

CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE PANELES DE LATAS DE *GUADUA ANGUSTIFOLIA KUNTH*

TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERA CIVIL

ANGIE MARCELA MONTENEGRO MUÑOZ



UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL Y GEOMÁTICA
PROGRAMA ACADÉMICO DE INGENIERÍA CIVIL
SANTIAGO DE CALI, COLOMBIA
JUNIO 2020

CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE PANELES DE LATAS DE
GUADUA ANGUSTIFOLIA KUNTH

ESTUDIANTE:

ANGIE MARCELA MONTENEGRO MUÑOZ

DIRECTOR:

Ph.D., ING. JOSÉ JAIME GARCÍA ÁLVAREZ

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:

DESARROLLO DE PREFABRICADOS DE GUADUA

GRUPO DE INVESTIGACIÓN:

BIOMECÁNICA

UNIVERSIDAD DEL VALLE

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL Y GEOMÁTICA

PROGRAMA ACADÉMICO DE INGENIERÍA CIVIL

SANTIAGO DE CALI, COLOMBIA

JUNIO 2020

NOTA DE ACEPTACIÓN:

El presente trabajo de grado fue aprobado por el director del programa académico, el director de investigación y los jurados.

MANOLO GALVÁN CEBALLOS Ph.D.,
Director del Programa Académico de Ingeniería Civil.

RICARDO RAMÍREZ GIRALDO M.Sc.,
Universidad del Valle
Jurado.

RICHARD MORÁN PERAFAN Ph.D.,
Universidad Mariana
Jurado.

JOSÉ JAIME GARCÍA Ph.D.,
Universidad del Valle
Director de Trabajo de Grado

Ciudad y Fecha

Agradecimientos

Agradezco infinitamente a mi familia, por su apoyo incondicional en el desarrollo de mis proyectos. A mis padres, Martha y Jairo, que con los sacrificios realizados, me han enseñado que la educación es el mejor y más maravilloso regalo. A mi abuela Teresa, por tenerme en sus oraciones todos los días y siempre buscar el bien de la familia. Y a mi tío Jose Miguel, quien desde la distancia siempre me ha acompañado y ha sido ejemplo de determinación y perseverancia. Este logro es en honor de todos ellos.

Quiero agradecer al profesor José Jaime García, por su apoyo, acompañamiento y especial paciencia, sin duda su respaldo e ideas me permitieron desarrollar este proyecto.

Agradezco a mis compañeros de Biomecánica: Álex, Paula, Camilo, Jenny y Jorge, quienes me enseñaron la importancia de trabajar en equipo.

Gracias a mis amigos de carrera por tantas experiencias, aquellas que dejaron un maravilloso recuerdo de nuestro paso por la academia. Agradezco en especial a mi amigo Mauricio Marín, quien fue incondicional durante este proceso.

Agradezco con cariño al laboratorio LABISPA, en especial a Don Carlos y Don Noé, dos seres inigualables siempre dispuestos a ayudar. Y también al laboratorio MAPACHE, al profesor Rogger y a Pedro, por su valiosa disposición y colaboración.

Gracias a mis compañeros de GRACA, Manye y Herney. Su acompañamiento fue de vital importancia en la culminación de este documento.

Quiero agradecer a mis vecinos: Wendy, Andrea, Saidy, Esteban y Daniel, por hacerme sentir en familia y brindarme su apoyo en el momento indicado.

Y un agradecimiento especial a la Universidad del Valle, mi segundo hogar.

Resumen

La industria de la construcción genera elevados niveles de contaminación a nivel global, ante esta problemática ambiental nace la construcción sostenible. En este sentido, la sostenibilidad implica desarrollar alternativas constructivas que generen el menor impacto mediante el empleo de materiales que armonicen con el ambiente. Uno de esos materiales es la *Guadua angustifolia Kunth* (GAK) que tiene una tasa de crecimiento y alta resistencia que la convierten en un material idóneo para ser empleado en construcciones sostenibles. No obstante, aún falta investigación y normalización del empleo de este material.

Con el objetivo de encontrar formas de aprovechamiento estructural de la GAK, esta investigación estuvo orientada hacia la creación y caracterización de paneles de latas de guadua. Estas latas resultan del corte del culmos que no cumplen con los requisitos normativos colombianos y terminan como desecho.

Para lo anterior, se diseñaron y evaluaron teóricamente diez configuraciones de paneles de latas, de los cuales se seleccionaron tres modelos que fueron ensayados experimentalmente ante carga lateral y axial. En las pruebas se determinó la carga máxima, la rigidez lateral y la carga crítica de pandeo, valores que permitieron caracterizar el comportamiento mecánico de cada panel. Se observó que uno de los tres paneles presentó mejor respuesta respecto a los otros dos.

Después, se analizó teóricamente el comportamiento de paredes de culmos reforzados con los paneles de guadua desarrollados. Posteriormente, se hizo un análisis preliminar para verificar la deriva de una aplicación de los módulos reforzados en una estructura de dos niveles, para un resultado de deriva inferior al 1%. Finalmente, se establecen recomendaciones para el uso de los paneles que pueden ser prefabricados y usados en estructuras modulares. Se espera que los resultados de este proyecto sirvan de base para la evaluación experimental de muros reforzados. Además, estos paneles se podrían usar en otras aplicaciones para incrementar la rigidez de diversos elementos estructurales como vigas de celosía.

Contenido

Ítem	Página
Agradecimientos	4
Resumen	5
Contenido	6
Listado de Tablas.....	8
Listado de Figuras	9
Capítulo 1. Marco teórico	15
1.1. Guadua <i>angustifolia</i> Kunth	15
1.1.1. Descripción general	15
1.1.2. Secciones del culmo de guadua	15
1.1.3. Beneficios ambientales	16
1.2. Propiedades mecánicas de la guadua	16
1.2.1. Estructura de la planta	16
1.2.2. Propiedades mecánicas	18
1.3. Latas de guadua <i>angustifolia</i> Kunth	19
1.4. Estudios previos	20
1.5. Unión de latas de guadua	22
1.6. Módulos de pared de culmos de GAK	24
1.7. Parámetros estructurales	26
1.7.1. Carga crítica de pandeo	26
1.7.2. Carga máxima	27
1.7.3. Rigidez	27
1.7.4. Ductilidad	27
Capítulo 2. Diseño y modelado	28
2.1. Análisis preliminar	28
2.2. Modelación	30
2.2.1. Preliminares	30
2.2.2. Modelación de paneles	32
2.2.3. Resultados	34
2.3. Criterios y selección de alternativas	35

	7	
Capítulo 3. Evaluación experimental	37	
3.1. Construcción de paneles		37
3.2. Ensayos		43
3.2.1. Ensayo de carga lateral	43	
3.2.2. Prueba a compresión simple	45	
3.2.3. Resultados y características de falla	48	
3.2.3. Modelos	55	
Capítulo 4. Consideraciones y recomendaciones de uso.	59	
4.1. Uso para rigidizar módulos de pared		59
4.1.1. Modelación	60	
4.1.2. Resultados.....	62	
4.2. Verificación preliminar de deriva para dos niveles		64
4.2.1. Características generales.....	64	
4.2.2. Modelo	65	
4.2.3. Resultados.....	66	
4.3. Uso para rigidizar módulos para puentes peatonales		67
4.4. Peso y costo de cada panel		68
4.5. Recomendaciones generales		70
Capítulo 5. Discusión y conclusiones	71	
Bibliografía.....	73	

Listado de Tablas

Ítem	Página
Tabla 1.1. Resumen de propiedades de la Guadua angustifolia Kunth	18
Tabla 1.2. Resultados de los ensayos de caracterización.	23
Tabla 1.3. Características de los módulos ensayados y resultados experimentales	25
Tabla 2.1. Dimensiones del muro	29
Tabla 2.2. Propiedades de la guadua Angustifolia Kunth	30
Tabla 2.3 Desplazamiento ante carga lateral	31
Tabla 2.4 Carga crítica de pandeo	32
Tabla 2.5. Características de cada configuración.	35
Tabla 2.6. Evaluación de cada configuración mediante matriz de decisión. Entre paréntesis factor de peso de cada criterio.	36
Tabla 3.1. Longitud de cada elemento.....	39
Tabla 3.2. Número de elementos de cada configuración.....	39
Tabla 3.3. Reumen de espesores y humedad por cada configuración.	43
Tabla 3.4. Descripción de falla por configuración	50
Tabla 3.5. Propiedades empleadas en el modelo [18], [25].....	55
Tabla 3.6. Espesor promedio de latas por configuración empleadas en el modelo.	56
Tabla 3.7. Rigidez experimental vs teórica	56
Tabla 3.8. Ajuste de rigidez teórica.....	57
Tabla 4.1. Diferencia de rigidez respecto a MB para cada muro de acuerdo con el tipo de panel ensamblado.	63
Tabla 4.2. Resultado de análisis de carga lateral para las dos condiciones.	65
Tabla 4.3. Resultados de deriva para las dos condiciones.....	66
Tabla 4.4. Peso y costo por configuración, ML (metro lineal).....	69

Listado de Figuras

Ítem	Página
Figura 1.1. Tramos en que se divide la guadua.	15
Figura 1.2. Uso del rizoma por el arquitecto Simón Vélez [12].	16
Figura 1.3. (a) Zonas del culmo de bambú y (b) Sección transversal del culmo de bambú y su estructura interna.(Adaptación) [14].	17
Figura 1.4. Direcciones en la pared del culmo de guadua [21].	18
Figura 1.5. Proceso de corte para obtener latas de guadua [26].	19
Figura 1.6. Reconstrucción de cámara funeraria [30].	20
Figura 1.7. Detalle de la unión de latas de guadua [20].	21
Figura 1.8. Malla de bambú [28].	21
Figura 1.9. Malla de bambú, unión encerrada (a), Unión (b).	22
Figura 1.10. Unión propuesta para la conexión de dos latas orientadas a 90° [27].	23
Figura 1.12. Ensayos de caracterización de la unión. (a) Carga perpendicular a las fibras y (b) Carga paralela a las fibras. Ensayos e ilustraciones realizadas por Laura Villegas [27].	23
Figura 1.13. Características de la unión desarrollada por Villegas et al [27].	24
Figura 1.14. (a) Dimensiones globales del módulo en cm y (b) Módulos ensayados [32].	25
Figura 1.15. Uniones de los módulos. (a) unión a momento, (b) unión con abrazadera y (c) unión tradicional.	25
Figura 1.16. Pandeo de una columna esbelta debido a una carga P [33].	26
Figura 1.17. Ejemplo de curva de carga-desplazamiento para conexiones [34].	26
Figura 2.1. Propuestas del uso de paneles.	28
Figura 2.2. Muros de culmos de Guadua.	29
Figura 2.3. Configuraciones preliminares.	29
Figura 2.4. Sistema de coordenadas.	30
Figura 2.5. Columna en condición libre – empotrada.	32
Figura 2.6. Puntos de apoyo y carga para cada configuración.	33

