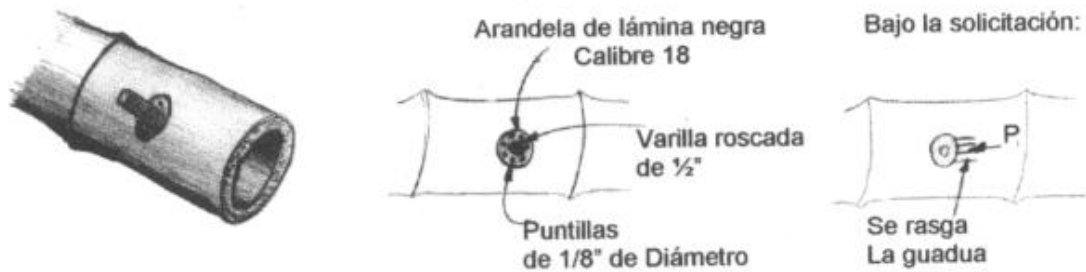


Figura 2-8 Unión tipo Peña-Rodríguez (Universidad Nacional de Colombia, 1997)

2.3.3 UNIÓN CLAVIJO-TRUJILLO

Clavijo y Trujillo (2000) propusieron dos tipos de uniones a tracción:

Unión tipo abrazadera: Este tipo de unión consiste en una lámina formada en frío, calibre 22, de 4 cm de ancho que emplea 12 tornillos de 6.35 mm (1/4") y un pasador de 1,58 cm (5/8"); presenta una resistencia última promedio de 102969 N

(10500 kgf), pero su mayor problema que sufre grandes deformaciones antes de fallar, sumado a las dificultades de construcción de las abrazaderas y del ensamble de la unión.

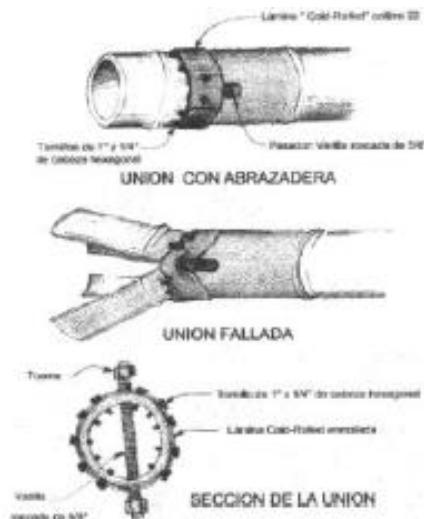


Figura 2-9 Unión con abrazadera tipo Clavijo-Trujillo (Clavijo & Trujillo, 2000)

Unión con mortero: Requiere perforar previamente 18 orificios para introducir en estos 18 varillas lisas de 6.35 mm (1/4") y posteriormente necesitan taladrarse dos orificios de 1.58 cm (5/8") para atravesar el pasador y un orificio de 3.175 cm de diámetro (1-1/4") para introducir el mortero al interior (Figura 2-10). Esta unión presenta una resistencia última promedio de 64380 N (6565 kgf), pero al igual que la anterior presenta dificultades en su construcción.

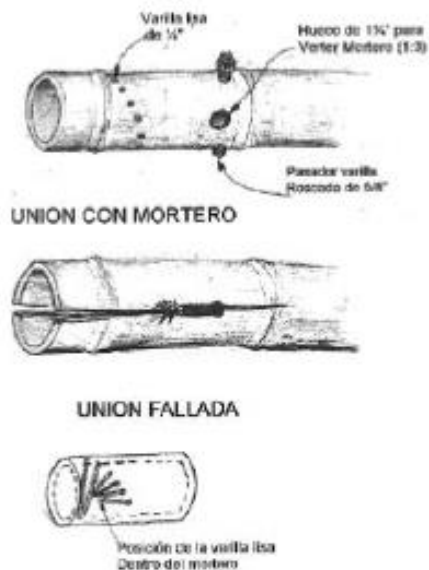


Figura 2-10 Unión con mortero Clavijo-Trujillo (Clavijo & Trujillo, 2000)

3. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

La investigación se fundamentó en la construcción y prueba de cerchas planas de guadua con uniones de abrazaderas metálicas. Se construyeron prototipos fueron sometidos a la acción de cargas puntuales en función de caracterizar su comportamiento mecánico y revisar la viabilidad de la propuesta para ser usada en la construcción.

3.1 FASE DE REVISIÓN Y DISEÑO

3.1.1 ANÁLISIS Y SELECCIÓN DE LOS PROTOTIPOS

Antes de iniciar el proceso de construcción fue necesario plantear alternativas que fueron evaluadas con programas de elementos finitos como SeismoStruct y comparados con SAP2000 a manera de validación.

Para la elección de alternativas fueron considerados tres criterios de decisión: Comportamiento mecánico, límite de pandeo en los elementos a compresión y simplicidad constructiva.

Se decidió considerar configuraciones de cerchas *Warren* y *Pratt* pues son estas las más utilizadas para estructuras de puentes de madera o acero.

Las estructuras fueron evaluadas considerando módulos de 0.75 m, 1 m y 1.5 m, una cercha diferente por cada modulación; y todas las estructuras se consideraron con longitud de 6 m entre apoyos, que se consideraron homólogos para estructuras de 3 metros que se analizaron, para todas se utilizó una altura de 1 metro entre ejes de cuerdas, para alcanzar, mínimo, los 1.2 m sugerida para antepechos dentro de la norma colombiana de construcción.

Se descartó la estructura con una modulación a 0.75 m debido a la gran cantidad de elementos que se requieren para su construcción, principalmente dificultando la implementación de las diagonales.

3.1.1.1 ESTRUCTURA CON DIVISIONES CADA 1 m

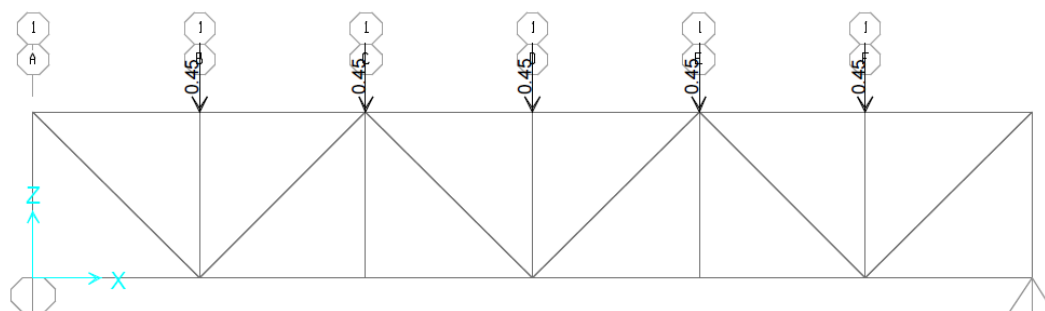


Figura 3-1 Modelo de cercha tipo Warren con módulos cada 1 m (W1m).

La estructura se cargó como se muestra en la Figura 3-1 se obtuvo una deflexión máxima de 3.8 mm en el centro de la luz (se aclara que el comportamiento del modelo siempre es más rígido que el real).

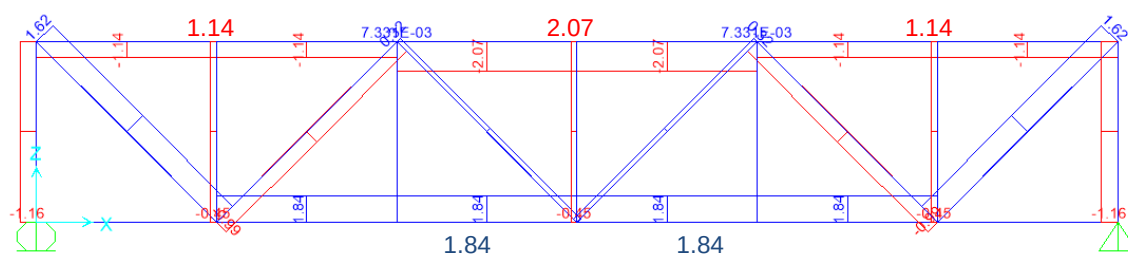


Figura 3-2 Cargas axiales del modelo W1m. (Unidades de carga en toneladas)

3.1.1.2 ESTRUCTURA CON DIVISIONES CADA 1.5 m

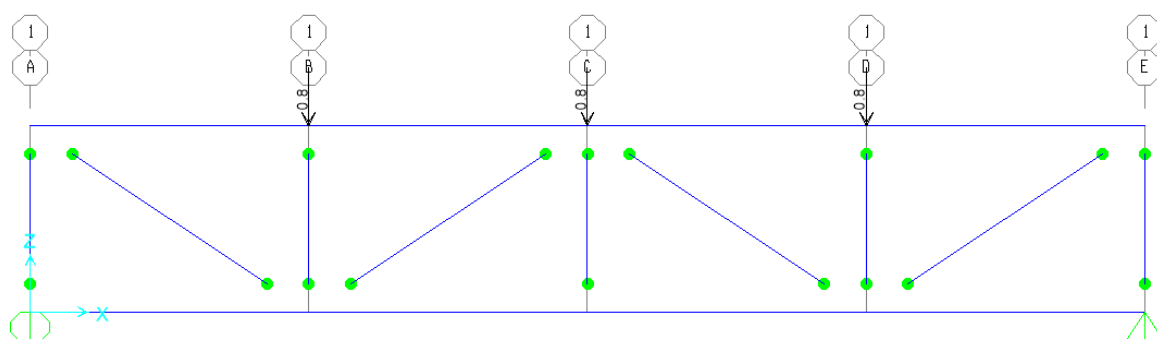


Figura 3-3 Cercha tipo Warren con modulación a 1.5 m (W15m). (Unidades de carga en toneladas)

El modelo experimentó una deflexión máxima en el centro de la luz de 9.8 mm, una deflexión que supera el rango esperado (5.0 cm) (American Concrete Institute (ACI), 2004) para el uso de la estructura.

Las cargas internas de la estructura se reducen notablemente sobre todo las de compresión, nuevamente los elementos a compresión de la estructura no presentarán riesgo de pandeo, teóricamente.

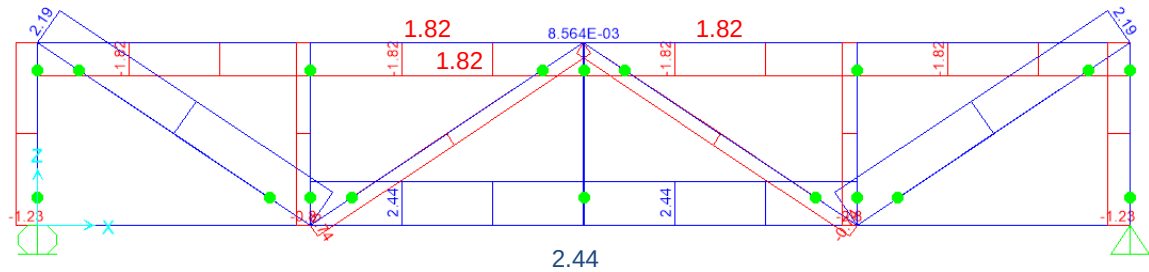


Figura 3-4 Cargas axiales del modelo W15m. (Unidades de carga en toneladas)

3.1.1.3 ALTERNATIVA DIVISIONES CADA 1.5 m CERCHA PRATT

Buscando reducir la cantidad de elementos a compresión en la estructura, especialmente las diagonales, se probó una cercha en configuración tipo *PRATT* (Figura 3-5) con modulación de 1.5 m.

El modelo se cargó de igual forma que la cercha Warren con divisiones de 1.5m, obteniendo una deflexión máxima de 1.1 cm en el centro de la luz.

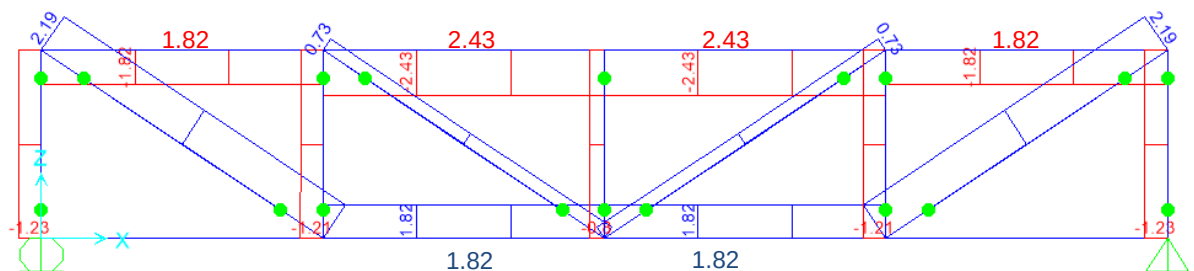


Figura 3-5 Cargas axiales de los elementos de la alternativa Pratt con modulación a 1.5 m. (Unidades de carga en toneladas).

Como se muestra en la imagen, se logra reducir la cantidad de elementos a compresión y se evitan los efectos de cargas compresivas en las diagonales.

Adicionalmente es posible reducir las dimensiones de la cuerda inferior y eliminar las verticales de los extremos contribuyendo a reducir el peso total de la estructura y apoyando la cercha desde los extremos de la cuerda superior.

Por otro lado, la configuración *Pratt* también se convirtió en la mejor alternativa sobre las demás evaluadas, pues las diagonales están sometidas a tracción, dando un margen de comportamiento a la conexión de las diagonales eliminando cualquier riesgo de pandeo en los conectores.

Al comparar las dos estructuras con divisiones cada 1.5 m, se evidenció que en la configuración tipo *Pratt* las cuerdas y verticales de la estructura experimentan similar solicitación de carga que en la tipo *Warren*, pues no hay una diferencia resaltante entre los elementos.

Igualmente la configuración tipo *Pratt* es más simple en cuanto a su construcción y su comportamiento es más eficiente pues tiene mayor solicitación reduciendo riesgos de sobre dimensionamiento de secciones.

Evaluadas las condiciones se decidió utilizar la estructura tipo *Pratt* con elementos divisorios cada 1.5 m para cubrir una luz de 6 metros, mientras para las estructuras probadas de 3 metros de luz, se utilizó una modulación de 0.75 m, pues demostró que esa proporción sería más eficiente dando mayores ventajas constructivas respectivamente en las luces analizadas.

3.1.2 ANÁLISIS DE CARGAS

Las fuerzas internas de la estructura se obtuvieron en términos de una carga “P” aplicada sobre los nodos de la estructura (Figura 3-6).

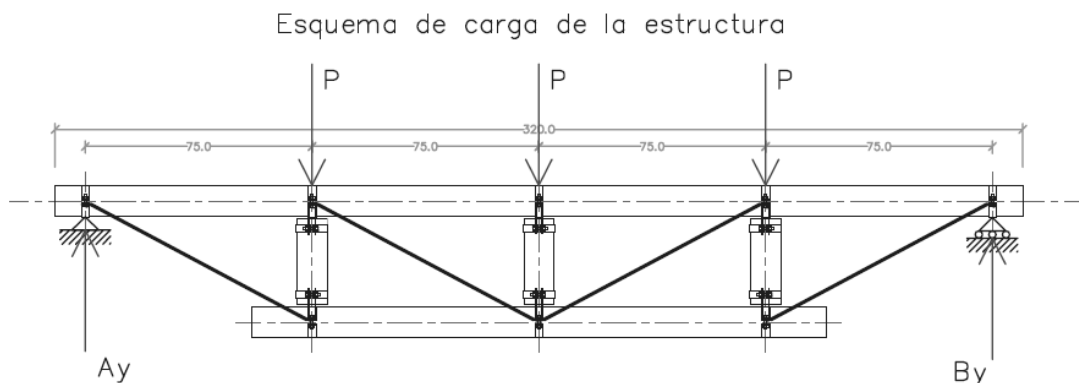


Figura 3-6 Diagrama de cuerpo libre de la estructura. Esquema de aplicación de carga.

3.1.2.1 DIAGRAMAS Y RESULTADOS

Por tratarse de una cercha solo son necesarios los diagramas de carga axial de los elementos. Estos muestran valores máximos de tensión en las diagonales extremas iguales a $3P$ y una compresión axial máxima en la parte central de la cuerda superior (Figura 3-7)

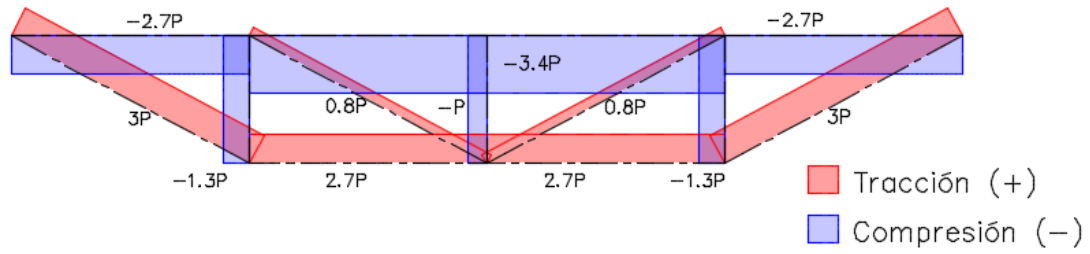


Figura 3-7 Diagrama de fuerzas axiales de la cercha causada por la acción de las cargas aplicada P .

3.1.3 DIMENSIONAMIENTO

Para los prototipos de cerchas de 3 metros de longitud, se usaron culmos para los elementos a compresión, y se utilizaron latas de guadua de cuatro centímetros (4 cm) de ancho y aproximadamente un centímetro de espesor (1 cm) en las diagonales que soportarían tracción (Figura 3-8).

Alzada de la cercha

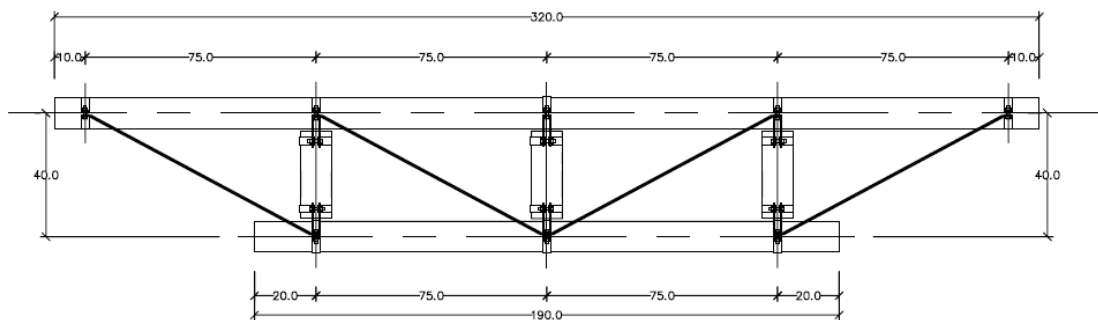


Figura 3-8 Vista en alzada del prototipo de guadua. (Dimensiones en centímetros)

Por otro lado, para los prototipos de 6 metros, en todos los elementos (cuerdas, montantes y diagonales) se utilizaron culmos de guadua.

3.2 FASE DE TALLER

Se fabricaron los elementos, uno a uno, basado en los planos y las recomendaciones de investigaciones previas realizadas en temas similares. Cada pieza fue producida por el titular de la investigación en las instalaciones de la Universidad del Valle durante un proceso basado en una documentación exhaustiva, y en el ensayo y error de cada método.

3.2.1 PRODUCCIÓN DE PIEZAS

Se seleccionaron los culmos de GA para la cuerda superior y la inferior de la cercha (Figura 3-8). Se dio prelación a los culmos que presentaran la menor variación de su perímetro entre sus extremos, para poder utilizar un solo tipo abrazadera y lograr un ajuste más uniforme sobre el culmo.



Figura 3-9 Detalle nodo central de la cuerda inferior. Consta de dos pares de abrazaderas, dos platinas tipo U y dos tipo V a cada lado.

Luego se definieron los tipos de abrazaderas a utilizar con base en los perímetros de GA en las posiciones donde estarán ubicadas. Dado que los perímetros de los culmos seleccionados oscilaban entre 35 y 37 cm, las abrazaderas fueron utilizadas de tipo II, clasificadas así en investigaciones previas (Benítez, 2017).

Las piezas metálicas para complementar las abrazaderas y formar la conexión (Figura 3-9), fueron producidas partiendo de platinas rectas de acero A36, de 1"x3/16" (2.54 cm x 0.48 cm). Cada una fue cortada con cizalla, doblada en dobladora manual y perforada a medida con taladro de banco con un diámetro de agujero de 25/64" para poder utilizar pernos de 3/8" de diámetro.

Se utilizó una máquina dobladora para dar el ángulo requerido a cada pieza de acople. Por otro lado, las abrazaderas fueron dobladas acomodando un anillo de guadua reforzado con acero en una dobladora manual, el cual fue extraído de uno de los culmos utilizados en la cercha; esto con el fin que la abrazadera tuviese una forma lo más cercana posible a los elementos de GA utilizados.



Figura 3-10 Detalle de unión con doble abrazadera, para detener el desplazamiento causado por la deflexión de la estructura.

En total se obtuvieron tres elementos de compresión de GA de 40 cm de longitud, doce latas de GA con longitud entre 83 a 85 cm, dos culmos para las cuerdas inferior y superior de 1.90 m y 3.20 m de longitud, respectivamente. Resultaron 28 semi-anillos, para totalizar catorce abrazaderas que se ubicaron de a pares en los nodos de toda la estructura (Figura 3-10). Las abrazaderas extra fueron ubicadas contiguas a las que componían las uniones de los extremos, con la función de restringir los desplazamientos de los nodos.