	10
Figura 2.7. Carga crítica de Euler (N).	34
Figura 2.8. Rigidez lateral.	34
Figura 3.1. Configuraciones de prueba.....	37
Figura 3.2. Corte de culmos de guadua en latas. (a) Estrella, (b) paso de la estrella y (c) pulimiento de las latas.	38
Figura 3.3. Denominación de cada elemento.	38
Figura 3.4. Fabricación de platinas curvas (a) perforación de cada sección, (b)-(c) curvado de platinas y (d) resultado final.	40
Figura 3.5. (a) Latas con las dimensiones requeridas y (b) perforación de las latas.	40
Figura 3.6. Esquema de Medidas ángulo recto (unidades en mm).....	41
Figura 3.7. Las latas resaltadas de un mismo color indican la unión de los elementos internos de cada configuración.	41
Figura 3.8. (a) Ensamble de los paneles, (b) y (c) paneles ensamblados.	42
Figura 3.9. Configuración de ensayo a carga lateral del panel.....	44
Figura 3.10. (a) Perfil sujeto al marco y (b) platina de sujeción.	44
Figura 3.11. (a) Ejes guía de desplazamiento, (b) Montaje experimental y (c) Montaje Gato-Celda.	45
Figura 3.12. Configuración del panel a carga vertical.....	46
Figura 3.13. (a) Montaje carga de compresión, (b) Configuración superior del montaje y (c) configuración inferior del montaje.	47
Figura 3.14. (a) Calibración con anillo de carga y (b) Ubicación de la cinta métrica.....	48
Figura 3.15. Curvas de carga vs desplazamiento lateral.....	49
Figura 3.16. Fuerza máxima para carga lateral y promedio.	49
Figura 3.17. Rigidez inicial lateral.	50
Figura 3.18. Modos de falla. a) Doble de lata, b) desgarre de elemento horizontal, c) agrietamiento en zona nodal y d) doblez por aplastamiento de diagonal.	51
Figura 3.19. Forma del panel después de la prueba. Lata vertical izquierda en rojo.	52
Figura 3.20. Gráficas de carga vertical vs desplazamiento para cada grupo de configuración.	53
Figura 3.21. Fuerza máxima para cada configuración.....	53

	11
Figura 3.22. Carga crítica de pandeo.....	54
Figura 3.23. Deflexión horizontal.....	54
Figura 3.24. Modos de falla presentados en algunas configuraciones.	55
Figura 3.25. Desfase de los elementos del panel. Configuración C- III.....	56
Figura 3.26. Contorno de desplazamientos para la configuración C – III ante una carga de 4846 N y ajustado con $E_{33} = 13900$ MPa.	57
Figura 3.27. Carga crítica de pandeo teórica para cada configuración. (a) C – I, (b) C – II y (c) C – III.	58
Figura 3.28. Carga crítica de pandeo teórica y experimental.	58
Figura 4.1. Esquema de panel ensamblado en muros de culmos de guadua. Unión tipo VI modificada (círculo rojo). (Unidades en mm).	59
Figura 4.2. Detalle de conexión propuesta para el ensamble panel – muro.	60
Figura 4.3. Muro con paneles y conexión lata – culmo.....	61
Figura 4.4. Muros de culmos de guadua con paneles de latas en diferentes disposiciones. Panel: Configuración C - III.	62
Figura 4.5. Rigidez por cada configuración muro – panel.	62
Figura 4.6. Desplazamiento horizontal de muro MP5, panel C – II para una carga de 4000 N.	63
Figura 4.7. Módulo tridimensional base para vivienda modular prefabricada basado en módulos de pared con uniones a momento [32].	64
Figura 4.8. Distribución de cargas y apoyo para las condiciones A y B.	66
Figura 4.9. Contorno de desplazamiento para los dos modelos (a) Condición A y (b) Condición B. Unidades en mm.....	67
Figura 4.10. Propuesta de uso en puente peatonal (unidades en mm).	67

Introducción

El bambú es una planta con características únicas que le han ameritado un papel importante en el desarrollo de las civilizaciones. Este tipo de gramínea se encuentra en la mayoría de continentes - África, Asia, América y Oceanía-, especialmente en las regiones tropicales y templadas [1]. Esta planta presenta un rápido crecimiento, que llega a ser hasta de 1,2 m por día para algunas especies [2]. Otra de las propiedades del bambú es su aporte en la reducción de los gases de dióxido de carbono, responsables del calentamiento global, ya que algunas especies de esta planta pueden capturar hasta 12 Ton de CO₂ por hectárea [3].

Una de las especies de bambú más importantes de América Latina es la *Guadua angustifolia Kunth* (GAK). Esta especie nativa de Colombia, Venezuela y Ecuador se ha destacado como una de las 20 mejores especies del mundo gracias a sus excelentes propiedades físico-mecánicas, especialmente por su relación resistencia/peso y versatilidad, que la hace un material idóneo para construcciones sismo-resistentes [4].

La construcción con guadua presenta un bajo impacto ambiental, ya que los niveles de contaminación debidos al proceso de transformación son bajos [5]. Lo anterior resulta ser una gran ventaja al compararse con la industria de la construcción convencional, en la cual se presenta un gran consumo de recursos naturales; de acuerdo con Acevedo et al [6], el 40% de las materias primas del mundo se destinan a este sector junto con el 17% del agua potable, el 10% de la tierra y el 25% de la madera cultivada.

Gracias a las propiedades de esta planta y a la trayectoria constructiva en algunas zonas de Colombia como el eje cafetero, las construcciones con guadua fueron incluidas en el título G del reglamento NSR10 [7]. En esta norma se presentan los requisitos para el diseño estructural y sismo resistente de estructuras de *Guadua angustifolia Kunth*. Sin embargo, hay limitaciones en cuanto al uso del culmo ya que estos no pueden presentar desgaste, alta conicidad, desviaciones en su longitud o agrietamientos iguales o mayores al 20 %.

Lo anterior incrementa el desperdicio del material, sin embargo, de los culmos defectuosos se pueden obtener latas, que son los listones que resultan mediante cortes longitudinales. Actualmente, estas latas se usan en su mayoría como elementos decorativos, no obstante, su geometría es idónea para la creación de elementos que puedan aportar resistencia y rigidez a la estructura.

Por consiguiente, es conveniente realizar una completa caracterización de sistemas estructurales con latas de guadua para aprovechar mejor el material. Para ello, la presente propuesta plantea el desarrollo y caracterización estructural de paneles conformados por latas de *Guadua angustifolia Kunth*. Estos paneles pueden ser usados a su vez para complementar otras estructuras modulares, como paredes para viviendas de interés social.

Objetivos

Objetivo general

Caracterizar el comportamiento estructural de paneles de latas de *Guadua angustifolia Kunth*.

Objetivos específicos

- Diseñar y evaluar teóricamente al menos cinco prototipos de paneles de latas de GAK.

Para llevar a cabo este objetivo se diseñan diversas alternativas y de forma teórica se evalúa su comportamiento. También se analiza la facilidad constructiva.

- Caracterizar experimentalmente el comportamiento estructural de los prototipos escogidos.

Luego de evaluar y definir los prototipos a desarrollar, se realiza la construcción de cada módulo. Se llevan a cabo los ensayos y con base en los resultados se hacen análisis y ajustes.

- Presentar recomendaciones sobre el uso de los paneles.

Partiendo de los resultados experimentales y teóricos, se presentan recomendaciones para el uso de los paneles.

Capítulo 1. Marco teórico

1.1. *Guadua angustifolia Kunth*

1.1.1. Descripción general

La Guadua es una especie de bambú abundante en Colombia, principalmente a lo largo de la Cordillera Central y la zona céntrica del país. Se desarrolla de forma óptima entre los 500 y 1500 m a temperaturas entre 17°C y 26°C y humedad relativa del 80% [8]. El culmo de bambú es de forma cilíndrica hueca y presenta cierto grado de conicidad desde la base hasta el extremo superior. El diámetro del culmo oscila entre los 10 y 18 cm, con un espesor variable en la dirección longitudinal [9]. Además, la altura promedio de la guadua es de 18 m, y puede incluso alcanzar los 30 m de altura [10].

1.1.2. Secciones del culmo de guadua

La guadua está conformada principalmente por el culmo y el rizoma. El tallo o el culmo presenta una forma cilíndrica y hueca separada longitudinalmente por tabiques o nudos. Esta separación puede variar entre 10 y 40 cm dependiendo de la altura. El crecimiento del culmo dura aproximadamente seis meses, luego de esto inicia el proceso de maduración. Entre los tres y seis años la guadua es óptima para emplearse en la construcción, ya que es ahí cuando tiene su mayor resistencia y dureza. La parte alta de la guadua o varillón es descartada para usos estructurales debido a su diámetro reducido (**¡Error! La autoreferencia al marcador no es válida.**) [11].

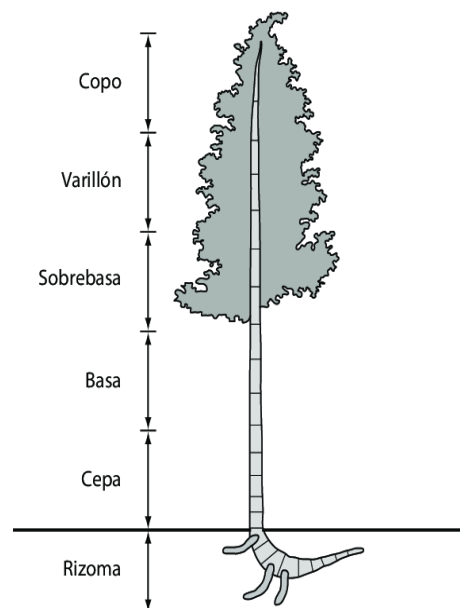


Figura 1.1. Tramos en que se divide la guadua.

El rizoma es la base que presenta un sistema entretejido y de follaje tupido y ligero que ayuda a proteger los suelos de la erosión. El arquitecto Simón Vélez ha empleado esta parte del culmo para diversas aplicaciones estructurales y arquitectónicas, en un intento por maximizar el uso de las diferentes partes de la planta [12] (Figura 1.2).



Figura 1.2. Uso del rizoma por el arquitecto Simón Vélez [12].

1.1.3. Beneficios ambientales

El cultivo de esta planta tiene grandes beneficios como recurso ecológico. Ayuda a regular el medio ambiente, protege el suelo, regula el caudal hídrico gracias a sus raíces, fija rápidamente el CO₂ y sus esbeltos tallos contribuyen al embellecimiento de la región, incentivando el ecoturismo.

Sumado a lo anterior, la guadua ha sido un material natural usado desde la antigüedad en el campo de la construcción. Se caracteriza por ser biodegradable, de resistencia mecánica temprana, renovable y de gran proliferación en Colombia. Gracias a sus innumerables cualidades físicas, la guadua es uno de los materiales constructivos de uso más diversificado, lo que la hace altamente empleada en zonas de escasos recursos económicos en América Latina. Además, gracias a su rápido crecimiento, su uso controlado no representa un peligro para la naturaleza [13].