También fueron formadas treinta (30) piezas metálicas adicionales (Figura 3-11) para acoplar las abrazaderas y los elementos de carga (culmos y latas), constituyendo de esta manera las uniones.

Las abrazaderas se ajustaron con pernos de 3/8", usando llaves de aproximación y torquímetro para lograr un mejor ajuste de las tuercas cuidando no lacerar el culmo, las platinas tipo J y tipo V (Figura 3-11 b y c, respectivamente) fueron ubicadas en las orejas de las abrazaderas, adicionando arandelas curvas () procurando cerrar los espacios y creando superficies de contacto entre todos los elementos de la conexión.

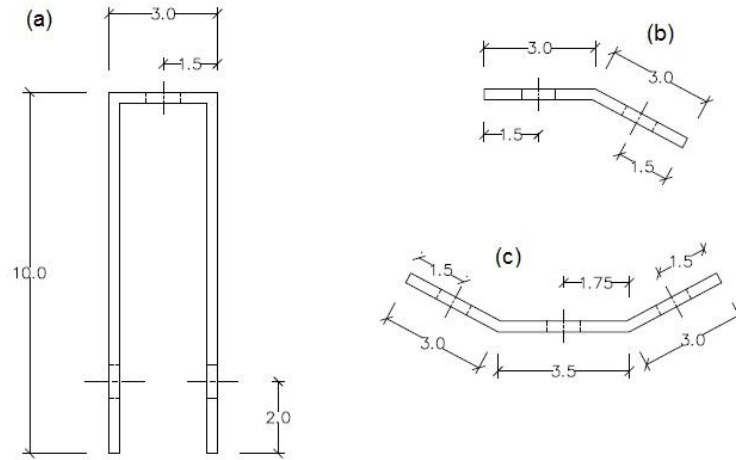


Figura 3-11 Platinas utilizadas para la unión de los culmos y latas de guadua de la estructura. a. Platina "U", b. Platina "J", c. Platina "V".

3.2.2 CONSTRUCCIÓN

Cada elemento fue puesto en su lugar según el detallado de los planos y diseños. Se ajustaron las abrazaderas sobre ambas cuerdas y luego se ubicaron los elementos a compresión.

Durante la ubicación de las diagonales, algunas experimentaron un pre-esfuerzo a compresión, motivo que las llevó presentar un ligero pandeo previo a las pruebas. A medida que avanzó la prueba (Figura 3-7) la tracción de las diagonales anuló el pre-esfuerzo compresivo y llevó a los elementos a un estado de equilibrio donde la curvatura se hace nula.



Figura 3-12 Primer prototipo de cercha construida.

3.3 FASE DE EJECUCIÓN

Durante esta fase se realizaron pruebas piloto para identificar fallas y errores constructivos y tomar medidas correctivas para las pruebas siguientes.

3.3.1 MONTAJE DE PRUEBAS

Las pruebas fueron realizadas utilizando vigas metálicas sobre un marco de acero, lo que permitió el ajuste y apoyo variable en cada prueba, acomodándose así a diferentes configuraciones y dimensiones de las cerchas.

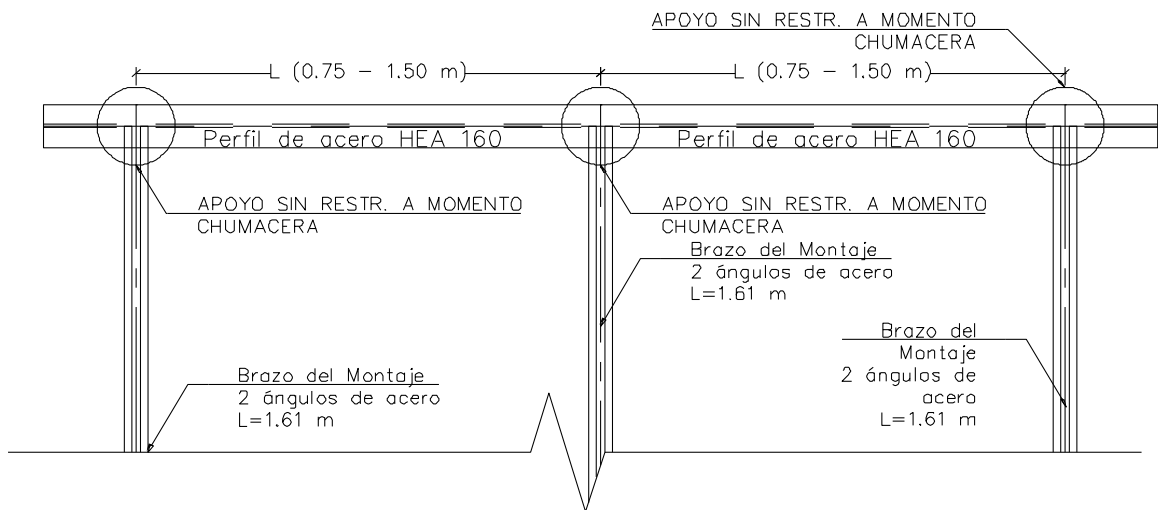


Figura 3-13 Esquema montaje de pruebas (Vista en planta)

Para la aplicación de carga sobre los nodos se utilizó un sistema (Figura 3-13) con perfiles angulares como palanca para magnificar los pesos y redistribuirlos en la estructura. Cada brazo se componía de dos perfiles metálicos de alas iguales (Ángulos L 2"x1/4") con una longitud, extremo a extremo, de 1.61 metros. Ambos ángulos metálicos se encuentran articulados en un extremo fijado a un perfil HEA160 por medio de una chumacera (Ver Figura 4-7 para vista real del montaje).

El punto de aplicación de la carga se encuentra a 161.5 cm de la articulación. Y el punto donde se transmitió la carga hacia la cercha se encuentra a 19.5 cm, es en este punto donde se transmite la carga amplificada (8.25 veces) del peso que se ubica en el extremo libre del brazo (Figura 3-14).

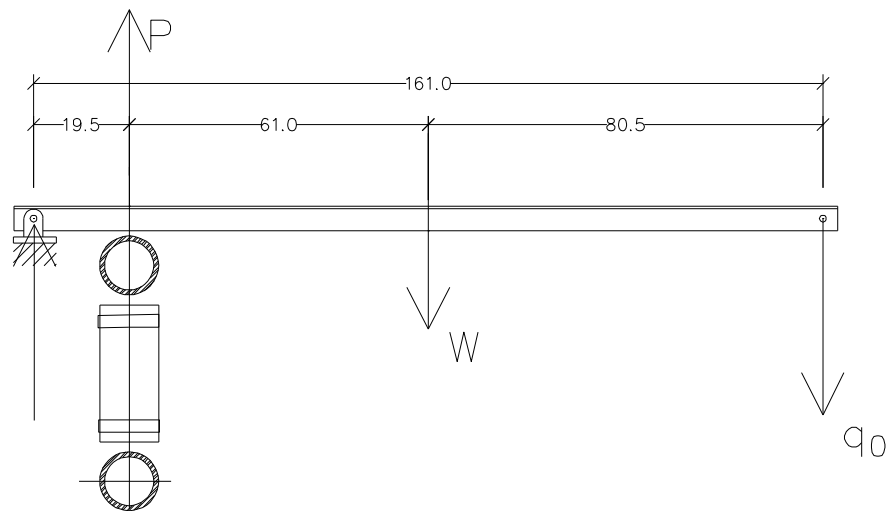


Figura 3-14 Montaje de brazo, compuesto por dos perfiles metálicos, para la prueba y carga de los prototipos de estructura en guadua. W es el peso de los ángulos, P la reacción en el nodo y q_0 el peso de la carga aplicada.

3.3.1.1 ESTIMACIÓN DE LA CARGA

La Figura 3-14 muestra el diagrama de cuerpo libre (DCL) del sistema de carga. La carga q_0 es la que se impone mediante el peso de bloques, la reacción P actúa sobre la cercha y W es el peso propio de las palancas y sistema de carga. Considerando sumatoria de momentos en el extremo articulado del brazo se obtiene la fuerza P así:

$$(0.195)P(q_0) - W(0.805) - q_0(1.61) = 0 \quad \text{Ecuación 1}$$

Con esta expresión se halla la magnitud de la carga P para cualquier q_0 . El peso de los perfiles (dos por cada brazo) suma 11.6 kg. La carga q_0 se aplica mediante la adición de bloques de arcilla con un peso de 13 kg cada uno.

3.3.1.2 INDICADORES DE DEFLEXIÓN

Se ubicaron cuatro indicadores de carátula (0.001 in) para registrar las deflexiones en la cuerda superior como se muestra en la Figura 3-15

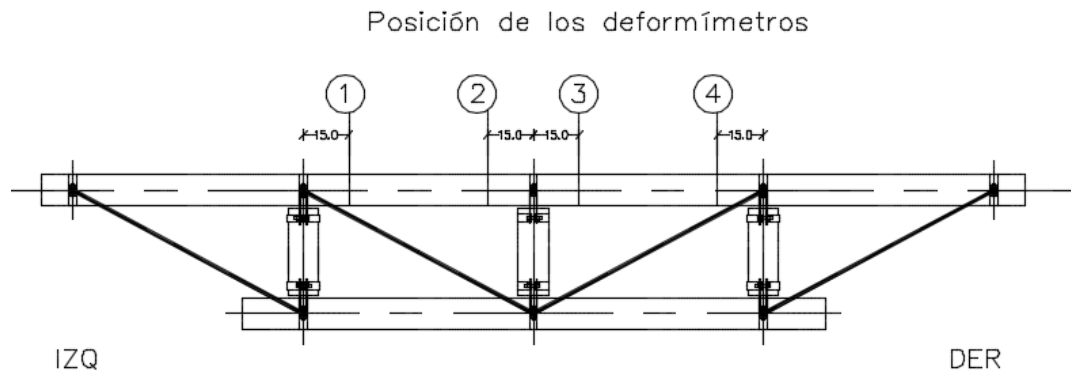


Figura 3-15 Ubicación y posición (Respecto a la estructura) de los cuatro deformímetros utilizados durante las pruebas.

Cada indicador fue ubicado a quince centímetros (15 cm) de los nodos que reciben la carga, se ubicaron dos en la porción central de la estructura, a ambos lados del elemento vertical del centro de la luz y uno a cada lado de los nodos de carga más externos de la estructura (Figura 3-15).

3.3.2 CARGA APLICADA

La carga fue aplicada mediante bloques de arcilla en el extremo libre de los brazos metálicos (Figura 3-16) donde estaban dispuestas tres tablonas de madera, uno por cada brazo.



Figura 3-16 Canastillas ubicadas en cada brazo y listas para el inicio de la prueba.

3.3.3 REALIZACIÓN DE LA PRUEBA

Se ubicaron los indicadores como se explicó antes (Figura 3-15) y se iniciaron en cero (0). En algunos tramos de carga se reajustaron los indicadores cuando estaban cerca de su recorrido total.



Figura 3-17 Primera cercha de guadua durante la prueba, en el séptimo escalón de carga.