1.2. Propiedades mecánicas de la guadua

1.2.1. Estructura de la planta

El culmo de guadua presenta dos zonas: la internodal y los nudos naturales (Figura 1.3, a). En la zona internodal, la estructura interna de la planta es similar a la de un cilindro hueco con paredes

fibre reforzadas longitudinalmente. La pared del culmo está formada por una matriz de lignina reforzada con fibras de celulosa, que le aportan rigidez y resistencia al material en la dirección longitudinal (Figura 1.3, b).

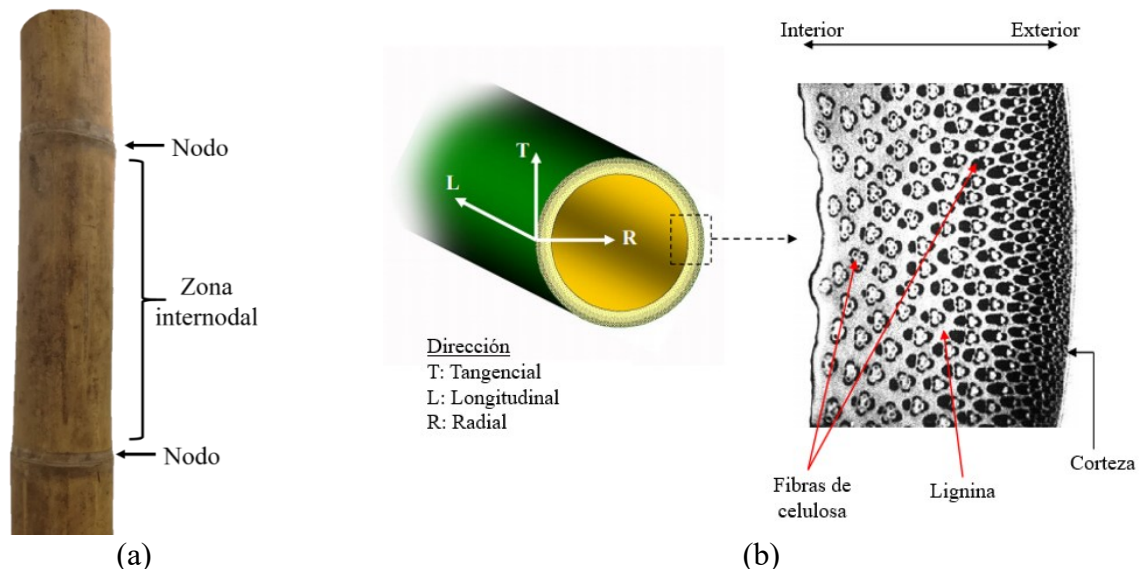


Figura 1.3. (a) Zonas del culmo de bambú y (b) Sección transversal del culmo de bambú y su estructura interna. (Adaptación) [14].

La pared del culmo se considera como un material funcionalmente gradado (FMG, *Functionally Graded Material*), puesto que la densidad de las fibras aumenta desde la parte interna hacia el exterior del espesor [15][16]. Gracias a la estratificación de las fibras, el material es más resistente y rígido en la superficie exterior del tallo, lo que permite un aprovechamiento mecánico más efectivo en aplicaciones estructurales.

Por otro lado, los nudos son refuerzos conformados por tabiques transversales. Algunas investigaciones han mostrado que presentan una distribución aleatoria de las fibras, que conlleva una respuesta mecánica diferente, con propiedades similares en todas las direcciones y un comportamiento prácticamente isótropo [17]. Estos permiten mejorar la resistencia de la pared del culmo.

Además, en análisis realizados por el grupo de biomecánica se ha observado como la presencia de nudos aumenta la resistencia y la rigidez de los culmos de guadua ante carga transversal [18]. Lo

anterior ha sido aprovechado en aplicaciones constructivas, en las cuales se considera la ubicación de los nudos al momento de realizar conexiones o cortes [19].

1.2.2. Propiedades mecánicas

Dada la anatomía interna del culmo, la guadua presenta un comportamiento anisótropo; posee una alta resistencia a tracción en la dirección longitudinal o paralela a las fibras, que puede incluso llegar a ser comparada con la del acero (Figura 1.4) [20]. En las otras direcciones, radial y transversal, la resistencia a la tracción es menor dado que las cargas solo son soportadas por la matriz.

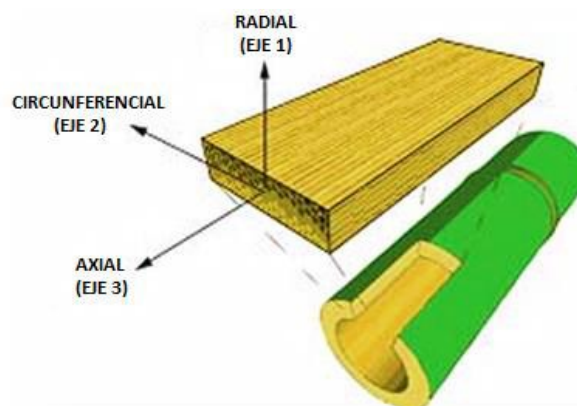


Figura 1.4. Direcciones en la pared del culmo de guadua [21].

Diversas investigaciones se han llevado a cabo con el objetivo de caracterizar el módulo de elasticidad y la resistencia de este material en sus diferentes direcciones, principalmente en la dirección axial [22],[23],[24],[25]. En la Tabla 1.1 se presenta un resumen de los valores encontrados por diversos investigadores.

Tabla 1.1. Resumen de propiedades de la Guadua angustifolia Kunth

Propiedad	Lamus et al, 2015	Luna et al, 2014	Orozco et al, 2014	García et al, 2012
E_{33} (MPa)	16.556	6.540	-	12.100
$E_{11} = E_{22}$ (MPa)	316	560	44.5	398
G_{12} (MPa)	-	-	-	163
G_{13} (MPa)	627	-	-	581
ν_{12}	-	-	-	0.22
$\nu_{31} = \nu_{32}$	0.31	0.35	-	-

Algunos de estos valores han sido obtenidos mediante pruebas basadas en normas del Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC) conjunto la American Society for Testing and Materials (ASTM).

Se observa entonces que la GAK presenta gran resistencia en el sentido longitudinal, comparable con la del acero, lo que la hace un material aprovechable estructuralmente.

1.3. Latas de guadua *angustifolia Kunth*

En general, las construcciones típicas de guadua se llevan a cabo con el culmo entero, más conocido como “guadua rolliza”, que, debido al auge que ha tenido en procesos constructivos desde hace décadas, fue incluido en el reglamento NSR10 [7]. En el título G de esta norma, se establecen los requisitos para el diseño estructural y sismo resistente de estructuras de guadua rolliza. Sin embargo, el mismo reglamento contempla una serie de limitaciones que hacen que algunos culmos no puedan ser empleados, una de ellas es que presenten agrietamientos mayores o iguales al 20% de su longitud. Otras características mencionadas son el desgaste, una alta conicidad o desviaciones en su longitud.

Las latas de guadua surgen como una alternativa para darle un uso y aprovechar los culmos no aptos según la norma. Estas se obtienen al separar en varias partes el culmo de guadua de acuerdo al ancho requerido (Figura 1.5) [8]. Suelen ser empleadas en paredes de bahareque, cerramientos y cercas.

Con las latas de guadua se pueden construir elementos que aporten resistencia y rigidez al sistema, sin incrementar el peso de la estructura. Sin embargo, de acuerdo a la información recolectada, pocos estudios se han orientado a utilizar las latas de guadua con fines estructurales [27],

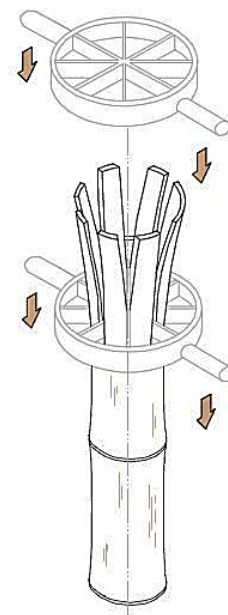


Figura 1.5. Proceso de corte para obtener latas de guadua [26].

[20], [28], [29]. El uso tradicional que se les ha dado a las latas de guadua en las construcciones ha sido, en su gran mayoría, de forma ornamental. Además, aunque en la norma NSR10 aparezca el uso de la guadua rolliza ya caracterizado para conformaciones estructurales, el empleo de sus latas no ha sido estudiado a fondo.

Por lo tanto, resulta conveniente realizar una completa caracterización de los sistemas estructurales con latas de guadua, lo que permitirá un mejor aprovechamiento del material y además, tener una línea de producción completa para la elaboración de elementos estructurales prefabricados.

1.4. Estudios previos

Las latas de guadua han sido empleadas para diversas aplicaciones constructivas como puentes, cerchas, pisos, cubiertas, entre otros. La primera construcción con este material data hace 9.500 años, hallada en la península de Santa Elena, en la costa de Ecuador, como el vestigio de una antigua cámara funeraria (Figura 1.6) [30].



Figura 1.6. Reconstrucción de cámara funeraria [30].

Diversos trabajos de investigación se han llevado a cabo con el objetivo de optimizar el uso de esta gramínea [20][28][31]. Un elemento clave para un buen comportamiento de las estructuras de guadua son las uniones, ya que de estas depende en gran medida la resistencia y durabilidad que pueda tener la estructura.

En una tesis desarrollada en la Universidad Nacional se reportó una unión para la conformación de vigas de latas de guadua [20]. La junta consistió en unir dos latas de guadua a través de un tornillo o puntilla (Figura 1.7), con el objetivo de construir una viga ligera y de fácil transporte de tres

metros de longitud, para instalación de cubiertas, sin embargo resultaron demasiado flexibles. Este proyecto fue uno de los primeros pasos en el empleo de uniones de latas de guadua en estructuras.

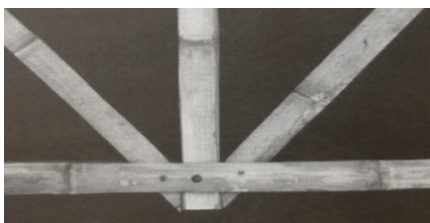


Figura 1.7. Detalle de la unión de latas de guadua [20].

En una investigación llevada a cabo por Vishal et al [28], se realizaron muros con paneles prefabricados de latas de bambú, que posteriormente se rellenaron con una capa de mortero de cemento y se llevaron a ensayos de flexión. Para lo anterior emplearon tiras de bambú en el entretejido con anchos entre 14 y 16 mm con espesores de 3 a 5 mm y latas de bambú en los extremos (Figura 1.8).



Figura 1.8. Malla de bambú [28].