Después de cada prueba se rescataron la mayor cantidad de elementos posibles para ser usados en los siguientes prototipos. Pues debido a las cargas, algunas abrazaderas laceraban y se incrustaban en el material (Figura 3-18) comprometiendo la integridad estructural de la guadua.



Figura 3-18 Falla de aplastamiento de la sección de la cuerda superior debido al deslizamiento del nodo inferior del elemento vertical.

Igualmente en algunos casos la falla de la estructura se dio por deslizamiento de los nodos respecto a su posición inicial (Figura 3-19), en estos casos puntuales se reutilizaron los culmos, pues no se observó daños a la estructura de la guadua.



Figura 3-19 Falla de la estructura en la unión. Deslizamiento de la abrazadera tras la aplicación de la carga.

3.4 FASE DE ANÁLISIS

Todos los datos fueron recogidos, condensados y procesados junto con las anotaciones y correcciones realizadas durante las pruebas.

3.4.1 EXTRACCIÓN DE DATOS

Durante cada prueba se registraron la carga y las deflexiones, mediante observación y se tomó registro fotográfico (Figura 3-20).



Figura 3-20 Foto del indicador 2 de la estructura durante la fase de prueba experimental.

El registro fotográfico permitió comparar los datos registrados e identificar cuando los indicadores habían dado un ciclo completo.

3.4.2 ANÁLISIS DE DATOS

En el análisis se utilizaron los límites de deflexión requeridos para cada tipo de uso contemplado en la normal NSR-10, con el fin de identificar el rango de carga máxima de una estructura constituida con este tipo de cerchas. De esta forma es posible recomendar su uso para diferentes aplicaciones.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos en las pruebas de carga. A continuación se mencionan las condiciones bajo las cuales se realizaron todos los ensayos:

- Se propusieron dos configuraciones de cercha: la primera de 3 metros de luz y 55 cm de distancia entre ejes de cuerdas, y la segunda con 6 metros de luz y 1 metro de distancia entre ejes de sus cuerdas.
- Los culmos presentaban variaciones de perímetro entre 33 y 37 cm.
- Todos los prototipos tuvieron la misma configuración y distribución de las cargas.
- Durante cada prueba la cercha fue llevada hasta el punto donde no pudiese aumentar la carga aplicada, ya sea por una falla o inestabilidad.
- Cada elemento y pieza de acero fue producido y cortado en los laboratorios de la universidad del Valle, por el titular de la investigación.
- Todos los prototipos construidos presentaron pesos distribuidos linealmente de 10 kg/m ($CV=0.726\%$).

4.1 PRIMERA PRUEBA ESTRUCTURA DE 3 METROS

4.1.1 RESULTADOS DE DEFLEXIONES

En la primera prueba se obtuvieron deflexiones mayores con el indicador 3, excepto durante el primer y en el penúltimo escalón de carga, cuando las deflexiones del indicador 4 sobrepasaron las obtenidas en el resto de indicadores (Tabla 4-1). Esto no es consistente con la simetría del modelo y la teoría que indica que las deflexiones son máximas cerca del nodo central, medidas en este caso con los indicadores 2 y 3.

Tabla 4-1 Lectura de los cuatro indicadores sobre la cuerda superior en la primera prueba.

Carga apli. (N)	Deflexión (mm)			
	Indicador 1	Indicador 2	Indicador 3	Indicador 4
2180	3.7	4.0	4.4	4.5
4326	6.9	8.7	9.7	9.3
6473	9.6	11.1	12.9	12.5
8620	13.3	15.0	17.7	16.9
10766	15.8	18.7	22.6	20.6
12913	19.1	21.4	26.3	25.1
15060	22.3	27.3	33.6	30.2
17206	29.4	36.4	42.8	37.7
19353	34.8	42.3	48.9	43.8
21500	39.0	47.9	56.3	64.4



Figura 4-1 Primera cercha probada, elemento de la izquierda (resaltado en el óvalo) desviado debido al deslizamiento de la unión con la cuerda inferior.

El comportamiento anterior se puede explicar por el deslizamiento hacia afuera de la abrazadera que amarraba el nodo cerca del indicador 4. Lo anterior causó que el elemento a compresión perdiera su verticalidad acrecentando la deflexión registrada por el indicador y causando un comportamiento con irregularidades por parte de la estructura.

4.1.2 DEFLEXIÓN DE LA ESTRUCTURA

Como se aprecia en la Figura 4-2 la cercha presentó un comportamiento irregular no simétrico durante toda la prueba. La deflexión en el indicador 3 fue mayor hasta el deslizamiento de la abrazadera del nodo contiguo.

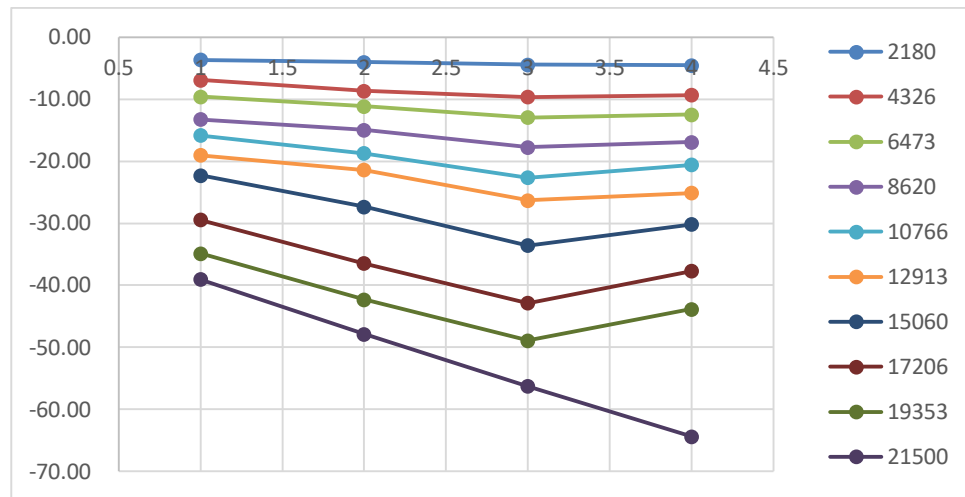


Figura 4-2 Línea de deflexión de la estructura según el respectivo escalón de carga. Carga en Newtons y deflexión en milímetros.

La estructura falló debido al deslizamiento de la abrazadera que amarraba el elemento vertical izquierdo de la estructura a la cuerda inferior, como se evidencia en la Figura 4-2. El deslizamiento fue progresivo, caracterizado por la curvatura irregular de la estructura, hasta alcanzar un máximo de 38.1 milímetros de su posición inicial en el último escalón de carga probado (Figura 3-19)



Figura 4-3 Laceración causada sobre la cuerda superior de la estructura debido al deslizamiento de la abrazadera inferior.

La Figura 4-3 muestra el enterramiento que experimentó la abrazadera en la cuerda superior debido al deslizamiento de la abrazadera inferior del elemento vertical izquierdo (Figura 4-1)

4.2 SEGUNDA PRUEBA ESTRUCTURA DE 3 METROS

Tomando como base componentes del primer prototipo, se reubicaron y sustituyeron los elementos averiados o desajustados y se añadió un par de semianillos (abrazaderas) extras en cada uno de los extremos para limitar el deslizamiento percibido durante la primera prueba.

El procedimiento para la segunda prueba fue el mismo que se utilizó para la primera, con los mismos patrones de carga para la estructura y la misma ubicación para los indicadores.

4.2.1 RESULTADOS

En la prueba del segundo prototipo se pudo observar un comportamiento más coherente con lo estimado teóricamente y una simetría en la deflexión, lo que no se obtuvo en la prueba del primer prototipo (Tabla 4-2, Figura 4-4)

Tabla 4-2 Resumen de todos los valores de carga y deflexión obtenida para todos los indicadores.

Carga apli. (N)	Deflexión (mm)			
	Indicador 1	Indicador 2	Indicador 3	Indicador 4
2180	2.7	2.9	3.6	2.5
4326	5.2	6.4	7.0	5.3
6473	8.1	9.8	10.7	8.6
8620	11.2	13.0	13.2	12.1
10766	15.5	17.6	17.1	14.6
12913	17.9	20.8	20.7	17.9
15060	21.0	24.3	24.2	21.1
17206	23.7	28.1	28.1	25.1
19353	27.5	31.5	31.5	29.2
21500	32.5	34.1	34.3	32.0
23646	37.1	40.6	40.9	34.7
25793	41.4	47.1	47.3	41.1

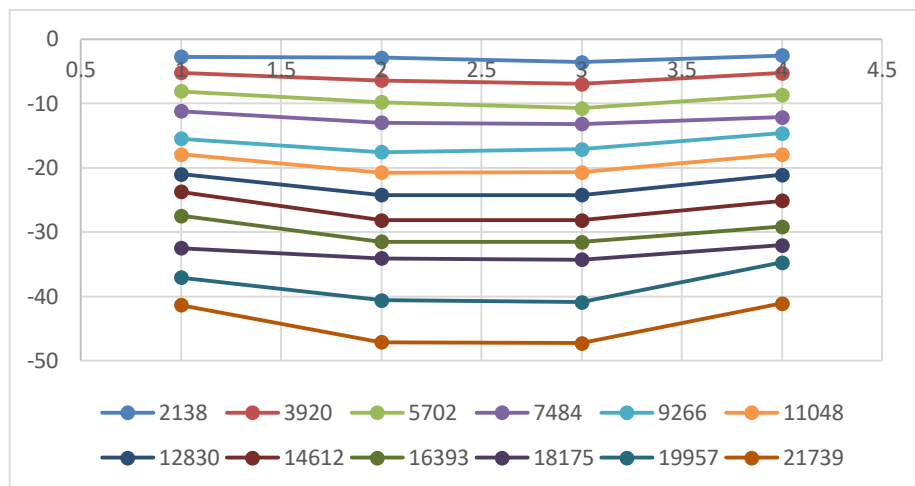


Figura 4-4 Curvas de deflexión experimentada por la cuerda superior de la estructura.

La deflexión fue consistente con lo que se espera para estructuras simplemente apoyadas, en las cuales los puntos más cercanos al centro de la luz presentan la mayor deflexión, la cual se reduce gradualmente conforme se acerca a los apoyos.

La estructura mantuvo este comportamiento durante la totalidad de la prueba y nunca presentó una falla aparente en ninguno de sus elementos. Además, recuperó su estado inicial tras la finalización y descarga de la prueba; lo cual indica que no se superó el comportamiento elástico y no se produjeron daños locales.