Luego de diversos estudios, Vishal et al [28] observaron cómo este sistema de muros propuestos tenía una alta resistencia y flexibilidad al ser comparado con la de un muro de mampostería. Adicionalmente, el sistema presentó una reducción significativa en su peso y costo frente a los muros tradicionales en ladrillo.

Otra aplicación de la guadua en la conformación de muros la hicieron Herrera, J. y Takeuchi, C. (2008) [31] quienes estudiaron el comportamiento de un pórtico en GAK rigidizado mediante paneles prefabricados de latas de guadua y bahareque ante carga horizontal. En este estudio determinaron la capacidad de disipación de energía y el aporte de rigidez debido a los paneles. Para lo anterior desarrollaron tres tipos de paneles de 0.90 m x 2.00 m con diferente recubrimiento, conformados por un marco en madera tipo Sajo y una estructura interna de diagonales y pies

derechos de guadua. Las uniones de estos elementos se llevaron a cabo mediante el empleo de puntillas de 3 ½” distribuidas en función de los elementos a unir (Figura 1.9, b).

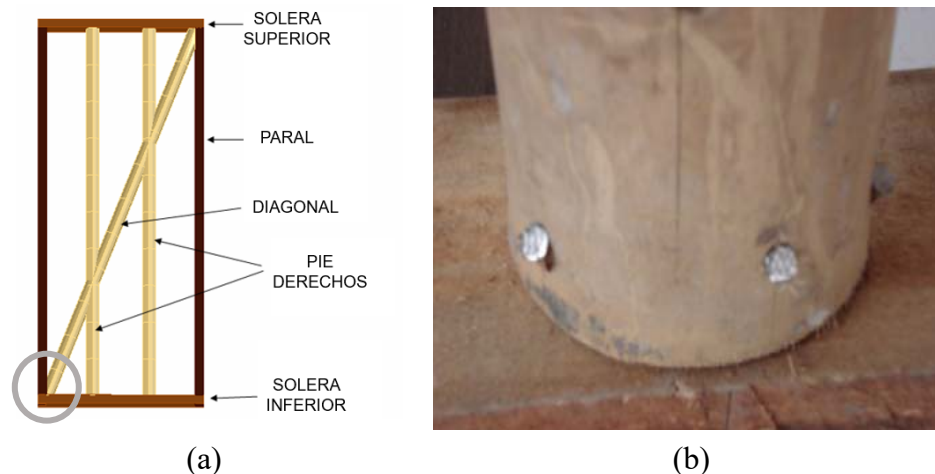


Figura 1.9. Malla de bambú, unión encerrada (a), Unión (b).

Los tres tipos de paneles fueron sometidos a pruebas de carga horizontal. En los resultados de los ensayos se observó que en todos los casos la falla se daba por desgarramiento en la unión sometida a tensión (Figura 1.9, a); a partir de ese momento la rigidez de los paneles disminuía considerablemente. Esta investigación deja en evidencia la importancia que tienen las conexiones en este tipo de elementos de acuerdo con los requerimientos de carga presentados, un punto para tener en cuenta en el desarrollo de los paneles propuestos.

1.5. Unión de latas de guadua

En el 2015, Villegas, et al. [27] desarrollaron una junta para la conexión de latas de guadua (Figura 1.10), que conecta dos latas de guadua por medio de platinas curvas de acero, un perno y una tuerca. La base de esta investigación fue el buen comportamiento que presentó el material al verse sometido a compresión en su dirección radial.



Figura 1.10. Unión propuesta para la conexión de dos latas orientadas a 90° [27].

En la investigación, se realizaron diversos ensayos que permitieron concluir que una junta con compresión radial (CC) aumentaba al doble la resistencia con respecto a una unión sin compresión radial (SC) (Tabla 1.2).

Tabla 1.2. Resultados de los ensayos de caracterización.

Tipo de prueba	Fuerza máxima (N)		Esfuerzo máximo (MPa)	
	CC	SC	CC	SC
Carga perpendicular a las fibras (Figura 1.11, a)	6278	4394	6,35	3,82
Tracción paralela a las fibras (Figura 1.11, b)	6219	3551	7,19	5,09

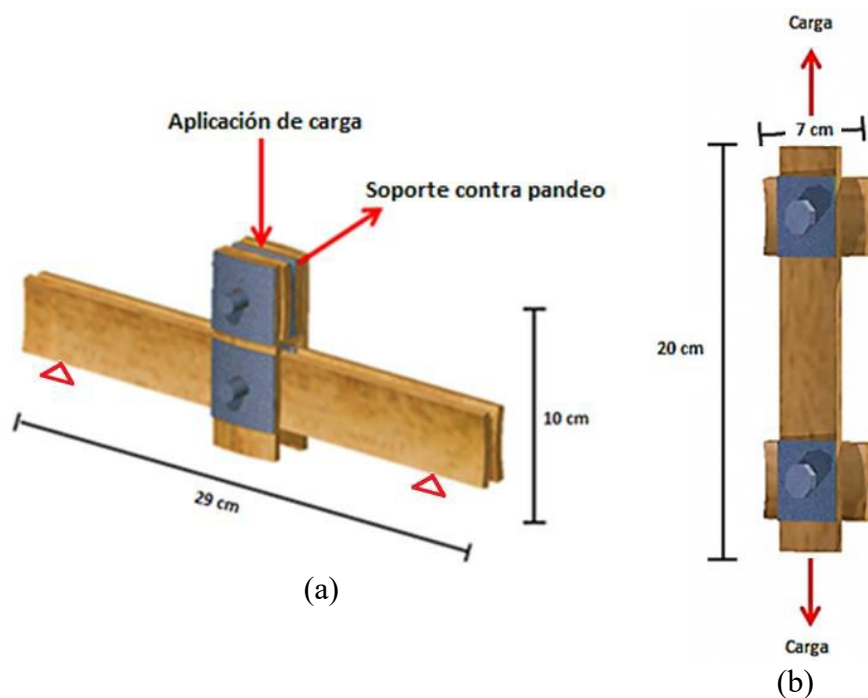


Figura 1.11. Ensayos de caracterización de la unión. (a) Carga perpendicular a las fibras y (b) Carga paralela a las fibras [27].

Con esta unión se sacó provecho de la ductilidad radial que presenta la guadua, al generar conexiones con un gran aporte a la resistencia de la estructura en la cual se implementen. Este tipo de unión fue la empleada para ensamblar los paneles de latas, la cual presentó las características descritas en la Figura 1.12.

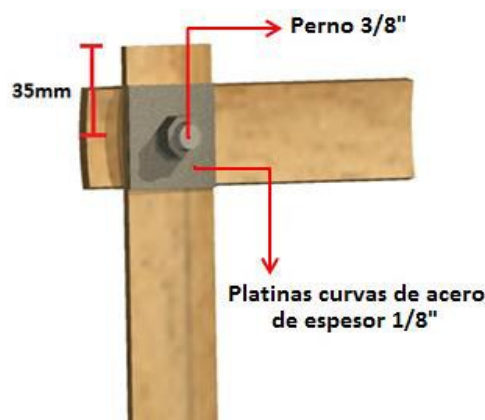


Figura 1.12. Características de la unión desarrollada por Villegas et al [27].

La anterior investigación es un gran paso en el empleo de latas de guadua para sistemas estructurales, ya que permite darle mayor uso a esta sección del culmo, lo que potencializa sus propiedades. Se han encontrado grandes ventajas en su empleabilidad; una de las principales es la reducción notable del peso de la edificación en relación con su resistencia.

1.6. Módulos de pared de culmos de GAK

En la tesis de doctorado del ingeniero Moran R., titulada “Desarrollo de juntas con precompresión transversal para culmos de guadua *Angustifolia kunth*” [32], se evaluó de forma preliminar el comportamiento de módulos de pared contruidos con culmos de GAK y abrazaderas metálicas en las conexiones. En la Figura 1.13 se presentan las dimensiones y el módulo de pared ensamblado.

Los módulos presentaron las mismas dimensiones globales y fueron ensayados ante carga monotónica. Tres de estos módulos estaban arriostrados con diagonales y dos con uniones a momento. En la Tabla 1.3 se presenta un consolidado con las características de cada módulo y los resultados experimentales.

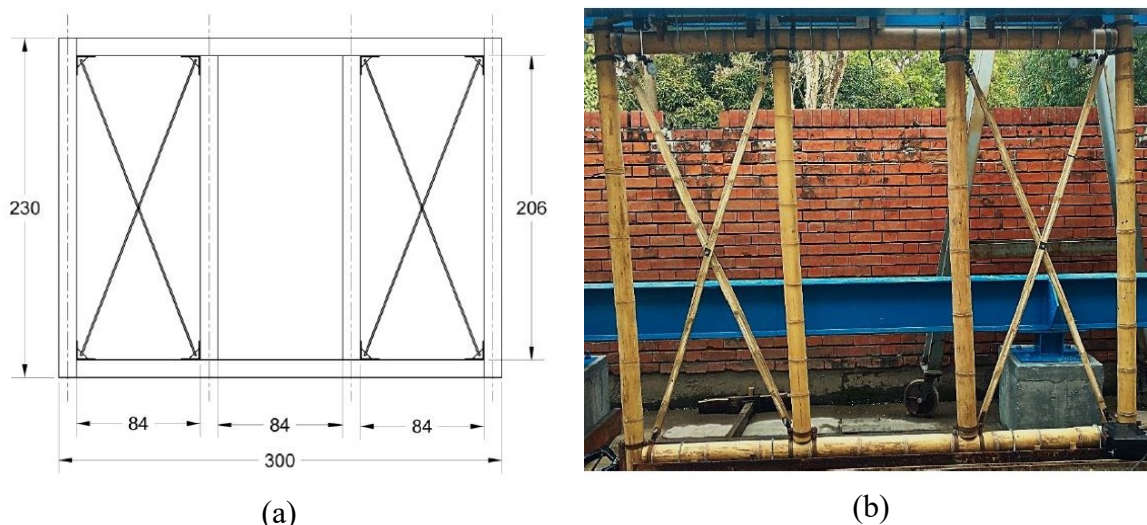


Figura 1.13. (a) Dimensiones globales del módulo en cm y (b) Módulos ensayados [32].

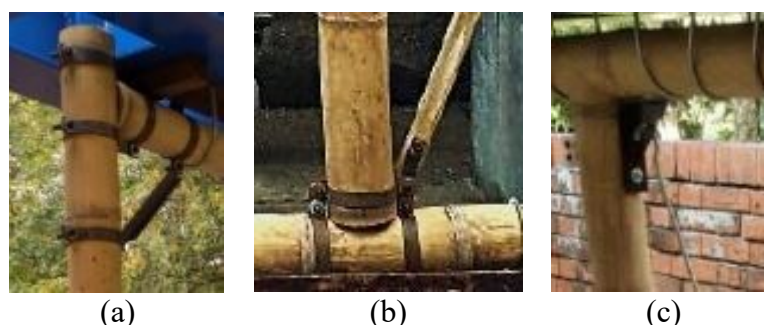


Figura 1.14. Uniones de los módulos. (a) unión a momento, (b) unión con abrazadera y (c) unión tradicional.