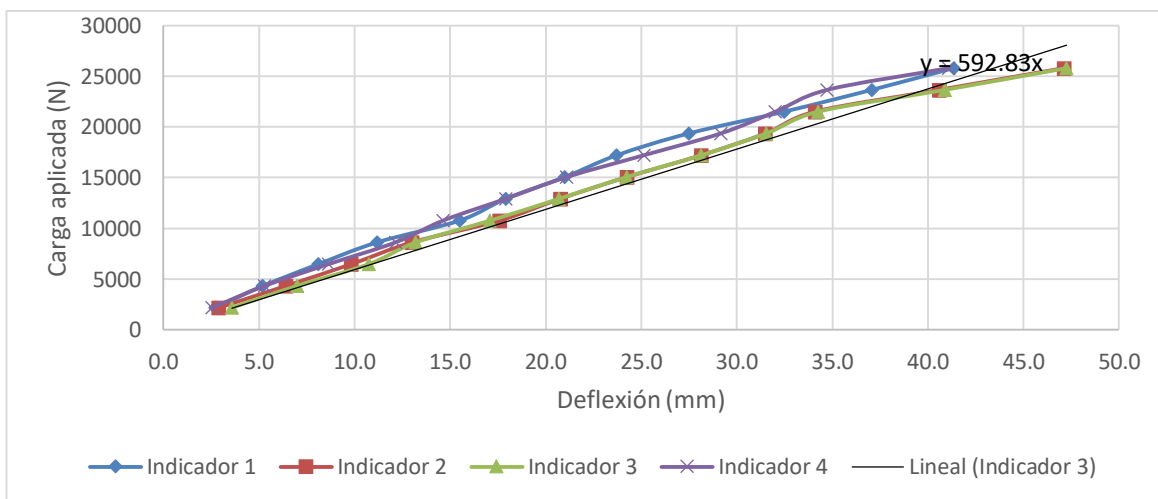


Figura 4-5 Curvas de carga vs deflexión de la estructura.

Se identificó un comportamiento casi idéntico entre los indicadores homólogos (1 y 4; 2 y 3), salvo pequeñas variaciones atribuibles a la anisotropía del material y

posibles defectos de construcción. Esto demuestra la deflexión casi simétrica que experimentó la estructura durante la prueba.

4.2.3 RIGIDEZ DE LA CERCHA

La rigidez se estimó con los indicadores centrales 2 y 3. En el rango de carga analizado se obtuvo una rigidez de 594 N/mm con los indicadores 2 y 3 (Figura 4-5).

El comportamiento de ambos indicadores fue similar. Ambos mostraron una reducción de rigidez a partir de los 21500 N, consistente con la simetría de la cercha.

4.2.4 RESULTADOS TEÓRICOS

La estructura fue modelada usando un *software* de diseño, *SeismoStruct* (SeismoSoft, 2002, Italia). Se consideró un modelo lineal elástico e isótropo con un módulo de elasticidad de 9500 MPa, tomado de la NSR-10 como el E_{50} , una densidad de 0.056 N/cm^3 y una relación de Poisson de 0.14 (García, Rangel, & Ghavami, 2012) de acuerdo con la NSR-10. Se realizó solo la modelación ante cargas verticales.

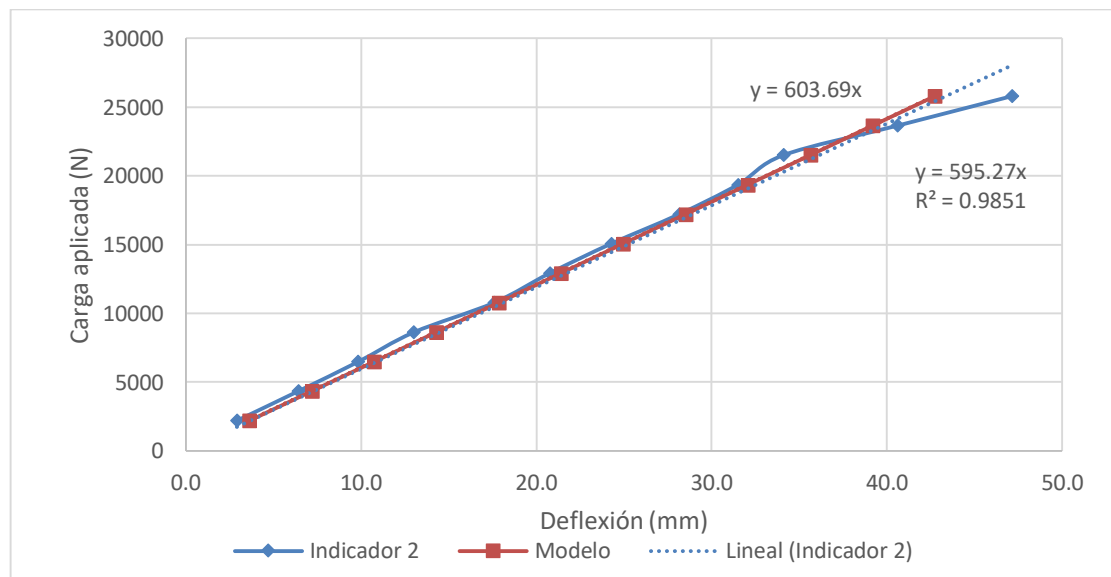


Figura 4-6 Comparación de las curvas carga vs. Deflexión de la prueba teórica y la experimental.

Al modelar la cercha con uniones inalteradas se observó un comportamiento muy rígido. En consecuencia, se identificó que la baja rigidez de la cercha se debía, principalmente, a la flexibilidad de las uniones.

El modelo se compuso de elementos tipo viga. Las cuerdas superior e inferior se consideraron continuas. El resto de elementos se articularon en los extremos para garantizar que trabajen solamente a carga axial.

Las cargas fueron aplicadas sobre los nodos de la estructura ubicados en la cuerda superior y las deflexiones fueron obtenidas a 15 cm de estos, tal y como se ubicaron en la prueba experimental.

Los programas usados permiten modificar la rigidez de las uniones. Para la calibración del modelo se modificó la rigidez de las uniones, para que la deflexión del modelo fuese similar a la experimental.

Después de ajustar la rigidez, se obtuvo la curva teórica de la Figura 4-6, la cual muestra un comportamiento muy similar al experimental, con una diferencia de pendientes del 1%. La diferencia de deflexiones en el centro de la cercha fue de 0.29%

El modelo se ajustó con una rigidez de **3256 N/mm** en todas las uniones.

4.3 PRIMERA PRUEBA DE PROTOTIPO DE 6 METROS

Se ensayó una cercha Pratt de 6 metros, con 1.14 metros de alto y un peso total de 60.1 kg. Se escogió la configuración Pratt tras los análisis descritos en el apartado 3.1 de este documento, para esta estructura todos los elementos (cuerdas, montantes y diagonales) fueron constituidos por culmos de guadua (Figura 4-7).

El montaje de prueba cambió para la estructura de 6 metros debido a las limitaciones de espacio en el sitio de pruebas. Se requirió aumentar la distancia entre los brazos y la estructura debió ubicarse a 46 cm del apoyo de los brazos y no a 19.5 cm como se mostró en la Figura 3-14, esto representó una reducción de la ventaja mecánica de las palancas.

La ventaja mecánica del sistema este nuevo sistema fue calculada en 3.48, lo que significa en que la cercha recibe 3.48 veces la carga ubicada en el extremo de los brazos, y fue obtenida de la misma forma que en el apartado 3.3.1.1.



Figura 4-7 Estructura en guadua ubicada y trabajando durante prueba de carga.

La cercha fue probada de la misma manera que las estructuras previas. Para aplicar la carga se utilizaron ladrillos de arcilla que se colocaron en el extremo libre de los brazos, los cuales amplificaron y transmitieron la carga a los nodos centrales de la estructura. Los ladrillos utilizados tuvieron un peso que promedió los 5 kg (CV: 2.671%).

4.3.1 RESULTADOS

La estructura falló prematuramente debido al deslizamiento de la abrazadera superior de una de las diagonales de los extremos, ante una carga de 407 kg, como se muestra en la Figura 4-8.



Figura 4-8 Deslizamiento de la abrazadera de la conexión de la diagonal.

En las curvas de carga-deflexión (Figura 4-9) se puede observar una rigidez más alta para la primera aplicación de carga (aproximadamente 308 N/mm en el nodo central, tomada con el indicador 2), seguida por una línea con pendiente reducida en cerca del 41%. Luego se presenta una rigidez mayor para los otros incrementos. La rigidez fue de 182.9 N/mm para todo el intervalo de carga

obtenida como la pendiente de la recta ajustada a los datos experimentales (Figura 4-9).

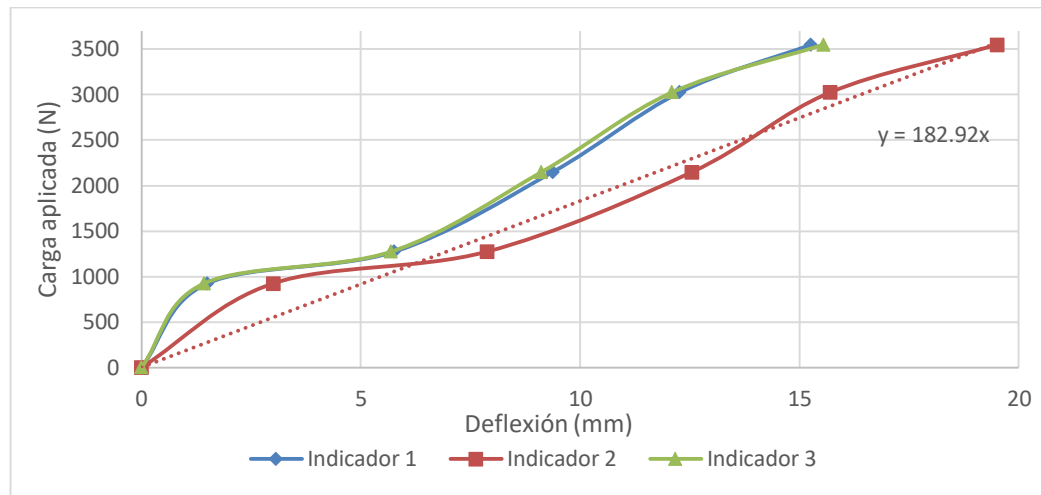


Figura 4-9 Curva carga vs. Deflexión para la prueba número 3.

4.4 SEGUNDA PRUEBA PROTOTIPO DE 6 METROS

Tras la falla se decidió realizar la fijación de las abrazaderas de las diagonales usando tornillos auto-perforantes para una segunda prueba, la intención principal fue aumentar el rango de carga y mantener la integridad del conjunto al restringir el deslizamiento de las abrazaderas sobre las diagonales.

Con los tornillos *drywall* ubicados, uno en cada semi-anillo de las diagonales (Figura 4-10), y cada elemento reajustado, fue posible realizar una segunda prueba para la cercha.

Los tornillos fueron ubicados únicamente en las abrazaderas de las diagonales, 4 por cada diagonal, procurando que estos estuvieran en posiciones opuestas entre ellos.

El proceso de aplicación y medición de las deflexiones fue idéntico al utilizado durante todas las pruebas anteriores.