Tabla 1.3. Características de los módulos ensayados y resultados experimentales

Módulo	Unión	Diagonal	F. máx. (kN)	K (N/mm)
M – I	A momento	-	7,4	75
M – II	A momento	-	5,6	64
L - I	Con abrazadera	Latas de guadua	9,2	108
L – II	Con abrazadera	Latas de guadua	4,5	233
Tradicional	Tradicional	Barras de acero roscada	3,2	127

Aunque los módulos de pared presentaron buenos resultados, Villegas, L evaluó un módulo de pared con diagonales en una estructura de dos pisos y encontró que no se cumplía la deriva máxima de la norma para este tipo de estructuras [33]. Sin embargo, este requisito podría cumplirse al incluir paneles prefabricados con latas de guadua, que, dada su configuración, serían un aporte significativo a la rigidez lateral del muro.

1.7. Parámetros estructurales

1.7.1. Carga crítica de pandeo

Cuando un elemento en compresión es relativamente esbelto, puede fallar por pandeo [34]. La carga axial aumenta la deflexión lateral y el elemento termina doblándose, con lo que pasa de una condición estable a inestable (Figura 1.15). La carga que ocasiona lo anterior se denomina carga crítica de pandeo, que es un valor límite de consideración en el diseño.

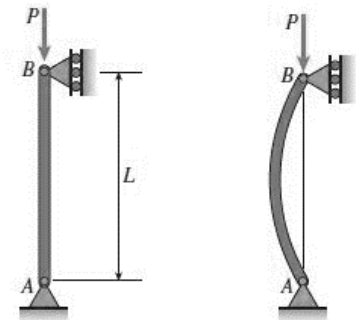


Figura 1.15. Pandeo de una columna esbelta debido a una carga P [33].

Los paneles de esta investigación, dada su geometría, son elementos estructurales esbeltos, por tanto, pueden ser lateralmente inestables y presentar pandeo fuera del plano. Otras propiedades tales como carga máxima, rigidez lateral y ductilidad se ilustran en la curva de carga desplazamiento típica del sistema. En la Figura 1.16 se presenta un ejemplo de una curva de carga vs desplazamiento típica para uniones, sin embargo, algunas características de esta se pueden tomar como referencia para otros tipos de sistemas estructurales.

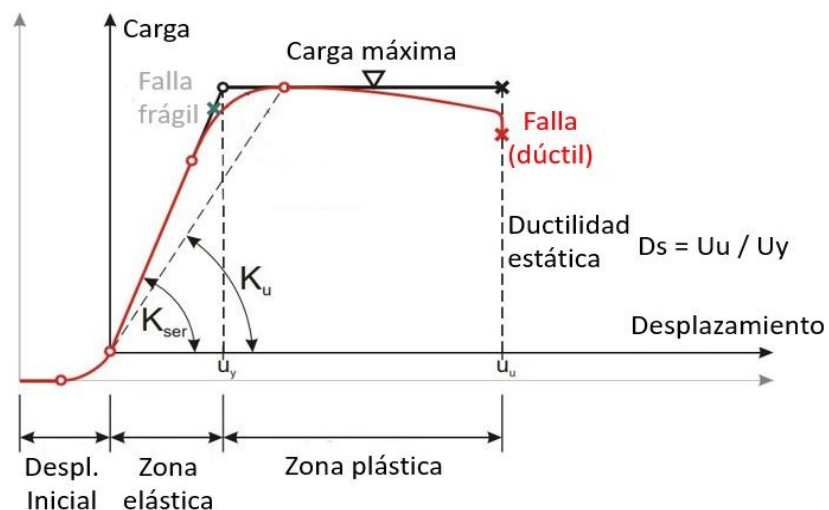


Figura 1.16. Ejemplo de curva de carga-desplazamiento para conexiones [34].

1.7.2. Carga máxima

Es el valor de carga más alto que se alcanza en la curva de carga-desplazamiento. Permite observar hasta que nivel de esfuerzo se puede llevar el elemento.

1.7.3. Rigidez

La rigidez se define como la capacidad de una estructura de soportar cargas sin presentar grandes deformaciones [34]. Este valor depende de las características propias del sistema, sus propiedades mecánicas y su geometría. En este proyecto se determinó de acuerdo con la norma ISO21851 así:

$$K = \frac{0.3F_{max}}{L_{40\%Fmax} - L_{10\%Fmax}} \quad \text{Ecuación 1-1}$$

Donde F_{max} es la fuerza máxima en cada ensayo y $L_{40\%Fmax}$ y $L_{10\%Fmax}$ son los desplazamientos horizontales relativos al 10% y 40% de la carga máxima respectivamente.

1.7.4. Ductilidad

La ductilidad es un parámetro importante para tener en cuenta en el diseño sísmico. Gracias al diseño de sistemas dúctiles se logra evitar un comportamiento frágil de las estructuras. En el caso de conexiones, este parámetro se define como la relación entre el desplazamiento último u_u y el desplazamiento al final de la zona elástica u_y (Figura 1.16).

Capítulo 2. Diseño y modelado

En este proyecto se plantearon inicialmente varias conformaciones geométricas de paneles, que fueron analizadas teóricamente, tal como se describe a continuación.

2.1. Análisis preliminar

Inicialmente, se realizó el diseño geométrico de cada panel. Para ello se tuvo en cuenta la aplicabilidad principal de la estructura, que es la rigidización de paredes de culmos; ejemplo del empleo de estos paneles se presenta en la Figura 2.1. Con base en lo anterior, la dimensión de cada panel se definió con base en los espacios intermedios de los módulos de culmos construidos por el grupo Biomecánica.

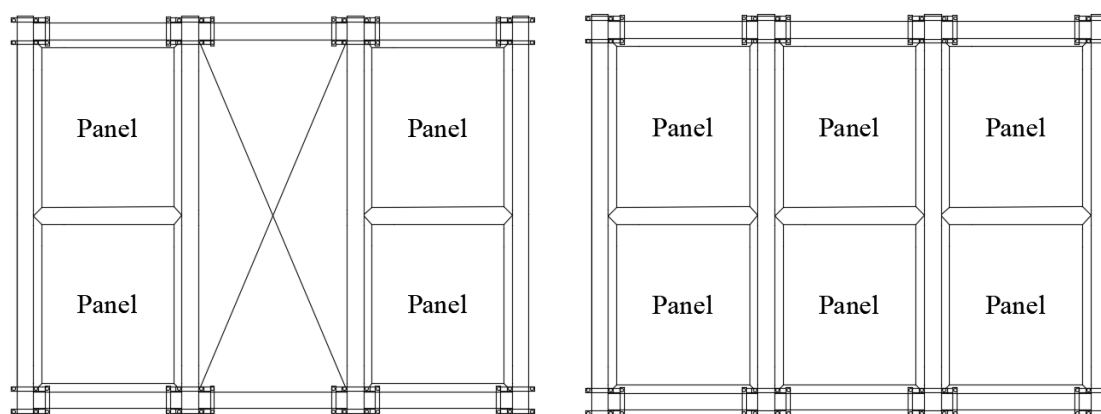


Figura 2.1. Propuestas del uso de paneles.

Las dimensiones registradas se muestran en la Tabla 2.1, con base en el esquema de la Figura 2.2. Se midió el ancho (b_i) en diferentes puntos de la parte alta, media y baja de cada sección. Se definió la altura del panel como la mitad de la altura del muro y el ancho con el mínimo valor registrado en la tabla. Esto con el fin de que el panel pueda ser incluido en cualquiera de las tres zonas intermedias, de acuerdo con lo propuesto en la Figura 2.1.

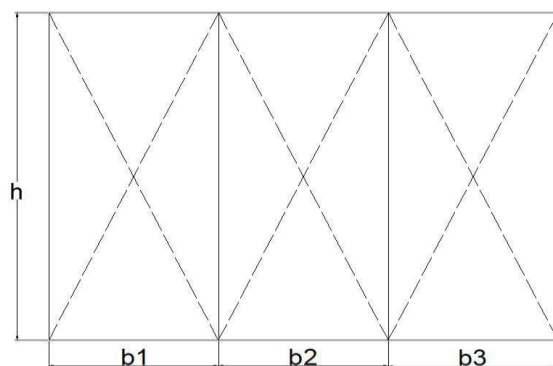


Figura 2.2. Muros de culmos de Guadua.

Tabla 2.1. Dimensiones del muro

Altura – h [m]	Ancho – b [m]		
	b1	b2	b3
2,06	0,87	0,85	0,84
2,07	0,86	0,85	0,84
2,07	0,87	0,85	0,85

Con base en lo anterior, la dimensión del panel se determinó en $100 \times 84 \text{ cm}^2$. Posteriormente, se propusieron y analizaron las 10 configuraciones mostradas en la Figura 2.3. Se evaluó el comportamiento de cada configuración por medio de un análisis de elementos finitos, con el objetivo de determinar cuáles presentaban mejor comportamiento.

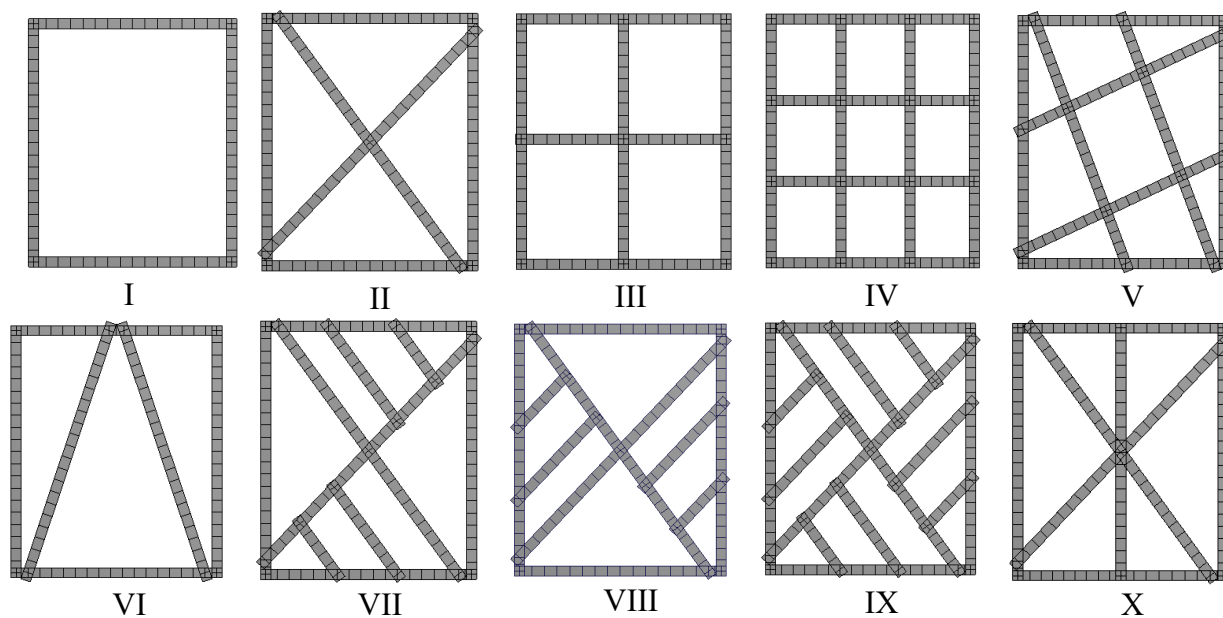


Figura 2.3. Configuraciones preliminares.

2.2. Modelación

2.2.1. Preliminares

La modelación se hizo mediante el programa ANSYS AIM. Para el material se consideró un modelo transversalmente isotrópico con las propiedades presentadas en la Tabla 2.2, referenciadas del sistema de coordenadas propuesto en la Figura 2.4. Estos valores se tomaron de ensayos realizados en la guadua por el grupo de investigación de Biomecánica [18][25].

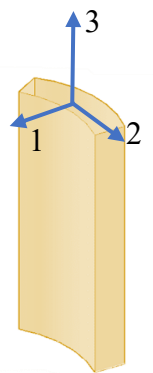


Figura 2.4. Sistema de coordenadas.

Tabla 2.2. Propiedades de la guadua *Angustifolia Kunth*

Propiedad	Valor	Propiedad	Valor
Densidad (Kg/m^3)	800	Relación de Poisson 1-3	0,01
Módulo de Elasticidad paralelo a la fibra – E3 (MPa)	13.450	Relación de Poisson 2-3	0,01
Módulo de Elasticidad radial – E1 (MPa)	860	Módulo de cortante 1-2 (MPa)	352
Módulo de Elasticidad perpendicular a la fibra - E2 (MPa)	860	Módulo de cortante 1-3 (MPa)	581
Relación de Poisson 1-2	0,22	Módulo de cortante 2-3 (MPa)	581

Para verificar el funcionamiento del programa, se analizó un modelo preliminar de una columna de 1000 mm de longitud y una sección rectangular de $40 \times 9 \text{ mm}^2$. En la modelación, se compararon tres elementos estructurales: tipo viga (beam), tipo losa (shell) y tipo sólido (solid). Posteriormente, se estudió el comportamiento de los elementos cuando la columna fue sometida a flexión y a pandeo.

Los tres tipos de elementos mencionados anteriormente se emplearon con una malla de 50 mm. La columna se empotró en su parte inferior. Para el análisis de flexión se determinó el desplazamiento debido a una carga lateral de 5 N aplicada en la parte superior. Este desplazamiento fue comparado con el teórico de una viga empotrada en voladizo con una carga aplicada en el extremo libre. En la *Ecuación 2-1*, la carga es P , la longitud del elemento es L , el módulo de elasticidad es E , el área transversal de la sección es A_s y G es el módulo por cortante del material.

$$\Delta = \frac{PL^3}{3EI} + \frac{PL}{GA_s}, E = 13.450 \text{ MPa} \quad \text{Ecuación 2-1}$$

$$I = \frac{bh^3}{12} \quad \text{Ecuación 2-2}$$

En la *Ecuación 2-2* se presenta la inercia de la sección, b se toma como 9 mm y h como 40 mm. La Tabla 3 presenta los desplazamientos obtenidos con cada modelo y su diferencia respecto al valor teórico calculado mediante la Ecuación 1 que fue igual a 2,621 mm.

Tabla 2.3 Desplazamiento ante carga lateral

Tipo de elemento	Desplazamiento (mm)	Diferencia [%]
Solid	2,577	1,71
Shell	2,738	4,29
Beam	2,628	0,28

Para el análisis de pandeo se aplicó una carga axial en la parte superior mientras que el nodo inferior se mantuvo empotrado. Se empleó el *Eigenvalue Buckling* de ANSYS para obtener la carga crítica de pandeo (Ecuación 2-3). En la verificación, el resultado computacional se comparó con la carga crítica de Euler obtenida mediante la Ecuación 2-3.

$$P = \left(\frac{\pi^2 EI}{Le^2} \right) \quad \text{Ecuación 2-3}$$

En la Ecuación 2-3, la inercia se calculó con un ancho de la sección b igual a 40 mm y una altura h igual 9 mm, ya que los elementos presentan pandeo con respecto al eje de menor inercia.



Figura 2.5. Columna en condición libre – empotrada.

En las condiciones de apoyo en los extremos del elemento se consideró la base empotrada y el extremo superior libre (Figura 2.5). En ese caso la longitud efectiva de pandeo (L_e) es igual al doble de la longitud real [34]. En la Tabla 2.4, se presenta la carga crítica de pandeo en cada elemento y su diferencia frente a la teórica equivalente a 80,643 N.

Tabla 2.4 Carga crítica de pandeo

Tipo de elemento	Carga de Euler (N)	Diferencia [%]
Solid	82,984	2,90
Shell	71,151	11,77
Beam	80,623	0,03

Los elementos Solid y Shell requirieron de un mayor nivel de procesamiento y mallado para llegar a los mismos resultados que se pueden obtener mediante el elemento tipo Beam; este elemento fue el que presentó menor diferencia en el análisis por desplazamiento y carga crítica de pandeo. Por tanto, se consideró aceptable trabajar con elementos tipo “Beam” en modelos posteriores.

2.2.2. Modelación de paneles

Para representar la unión, se tuvo en cuenta el trabajo realizado por Villegas, L [25], donde se muestra que las uniones de latas por medio de platinas presentan un comportamiento cercano al empotramiento. Al interceptar dos elementos en el modelo se genera este tipo de unión, que hace innecesario modelar las platinas, tuercas y pernos. En cuanto a la sección transversal de la lata, en este mismo trabajo se menciona que la curvatura no alcanza a ser relevante en sus resultados, ya

que el ancho promedio de las latas es de 40 mm, por tanto, los análisis se realizan al considerar una sección rectangular de $40 \times 9 \text{ mm}^2$.

En la Figura 2.6 se muestra la geometría con las condiciones de carga y borde de la configuración I, lo cual se aplica al resto de configuraciones. Los nodos superiores se consideraron libre en x y y mientras que se impidió el desplazamiento en el eje z . Los nodos inferiores se empotraron, con lo que se impidió el movimiento en los tres ejes. Lo anterior con el propósito de simular las condiciones de borde de los paneles al ser incluidos en un muro de culmos de guadua.

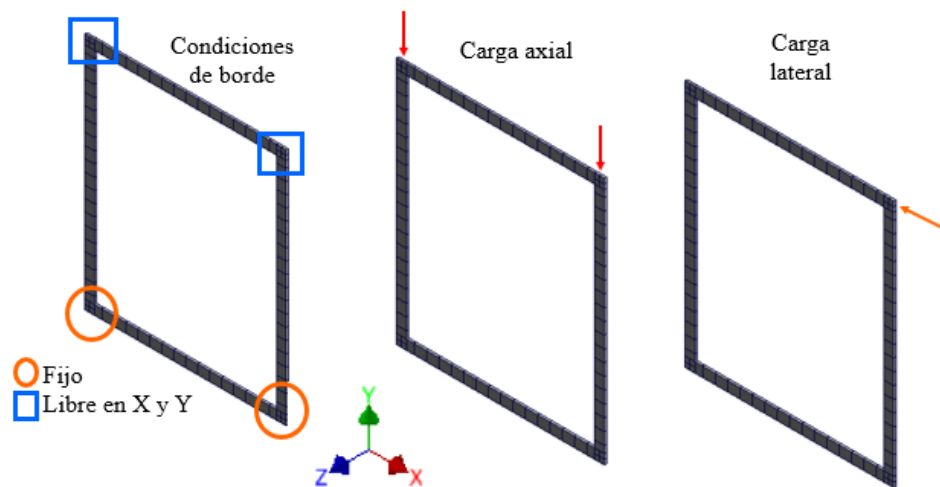


Figura 2.6. Puntos de apoyo y carga para cada configuración.

En cuanto a la carga, se consideraron dos condiciones. La primera condición consistió en una carga vertical aplicada en los dos nodos superiores usada para obtener la carga crítica de pandeo. En el segundo análisis se aplicó una carga lateral en el nodo superior derecho en la dirección x (Figura 2.6) con el objetivo de analizar la rigidez lateral del elemento.

Para determinar la rigidez teórica de cada configuración, se aplicó una carga horizontal de 5000 N en el costado derecho de cada panel. Se registró el desplazamiento producto de dicha carga para posteriormente calcular la rigidez.

2.2.3. Resultados

2.2.3.1. Carga crítica de pandeo (*Eigenvalue Buckling*)

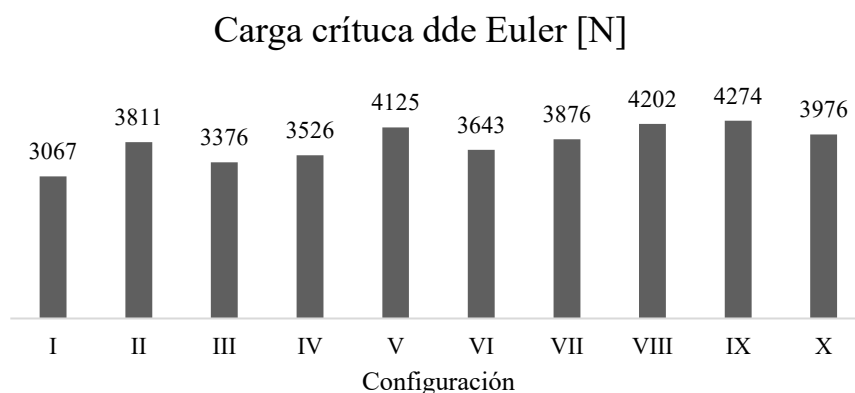


Figura 2.7. Carga crítica de Euler (N).

Las cargas críticas de pandeo se encuentran en un rango dado entre 3067 N y 4274 N (Figura 2.7). De todas las configuraciones, la configuración IX presentó mayor resistencia al pandeo, que es la configuración con mayor cantidad de elementos internos en su conformación respecto a las otras configuraciones. Así, la inclusión de elementos internos resulta beneficiosa en la resistencia al pandeo.