Figura 4-10 Detalle abrazadera fijada con tornillo autoperforante. Circulo rojo. (Valencia Hernández, 2018)

La estructura fue probada de la misma manera que la anterior, bajo las mismas condiciones de carga y apoyo, la deflexión se tomó de 3 indicadores, fue necesario prescindir de uno de los indicadores que cubrían el nodo central de la estructura (indicadores 2 y 3 Figura 3-15), estos se ubicaron, individualmente, a 15 cm de los nodos principales de la estructura.

4.4.1 RESULTADOS

Las lecturas del Indicador central 2 fueron mayores y se observaron lecturas similares entre los indicadores 1 y 3, tal como era de esperarse por la simetría de la cercha (Tabla 4-3).

Tabla 4-3 Resultados de carga vs. deflexión para la prueba de la estructura con tornillos *drywall*.

Carga apli. (N)	Deflexión (mm)		
	Indicador 1	Indicador 2	Indicador 3
0	0	0	0
924	1.6	2.0	1.8
1274	2.1	3.5	2.3
1974	5.8	8.4	5.7
2324	8.4	11.0	8.4
3024	13.8	16.7	13.9
3199	15.2	18.1	15.2
3374	16.7	19.4	16.7
3724	19.2	21.4	19.0
4074	20.2	23.3	20.2

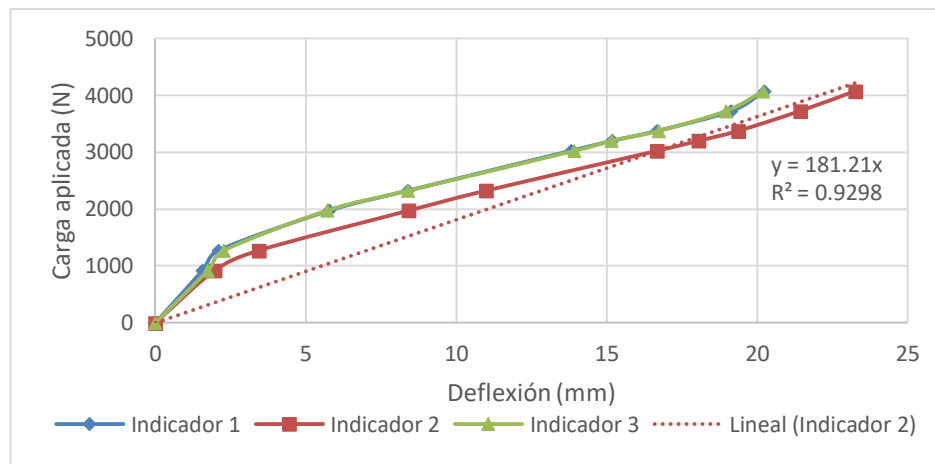


Figura 4-11 Curva de carga y deflexión para todos los indicadores durante la prueba no. 4

En la curva de carga vs deflexión (Figura 4-11) se observa una caída de rigidez menor que la observada con la cercha sin tornillos (Figura 4-9).

Las abrazaderas fijadas mediante los tornillos *drywall* no presentaron deslizamientos apreciables a simple vista durante toda la prueba. Esto significa que el uso de tornillo *drywall* logró mantener la integridad de la estructura, aunque no aportaron una mejoría a la rigidez del sistema.

Se observa fácilmente que hay congruencia entre los resultados de ambas pruebas de los prototipos de 6 metros, puesto que la variación de las rigideces entre ambas pruebas es despreciable con una diferencia que representa solo el 2.76% (5 N/mm).

La falla de la estructura se presentó tras superar los 407 kilos, se presentó una caída súbita de los brazos del sistema de carga, sin embargo, no se presentaron daños en las conexiones o los elementos que mostraran un compromiso real de la integridad de la cercha. Posteriormente la cercha recuperó totalmente su estado inicial al retirar los pesos de los brazos, pues la deflexión residual fue despreciable.

4.4.2 MODELAMIENTO Y RESULTADOS TEÓRICOS

Se hicieron las mismas consideraciones que en el modelo de la cercha de 3 metros con respecto a los tipos de elementos y materiales utilizados. Adicionalmente, se adoptaron las siguientes variaciones:

- Se substituyeron las diagonales de lata por elementos tipo culmo, para que el modelo fuera fiel a la realidad.
- Como el eje de las diagonales no coincide con el eje de las cuerdas, se agregó una excentricidad (e) de 6 cm por encima de los nodos de las diagonales (Figura 4-12).

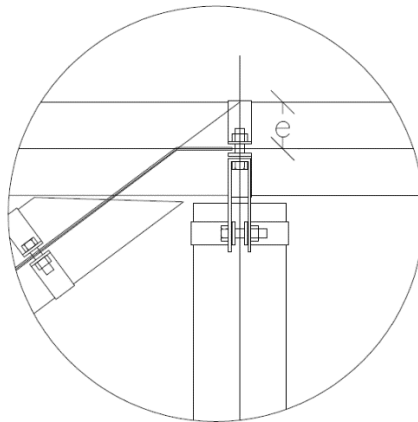


Figura 4-12 Detalle llegada de diagonal al nodo, e representa la excentricidad, esquemática.

Se realizaron dos modelaciones iniciales, la primera con juntas perfectas sin excentricidades, y la segunda con la excentricidad de 6 cm en las uniones de las diagonales.

Al añadir una excentricidad a las juntas se redujo, substancialmente, la rigidez global de la cercha, este valor de rigidez decayó en un 19.17% al comparar entre ambos modelos, el primero sin excentricidad (1350.8 N/mm) y posteriormente con excentricidad (1091.8 N/mm) (Figura 4-13).

Esto confirmó la hipótesis que la rigidez del modelo recaía, principalmente sobre las conexiones de la cercha.

La calibración se hizo variando la rigidez axial de las uniones que conectan elementos verticales y diagonales para acercar la deflexión teórica a la experimental. Se realizaron iteraciones hasta lograr un comportamiento teórico similar al experimental.

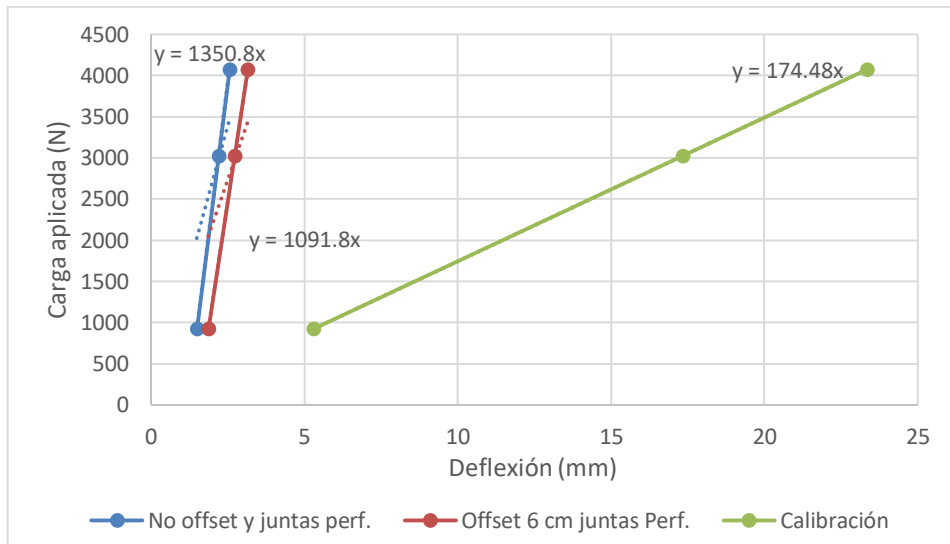


Figura 4-13 Gráficas de resultados tras consideraciones en la calibración.

La calibración se alcanzó con una rigidez axial de las uniones de 1602 N/mm. Dicha rigidez (1602 N/mm) es cercana a la mitad de la rigidez (3256 N/mm) de las uniones del modelo calibrado de la cercha de 3 metros.

La diferencia en la rigidez de los dos modelos se puede atribuir a las diferencias en las uniones de los dos prototipos. Por ejemplo, la longitud de los conectores metálicos de la cercha de 6 metros (Conector A en Figura 4-14) es mucho mayor. Además las uniones tienen excentricidad (Figura 4-12), condición que no se presentó en la cercha de 3 metros que tiene diagonales de latas.

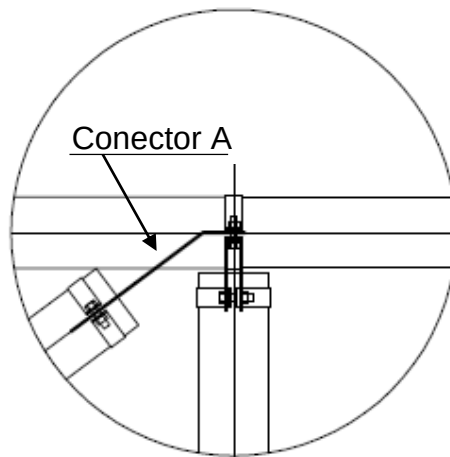


Figura 4-14 Detalle conexión tipo 2 (Cercha de 6 metros)

Se obtuvo una rigidez teórica de la cercha de **174.48 N/mm** (Figura 4-13), la cual tiene una diferencia de 3.71% con la experimental, lo que se considera satisfactorio.

La cercha presentó una flexibilidad considerablemente alta, condición se esperaba para la estructura debido a su luz. Adicional, la esbeltez de las platinas que componen la unión (Principalmente conector A en Figura 4-14) hizo que las conexiones fueran más flexibles de lo deseable, lo que seguramente influenció la flexibilidad general de la estructura.

4.5 PROPUESTA DE USO

Después de identificado el comportamiento de las cerchas, a continuación se proponen aplicaciones potenciales, amparadas por la norma colombiana de construcción.

Se propone su uso como estructuras de apoyo típicas en la construcción de nuestro país, reguladas por la norma colombiana de sismo-resistencia (NSR-10).

Del título G de la norma se encuentra la información necesaria para la comparación del sistema (Tabla 4-4). En esta se contemplan diversos usos para estructuras construidas con GA y se presentan los límites de deflexión para cada uso en función de su longitud entre apoyos (luz).

Tabla 4-4 Límites de deflexión para cargas de servicio para elementos contruidos con GA y con una longitud entre apoyos de 3000 mm. (NSR10, Min. ambiente, vivienda y desarrollo territorial, 2010)

COND DE SERVICIO	VIVA	VIENTO	TOTALES
CUBIERTAS			
Cielos rasos pañete o yeso	8.33	8.33	12.5
Otros cielos rasos	12.5	12.5	16.7
Sin cielo raso	12.5	12.5	16.7
Techos planos	Según cielo raso		10
Techos industriales	-	-	15
ENTREPISOS			
Elementos de entrepiso	8.33	-	12.5
Entrepisos rígidos	-	-	8.33
MUROS			
Con acabados frágiles	-	12.5	-
Con acabados flexibles	-	25	-

A las cargas utilizadas durante la prueba no se les aplicó ningún coeficiente de mayoración pues estas se consideraron en los análisis como cargas de servicio, que de acuerdo con la norma, deben ser usadas para el chequeo de deflexiones. Se debe satisfacer la siguiente relación:

$$874.2 \geq (AD + W_L) * (L) * (S) \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde W_L es la carga viva recomendada por la norma, AD la carga adicional de elementos no estructurales, L la longitud libre entre apoyos y S la separación entre ejes de las cerchas de soporte. La fuerza de 874.2 kg (equivalencia en kg del cuarto escalón de carga) (Tabla 4-2) se toma como el límite para el chequeo, pues con esta carga no se superaron las deflexiones máximas permitidas por la norma para cubiertas y entrepisos.

Para la comparación se utilizaron los escalones de carga de la segunda prueba del prototipo de 3 metros, correspondientes al escalón de carga de 862 Kg. En estos niveles de carga se producen las deflexiones límites considerados en la norma colombiana (máx. 12.5 mm, apta para cielos rasos y elementos de entrepisos, Tabla 4-4). Las cargas aplicadas en los nodos fueron iguales.

Tabla 4-5 Pesos de elementos no estructurales más utilizados, para cubiertas y entrepisos.

Cargas de elementos no estructurales típicos		
Pañete yeso	25 Kg/m ²	TABLA B3.4.1-1
Fibras acústicas	10 Kg/m ²	
Ductos	20 Kg/m ²	
Acabado piso concreto 5 cm	100 Kg/m ²	TABLA B3.4.1-3
Baldosa+mortero 25 mm	110 Kg/m ²	
Madera densa	25 Kg/m ²	
Asbesto-cemento	20 Kg/m ²	TABLA B3.4.1-4
Tablero madera 50 mm	25 Kg/m ²	
Tablero madera 75 mm	40 Kg/m ²	

Para el cálculo se consideró el peso propio como 10 kg/m (CV=0.726%), el cual se obtuvo repartiendo el peso total del sistema entre su longitud.

La carga adicional se combina junto con el peso propio y se halla basado en la Tabla 4-5, incluyendo, como mínimo, ductos, una condición de acabados y estructura de soporte adicional.

4.5.1 USO EN CUBIERTAS

Este chequeo se hace con la estructura de 3 metros, debido a que es la que cumple el rango de rigidez necesario para ser considerado como elementos de soporte para cubiertas.

Para el uso como cubiertas de estructuras de vivienda o almacenamiento se consideró una inclinación inferior a los 15° y cubiertas con jardines y terrazas, que para la norma son las que mayor solicitud de carga viva de cubierta (LLRF) representa (ver tabla B4.2.1-2 de la Norma de sismo-resistencia de Colombia), con 50 kg/m² y 500 Kg/m² respectivamente cada una.

Se realiza el chequeo de las cargas vivas con carga adicional debida a elementos no estructurales, tal como se explica a continuación.

Tabla 4-6 Chequeo de carga de uso para cubierta.

CUBIERTA						
TIPO	CARGA VIVA	ADICIONAL	Combinación	L	S	CHEQUEO
Cubierta reuniones	500 Kg/m ²	80 Kg/m ²	575 Kg/m ²	3.00 m	0.50 m	OK
Ángulo<15°	50 Kg/m ²	95 Kg/m ²	145 Kg/m ²	3.00 m	1.50 m	OK

En la Tabla 4-6 se muestra la máxima separación entre las estructuras para soportar las cargas de cubierta típicas y con una luz entre apoyos de las estructuras de 3.0 m. La carga adicional incluyó: carga por ductos metálicos, fibras aislantes, cielo raso y de tejado.

4.5.2 USO EN ENTREPISOS

Este chequeo se hace con la estructura de 3 metros, debido a que es la que cumple el rango de rigidez necesario para ser considerado como elementos de entrepiso.

El primer uso potencial para estas cerchas se halla dentro de la construcción de entrepisos de vivienda. Estas construcciones tienen solicitaciones de carga más bajas con respecto a estructuras de usos comerciales o de almacenamiento.

Las cerchas se podrían usar para cubrir luces entre apoyos, que para este caso serían los muros o columnas de la vivienda, según el sistema estructural utilizado.

Deben ser ubicadas y seguramente requerirían ser ajustadas lateralmente mediante sistemas adicionales, como viguetas, que podrían ser de acero o guadua con el fin de mantener la uniformidad de la estructura y no añadir mayor peso.

Tabla 4-7 Chequeo de carga para estructuras de entrepiso según sus usos.

ENTREPISOS						
ZONA	CARGA VIVA	ADICIONAL	Combinación	L	S	CHEQUEO
Balcones	500 Kg/m ²	80 Kg/m ²	580 Kg/m ²	3.00 m	0.50 m	OK
Cuartos privados	180 Kg/m ²	50 Kg/m ²	230 Kg/m ²	3.00 m	1.20 m	OK
Corredores de escaleras	300 Kg/m ²	50 Kg/m ²	350 Kg/m ²	3.00 m	0.80 m	OK
Salón de clase	200 Kg/m ²	60 Kg/m ²	260 Kg/m ²	3.00 m	1.10 m	OK
Almacenaje Liviano	600 Kg/m ²	25 Kg/m ²	625 Kg/m ²	3.00 m	0.45 m	OK

La Tabla 4-7 condensa los potenciales usos que puede tener la estructura de GA con 3 metros de luz y las relaciona con las distancias máximas entre cerchas (S) para que esta cumpla con los requerimientos de deflexión de la NSR10.

En el caso de los balcones se requiere una unión que garantice la transmisión total del momento generado en el extremo sujeto a la estructura, o bien hacer uso de

tensores o ménsulas y pie de amigos que estabilicen la estructura y garanticen su condición de equilibrio.

Otra alternativa sería utilizar elementos continuos que se prolonguen para cubrir el voladizo. Este uso debe ser analizado más al detalle, pues esta investigación no cubrió ningún efecto o análisis de flexión en las estructuras.

4.5.3 USO COMO PUENTES EN ZONAS RURALES

Otra alternativa para estas estructuras es ser utilizadas como soporte de tableros para el uso peatonal en caminos rurales, trochas y zonas de vereda apartadas; o en general, lugares donde la topografía del terreno hace que la mejor o única alternativa para desplazamiento sean los caminos de herradura trazados lo largo de los años.

Para esto se realizó el modelamiento de la estructura (Figura 4.12) compuesta por cuatro cerchas, para cubrir una luz de 6 metros, en un puente de 1.2 metros de ancho, aceptada por la norma como una distancia apta para el tránsito en escaleras (Aparte K.3.8.3.3 de la NSR10).

El modelamiento se realizó después de realizada la calibración teórica de la rigidez. Con esto se quiso garantizar que los resultados teóricos fueran lo más parecidos posibles al comportamiento real de la estructura.

El modelo del puente se compuso con la estructura de 6 metros de luz y 4 cerchas ubicadas de manera paralela, cada una distanciada a 40 cm de eje a eje de la cercha adyacente.

Esta distancia entre cerchas se obtuvo de cálculos donde se consideraron el valor de ancho aferente requerido para que la estructura logre soportar la carga de condiciones normales de servicio y tomando como referencia las cargas alcanzadas durante la prueba experimental.

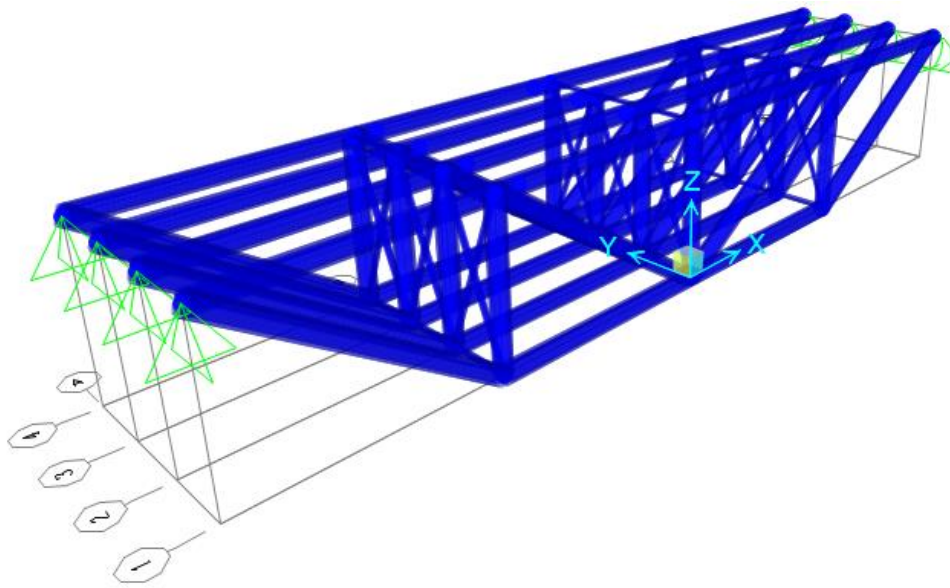


Figura 4-15 Vista en tres dimensiones de la modelación del puente en guadua con luz de 6 m.

4.5.3.1 CONSIDERACIONES

Se consideró un tablero en madera, con 50 mm de espesor y un peso de 25 kg/m^2 según la norma colombiana de construcción.

Se modeló con una carga viva sobre el tablero de 500 kg/m^2 (American Concrete Institute (ACI), 2004) equivalente a la carga peatonal, sugerida por la ACI y la ASCE para el análisis y diseño de puentes peatonales en concreto reforzado.

Para la estabilidad lateral de la estructura se consideraron en el modelo elementos de guadua tipo lata formando un entramado en equis (X) entre cercha y cercha desde la cuerda superior hasta la cuerda inferior.

Dicho entramado se utilizó con base en pruebas previas del grupo de investigación de Biomecánica.

4.5.3.2 RESULTADOS

Las deflexiones fueron obtenidas para cargas de servicio, como sugiere la norma de construcción colombiana, considerando únicamente carga muerta y carga viva. En la carga viva se incluyeron el peso propio de la estructura más el peso de tablero de madera.

Para la combinación de cargas de servicio, la deflexión máxima en el centro de la luz fue de 21.3 mm, menos de una pulgada, valor que se encuentra dentro de rango de deflexión obtenido experimentalmente.

Es decir, en términos generales el comportamiento de un puente peatonal que abarque una luz de 6 metros construido en guadua tiene un comportamiento sobresaliente para las cargas típicas de este tipo de estructuras.

Al considerar 500 kg por cada metro cuadrado dentro de una zona rural se alcanzan a cubrir gran parte de los usuarios típicos que podrían llegar a transitar el puente en alguna eventualidad, lo que significa que en este caso dicha consideración de carga viva tan elevada permite tener un margen de seguridad extra para la estructura.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES DE LA INVESTIGACIÓN

La implementación de las abrazaderas metálicas para la construcción de uniones mecánicas para elementos de GA ha demostrado ser una alternativa viable y acertada con gran potencial de mejorar el desempeño y eficiencia en la construcción de estructuras de guadua. Los prototipos probados mostraron una resistencia adecuada pero fueron demasiado flexibles debido a deslizamientos menores de las abrazaderas que le restaron rigidez a todo el conjunto.