2.2.3.2. Rigidez

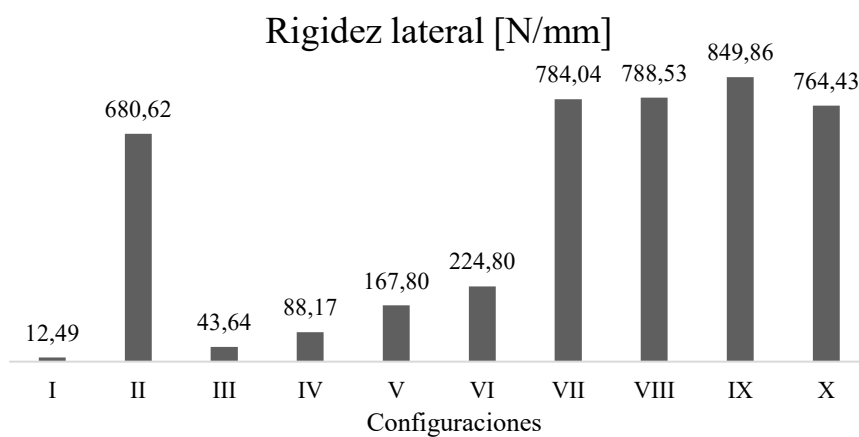


Figura 2.8. Rigidez lateral.

Como se esperaba, la configuración base (I) fue la de menor rigidez dado que solo hay dos elementos que se oponen al desplazamiento (Figura 2.8). Las otras configuraciones presentaron una mejor respuesta ante la carga y fue la configuración IX la de mayor rigidez. Lo anterior se da gracias a que esta configuración es la que presenta mayor cantidad de elementos internos diagonales.

2.3. Criterios y selección de alternativas

Con base en los resultados teóricos, se seleccionaron tres prototipos para ser construidos en escala real. Los criterios de selección de los paneles se basaron en la carga crítica de pandeo, su rigidez y cantidad de materiales (Tabla 2.5). En el último criterio se consideraron los metros lineales de latas de guadua y el número de platinas, tuercas y pernos.

Tabla 2.5. Características de cada configuración.

Configuración	P _{cr} [N]	K [MPa]	Latas GAK [ml]	Cantidad de materiales			
				Nodos	Pernos	Platinas	Tuercas
I	3067	12,49	3.68	4	4	8	4
II	3811	680,62	6.18	9	9	18	9
III	3376	43,64	5.52	9	9	18	9
IV	3526	88,17	7.36	16	16	32	16
V	4125	167,80	3.68	16	16	32	16
VI	3643	224,80	3.68	8	8	16	8
VII	3876	784,04	7.78	17	17	34	17
VIII	4202	788,53	7.78	17	17	34	17
XI	4274	849,86	9.38	25	25	50	25
X	3976	764,43	7.18	11	11	22	11

Para evaluar las mejores alternativas de diseño se empleó una matriz de decisión, en la cual se cuantifica cada diseño en función de los criterios de evaluación mencionados anteriormente. Este análisis se basó en el realizado por el investigador Moran, R en su trabajo doctoral [32].

El procedimiento consiste en asignar un factor de ponderación a cada criterio de tal forma que la suma de todos los factores de 100%. A la carga crítica de pandeo y la rigidez se les asignó un factor de ponderación del 30% y 50% respectivamente, dada la importancia de estos factores en el

desempeño estructural, con mayor peso para la rigidez, al ser la respuesta más significativa en su funcionalidad como rigidizadores. A la cantidad de materiales se le asignó un 20%.

Luego se asigna a cada criterio un puntaje, que se multiplica por el factor de ponderación correspondiente, con lo que se tiene un puntaje parcial; la suma de estos valores es el puntaje final de cada criterio.

Tabla 2.6. Evaluación de cada configuración mediante matriz de decisión. Entre paréntesis factor de peso de cada criterio.

Configuración	P _{cr} [N]		K [MPa]		Cantidad de materiales		Puntuación total (100%)
	(30%)		(50%)		(20%)		
	% Peso	Punt.	% Peso	Punt.	% Peso	Punt.	
I	72%	21,5	1%	0,7	100%	20,0	42,3
II	89%	26,8	80%	40,0	46%	9,3	76,0
III	79%	23,7	5%	2,6	47%	9,4	35,6
IV	82%	24,7	10%	5,2	27%	5,4	35,4
V	97%	29,0	20%	9,9	28%	5,7	44,5
VI	85%	25,6	26%	13,2	54%	10,8	49,6
VII	91%	27,2	92%	46,1	26%	5,1	78,4
VIII	98%	29,5	93%	46,4	26%	5,1	81,0
XI	100%	30,0	100%	50,0	18%	3,5	83,5
X	93%	27,9	90%	45,0	38%	7,6	80,5

La configuración XI presenta la mejor puntuación, seguida en su orden de las configuraciones VIII, X, VII y II. De ese grupo de configuraciones se seleccionaron las dos primeras (XI-VIII) y la última (II). Se descartaron las configuraciones X y VII con base en las siguientes razones: la configuración VII y VIII presentaron igual cantidad de materiales y una respuesta similar, y, para tener diferenciación, se seleccionó la configuración VIII con mejor puntuación. Además, las configuraciones X y II también resultaron ser similares; se optó por la configuración II al tener menor cantidad de materiales. En el capítulo siguiente se presenta la construcción y evaluación experimental de cada configuración ante carga lateral y axial.

Capítulo 3. Evaluación experimental

Para cumplir el segundo objetivo de la presente investigación, que consiste en evaluar el comportamiento de los paneles ante carga lateral y vertical, se llevaron a cabo las siguientes actividades: se construyeron 18 paneles, seis por cada configuración, a las que se le realizaron dos pruebas, una a carga lateral y otra a carga axial; para cada prueba se construyeron tres prototipos de cada configuración.

En la Figura 3.1 se muestran las configuraciones a construir y la denominación otorgada a partir de este punto.

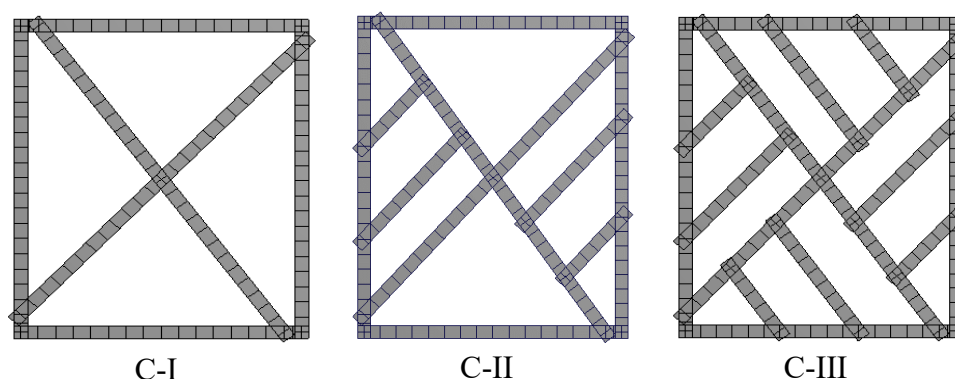


Figura 3.1. Configuraciones de prueba.

3.1. Construcción de paneles

Los paneles fueron elaborados con latas de culmos de *GAK* con edades entre los tres y cinco años, altura promedio de 12 metros y humedades relativas entre el 5% y 8% en su lugar de origen, cosechados en el eje Cafetero a 1500 msnm. Los culmos fueron suministrados por un proveedor colombiano [35]. Para obtener las latas, se seleccionaron los culmos que presentaran un espesor de pared medio, entre 9 y 14 mm.

Una vez seleccionados los culmos se inició el proceso de corte. Para esto, primero se removieron los diafragmas con una varilla larga. Posteriormente, se colocó la estrella de corte en posición y se

golpeó con un martillo de caucho hasta que atravesó longitudinalmente el culmo (Figura 3.2, a). Después de ser cortadas, las latas se pulieron con un machete para quitar las fibras excedentes y los nodos remanentes (Figura 3.2, c).



Figura 3.2. Corte de culmos de guadua en latas. (a) Estrella, (b) paso de la estrella y (c) pulimiento de las latas.

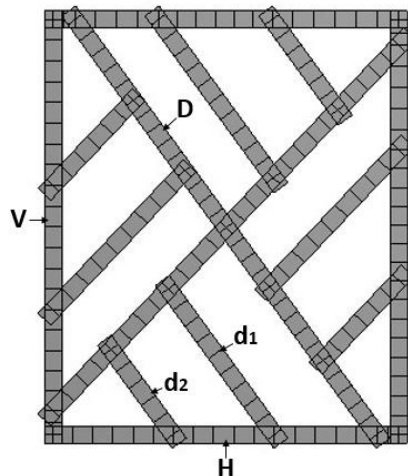


Figura 3.3. Denominación de cada elemento.

Se determinó la cantidad de latas a cortar con base en las dimensiones de los elementos de cada panel. En la Tabla 3.1 se presenta la longitud de cada elemento de acuerdo a la denominación de la Figura 3.3 y en la Tabla 3.2 se muestra el número de elementos correspondientes a cada configuración. Con base en esta información, más un factor de ampliación, se requirieron aproximadamente 600 metros lineales de guadua.

Tabla 3.1. Longitud de cada elemento

Elemento	Longitud (m)	Elemento	Longitud (m)
Horizontales (H)	0,84	Diagonal mediana (d1)	0,50
Verticales (V)	1,00	Diagonal pequeña (d2)	0,30
Diagonales (D)	1,25		

Tabla 3.2. Número de elementos de cada configuración

Configuración	Número de latas por elemento				
	H	V	D	d1	d2
I	2	2	2	-	-
II	2	2	2	2	2
III	2	2	2	4	4

En las uniones se emplearon pernos y tuercas de 3/8" y platinas curvas de 1/8" de espesor. Las platinas se formaron a partir de una lámina de acero de 40 mm de ancho por 6000 mm de largo. Esta lámina se cortó en varias partes sobre las cuales se hicieron divisiones cada cuatro centímetros; en el centro de cada sección se hizo una perforación (Figura 3.4, a). Posteriormente se les dio curva con una herramienta antes de doblar y cortar cada sección (Figura 3.4, b y c).

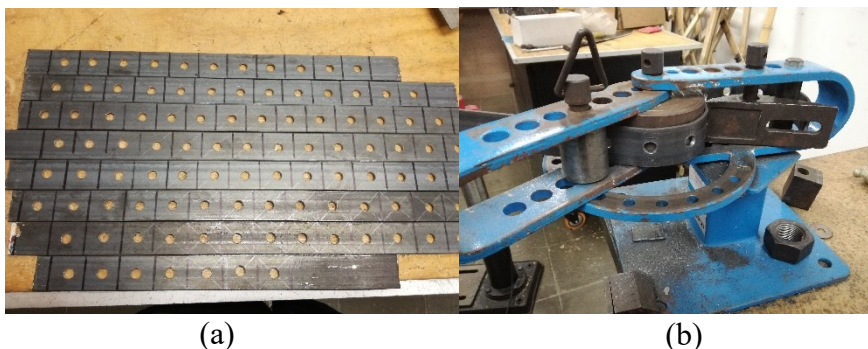




Figura 3.4. Fabricación de platinas curvas (a) perforación de cada sección, (b)-(c) curvado de platinas y (d) resultado final.