Este sistema de unión por abrazaderas permite utilizar y aprovechar las bondades de guadua sin perjudicar la integridad del material, pues no requiere de perforaciones para su ajuste, y además este tipo de unión no limita la altura de la cercha, siendo así una alternativa versátil, pues cuenta con diversas posibilidades de uso.

Las uniones usadas no agregan mucho peso a las estructuras, diferente al peso por inyección de mortero en las uniones tradicionales. Este aspecto se evidenció durante la construcción de los cuatro prototipos de 3 m y 6 m de longitud, puesto que ninguno de estos excedió los 10 kg/m de peso, pese a estar compuestos por más de 7 metros lineales de GA, más de 28 piezas metálicas en acero y más de 56 tornillos y tuercas.

Es decir, el aporte de peso del acero es despreciable (aprox. 8,97%) puesto que los elementos ya contruidos pueden ser manipulados y montados sin problema alguno por dos personas. Esto implica que este sistema se adapta fácilmente para el control y programación de obra y maquinaria. Son elementos resistentes pero livianos y su manipulación se hace más simple, con lo cual se reducen los tiempos de obra, desde el transporte hasta la ubicación en sitio.

Debido a que las abrazaderas basan su funcionamiento en el agarre y ajuste por fricción sobre los elementos de la estructura se pueden utilizar para producir elementos modulares. Por un lado los anillos ya fueron diseñados en juegos (Benítez, 2017) para cubrir un rango amplio de diámetros de los culmos. Al estandarizar las piezas se hace más simple su utilización y se reducen los errores típicos de la manipulación de nuevas técnicas.

En la construcción con guadua, gracias al uso de abrazaderas para las conexiones, puede reducirse notablemente la aparición de errores y simplificarse la tarea de construcción con dicho material. Para realizar los montajes no fue necesario un entrenamiento intensivo

El uso de abrazaderas de acero hace más sencillo el trabajo y no requiere de conocimientos especiales para la producción de estructuras complejas. Sólo se necesitan los planos con detalles básicos y con información suficiente, tal como se requiere comúnmente en cualquier obra de construcción.

En términos generales el sistema funcionó a satisfacción y logró superar las expectativas planteadas al principio de la prueba, ambas propuestas son susceptibles a mejoras y principalmente, la estructura de 6 metros, tiene potencial para convertirse en elementos modulares para formar estructuras con luces mayores, pues al componerse de culmos es más fácil ajustar la longitud y alcance de sus uniones pues no se requiere perforar el material.

El sistema demostró tener potencial para usarse para la construcción de variadas estructuras, especialmente para puentes peatonales (cercha de 6 m) y el uso en vivienda de uno o dos pisos (cercha de 3 m), donde las exigencias de carga son menores con respecto a otras estructuras consideradas. No obstante, es necesario emprender otros estudios encaminados a mejorar la rigidez de las uniones para tener un mejor aprovechamiento del material.

Ambas estructuras, tanto de 3 metros como 6 metros, presentaron un comportamiento adecuado, puesto que lograron mantenerse dentro de su rango elástico mientras avanzaban las pruebas, incluso, la estructura de 3 metros que superó las dos toneladas de carga aplicada sin mayores implicaciones en su integridad estructural, está en capacidad de soportar las solicitaciones de carga de vivienda unifamiliar y tráfico moderado en zonas rurales sin mayores complicaciones.

5.2 RECOMENDACIONES

Se recomienda realizar investigaciones para la utilización y creación de elementos y piezas modulares estandarizadas para diferentes tipos de unión, evaluando su desempeño y viabilidad para aumentar las posibilidades de adaptabilidad durante el montaje.

Se recomienda realizar ajustes para aumentar la rigidez del conjunto. En particular, sería deseable incluir un pre-esfuerzo en las diagonales a tracción con el fin de asentar las uniones y aumentar la rigidez.

También es recomendable la construcción y prueba de elementos de GA o acero, incluso, que puedan usarse como arriostramiento lateral para las cerchas propuestas. Es necesario añadir estabilidad lateral a las estructuras para que

puedan funcionar dentro de un sistema estructural de mayores dimensiones, bien sea como cubierta, losa de entrepiso o puente peatonal.

Se recomienda la prueba de prototipos de 6 metros con elementos adicionales que contribuyan a la rigidización de las conexiones para evitar las pérdidas de rigidez debido a reajustes del sistema y aumentar la capacidad de carga y deflexión de las estructuras. Una alternativa sería usar cartelas o platinas que rigidicen los conectores.

Aún es necesario proponer los apoyos y conexiones para la estructura en sus diferentes usos (vivienda y puentes), debido a que se consideran materiales distintos a la GA para los elementos portantes es necesario diseñar una unión adicional con o sin abrazaderas que garantice la transmisión de cargas entre los elementos y la estabilidad de la estructura.

Se deben realizar estudios orientados a mejorar la rigidez de las uniones, Una alternativa sería utilizar cartelas a los lados de los culmos, con lo cual se reduce la flexibilidad causada por las excentricidades de las platinas metálicas de unión usadas en los prototipos de este proyecto. Para ello, es necesario desarrollar otros tipos de abrazaderas que puedan ser conectadas lateralmente, en planos ortogonales a los de las orejas.

6. BIBLIOGRAFÍA

- American Concrete Institute (ACI). (2004). Analysis and design of reinforced concrete bridges structures. *ACI-ASCE Committee 343* (pág. 158). American Concrete Institute (ACI).
- BANCO MUNDIAL. (2015). *Perspectivas de la urbanización mundial de las Naciones unidas (ONU)*. Washington D.C.
- Beer, F., DeWolf, J., Mazurek, D., & Russel Jhonston, E. (2009). *Mecánica de materiales: Quinta edición*. Ciudad de México: McGraw Hill.
- Benítez, C. (2017). *Comportamiento mecánico de culmos de guadua angustifolia ajustados con abrazaderas metálicas, Trabajo de grado*. Santiago de Cali: Universidad del Valle.
- Camacho, V., & Páez, I. (2002). Estudio de conexiones en guadua solicitadas a momento flector. *Tesis en ingeniería civil*. Bogotá, Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
- Carvajal, W., Ortegón, W., & Romero, C. (1981). *Elementos estructurales en bambú, Trabajo de grado*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Clavijo, S., & Trujillo, J. (2000). *Evaluación de uniones a tracción en guadua, Trabajo de grado*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia, Facultad de ingeniería, Departamento de Ingeniería civil.
- Diario EL PAÍS. (2014). Sector de la construcción, gran protagonista del aumento del PIB en Colombia. *El País Cali*, pág. Economía 1.
- García, J., Rangel, C., & Ghavami, K. (2012). Experiments with rings to determine the anisotropic elastic constants of bamboo. *Construction and Building Materials* 31, 52-57.
- Garzón, J. (1996). Optimización de estructuras en guadua. *Trabajo de grado en Arquitectura*. Bogotá, Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
- Gere, J., & Goodno, B. (2009). *Mecánica de materiales: Séptima edición*. Ciudad de México: Cengage Learning.
- Ghavami, K., & Marinho, A. B. (2005). *Propiedades físicas e mecânicas do colmo inteiro do bambu da espécie Guadua Angustifolia*. Brasil: Revista brasileira da engenharia agrícola e ambiental 9, 107-114.

- GrowingBuildings. (05 de Mayo de 2015). *Construcción y emision de CO2 a la atmosfera*. Obtenido de Growingbuildings sitio web:
<http://growingbuildings.com/construccion-y-emisiones-co2-a-la-atmosfera/>
- Hammond, G., & Jones, C. (2011). *INVENTORY OF CARBON & ENERGY (ICE) Version 2.0*. Bath, Inglaterra: Universidad de Bath.
- Liese, W. (1998). *The Anatomy of Bamboo Culms. INBAR Technical Report N 18*. Beijing: International Network for Bamboo and Rattan, 204 pp.
- Londoño, X. (2002). *Caracterización antómica del culmo de Guadua Angustifolia Kunth, Poaceae, Bambusoideae*. Armenia: Fundación Nacional de la Guadua, Fundeguadua; pp 12-27.
- Martín, J., & Mateus, L. (1981). *Determinación de la resistencia a compresión paralela a la fibra de guadua de castilla, Trabajo de Grado*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Morán, R., Benítez, C., Silva, H. F., & García, J. J. (2016). Design of steel connectors for structural bamboo members. *Tercer Congreso Internacional sobre Tecnologías Avanzadas de Mecatrónica, Diseño y Manufactura (AMDM2016)*, (pág. 12).
- NSR10, Min. ambiente, vivienda y desarrollo territorial. (2010). *Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente (NSR-10)*. Bogotá.
- NTC 5407, ICONTEC. (2006). *NTC 5407, Uniones de estructuras con Guadua angustifolia Kunth*. Bogotá.
- Obermann, T., & Laude, R. (s.f.). *Bambú: Recurso sostenible para estructuras espaciales*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia.
- Orozco, A., Villegas, L., & García, J. J. (2014). *Mechanical behavior of bamboo species Guadua Angustifolia under compresión along the thickness of the culm*. Santiago de Cali: Key Eng. Mater 600. 49-56.
- Peña, C., & Rodríguez, H. (1997). *Propuesta de uniones mecánicas para estructuras en guadua*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Rangel, C., García, J., & J. (2012). *Propuesta de unión empernada con ajuste radial para estructuras de bambú*. Santiago de Cali: Universidad del Valle.
- Redacción El Tiempo. (26 de Agosto de 2000). *GUADUA DE QUINDÍO PARA EL MUNDO. Periódico el Tiempo*.
- Roach, M. (1996). *Bamboo solution: Discover*. 93-96pp, 1999. *Embodied energy in residential property development*. 18 pg.

- Takeuchi, T. (2004). *Comportamiento estructural de la guadua angustifolia. Uniones en guadua*. Palmira: Ingeniería e investigación 24. 3-7.
- Valencia Hernández, J. E. (2018). *Diseño y evaluación de un puente peatonal de Guadua angustifolia Kunth*. Santiago de Cali: Universidad del Valle.
- Van der Lugt, P., Van der Dobbelsteen, A., & Janssen, J. (2006). *An environmental, economic and practical assessment of bamboo as a building material for supporting structures*. Construction and building materials.
- Villegas, L., Morán, R., & García, J. (2015). A new joint to assemble light structures of bamboo slats. *Construction and Building Materials* 98, 61-68.
- Villegas, M. (1996). *Bambusa guadua "Colección la cultura del café"*. Bogotá: Villegas editores.
- Villegas, M. (2005). *Guadua: Arquitectura y diseño*. Bogotá: Villegas editores.
- Yoh, S. (1989). *Elastic architecture*. Electronic Document:
<http://www.jade.dti.ne.jp/shoeiyoh/Essay/Elastic%20ARCHITECTURE.pdf>.