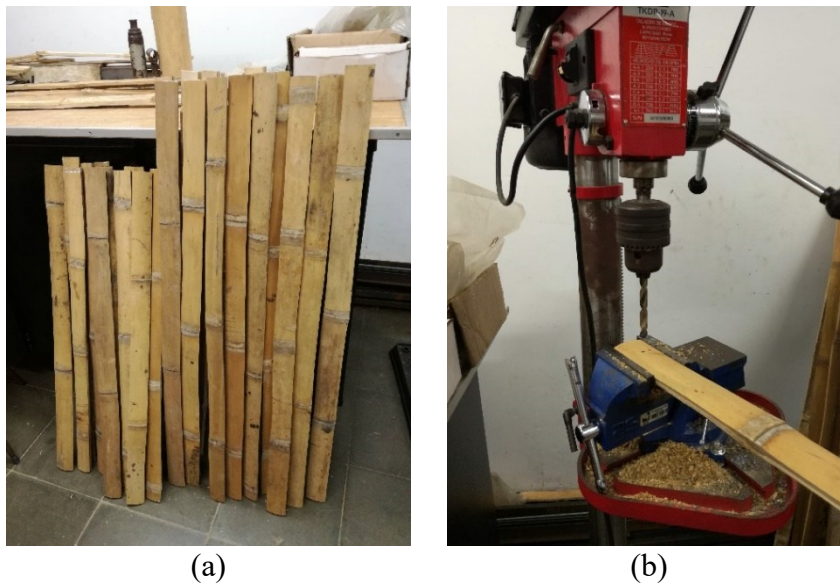


Figura 3.5. (a) Latas con las dimensiones requeridas y (b) perforación de las latas.

Con todos los elementos listos se procedió al ensamble de cada panel. En cada unión se tuvieron en cuenta las recomendaciones de Laura et al [35], en cuanto a la ubicación del perno a 35 mm del extremo de cada lata del marco. Para ajustar las uniones, se apretó con cuatro vueltas el perno y se esperó 10 segundos a que las fibras se relajaran para posteriormente volver a ajustar. El proceso de corte y ensamble de cada panel fue el siguiente:

1. Las latas que conforman el marco, dos verticales de 1000 mm y dos horizontales de 840 mm (Figura 3.5, a), se perforaron en cada extremo (Figura 3.5, b); las perforaciones se realizaron a 35 mm del borde externo de cada lata.

2. Se unieron las latas para formar un marco, sin embargo, no se ajustaron las uniones. En cada esquina se formó un ángulo recto, para lograr lo anterior, se marcaron desde cada nodo 300 mm hacia un lado y 400 mm en la otra dirección (Figura 3.6). La distancia entre las marcas realizadas fue de 500 mm, con lo que se verificó la ortogonalidad de las latas para proceder a ajustar los nodos.

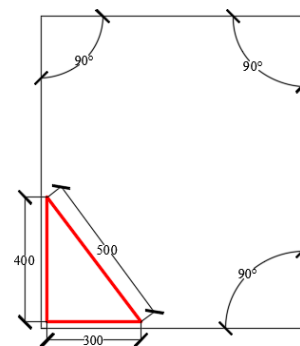


Figura 3.6. Esquema de Medidas ángulo recto (unidades en mm).

3. Se ubicaron las dos diagonales en el marco y se marcaron los puntos a perforar (extremos e intersección entre las dos diagonales). Una vez perforados se ajustaron todos los componentes. Hasta este punto quedó armada la configuración C – I.
4. Para las otras dos configuraciones cada sección se dividió en tres partes de acuerdo con el esquema de la Figura 3.7. Estos puntos se perforaron para luego ubicar los elementos internos de cada configuración.

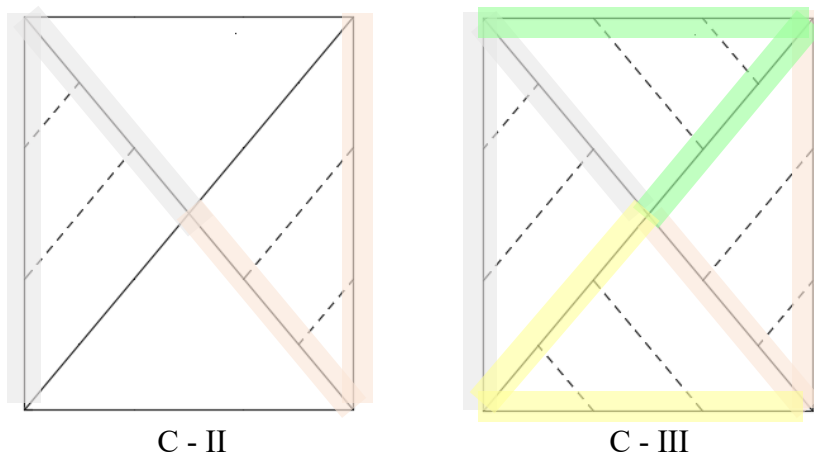


Figura 3.7. Las latas resaltadas de un mismo color indican la unión de los elementos internos de cada configuración.

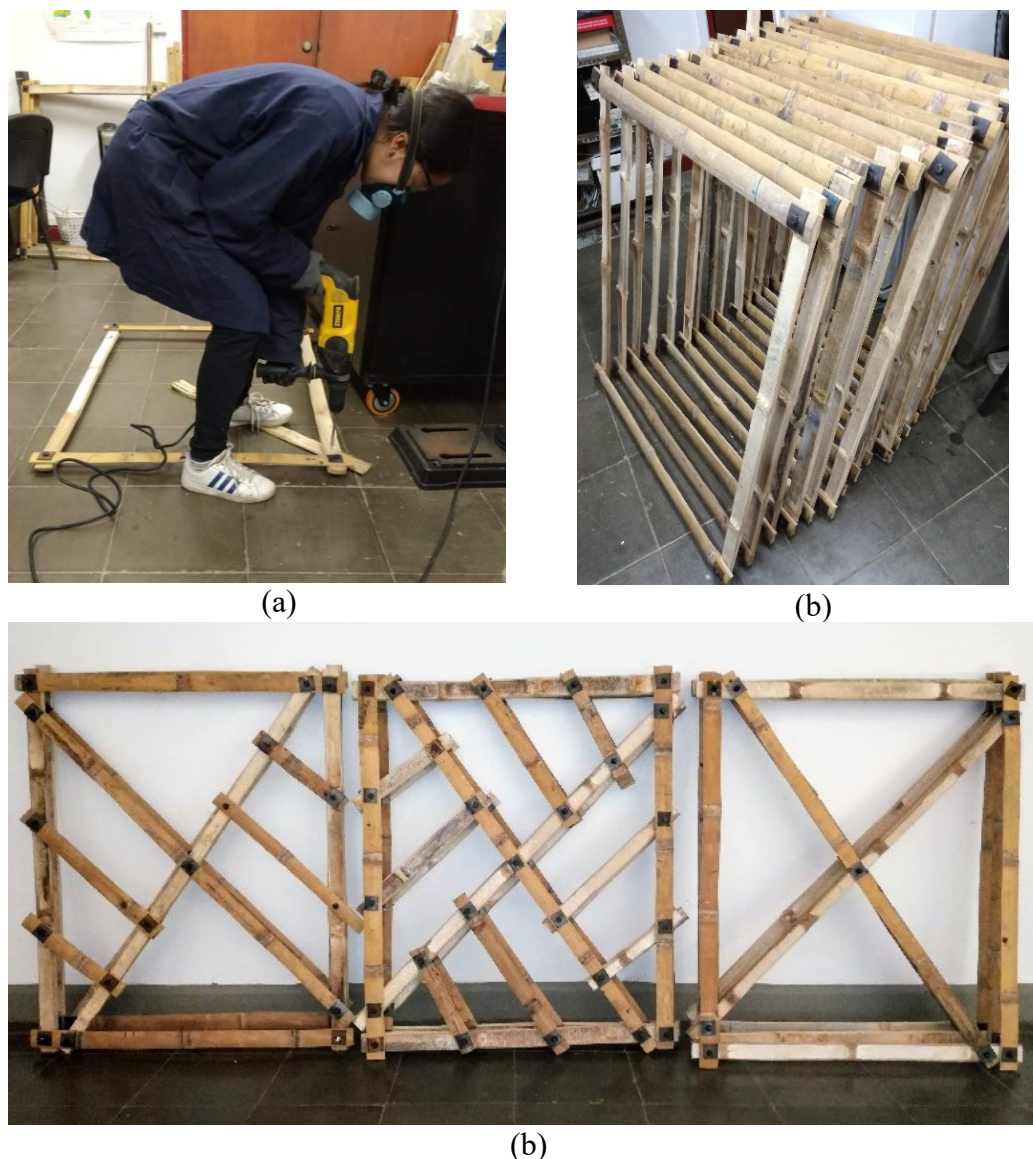


Figura 3.8. (a) Ensamble de los paneles, (b) y (c) paneles ensamblados.

En la Tabla 3.3 se presenta un resumen con el espesor y humedad de los paneles. Estos valores se tomaron en tres puntos diferentes de cada lata; la humedad se midió con un sensor de humedad EXTECH M050. Por otro lado, Pantoja, P, [36] determinó la densidad de la guadua representativa de este estudio con base en la norma NTC 5525. El resultado obtenido fue $719,73 \text{ kg/cm}^3$ (COV= 0,11).

Tabla 3.3. Reumen de espesores y humedad por cada configuración.

		Espesor		Humedad	
	Configuración	Promedio (mm)	COV	Promedio (%)	COV
Carga lateral	C - I	1	12,43	0,09	14,89
		2	12,12	0,14	14,97
		3	11,57	0,13	14,87
	C - II	1	12,50	0,13	14,03
		2	11,89	0,12	14,30
		3	12,00	0,13	14,06
	C - III	1	13,01	0,15	14,36
		2	13,08	0,15	14,77
		3	11,67	0,12	14,49
Carga axial	C - I	1	13,72	0,14	17,11
		2	13,53	0,10	17,51
		3	12,49	0,10	16,91
	C - II	1	11,72	0,09	16,94
		2	12,78	0,16	16,83
		3	12,90	0,08	17,69
	C - III	1	12,43	0,14	16,18
		2	11,66	0,19	16,40
		3	12,95	0,13	17,93

3.2. Ensayos

3.2.1. Ensayo de carga lateral

3.2.1.1. Montaje experimental

El montaje experimental se adaptó para ensayo de carga estática lateral. Las condiciones de borde se idearon con el fin de generar una respuesta principalmente a cortante (Norma ISO 21581, [37]).

El panel se empotró en una de las vigas del marco de reacción de la Escuela de Ingeniería Civil y Geomática de la Universidad del Valle. Se empleó un perfil tipo C y una abrazadera de acero en cada perno para impedir la rotación de los nodos en la parte superior (Figura 3.9). El perfil tipo C se fijó en el marco a través de una platina pernada que a su vez se fijó en un perfil tipo I sujeto al

marco (Figura 3.10, a). Además, en la parte inferior se empleó otro perfil tipo I para servir de guía y restringir el movimiento fuera del plano de los nodos inferiores.

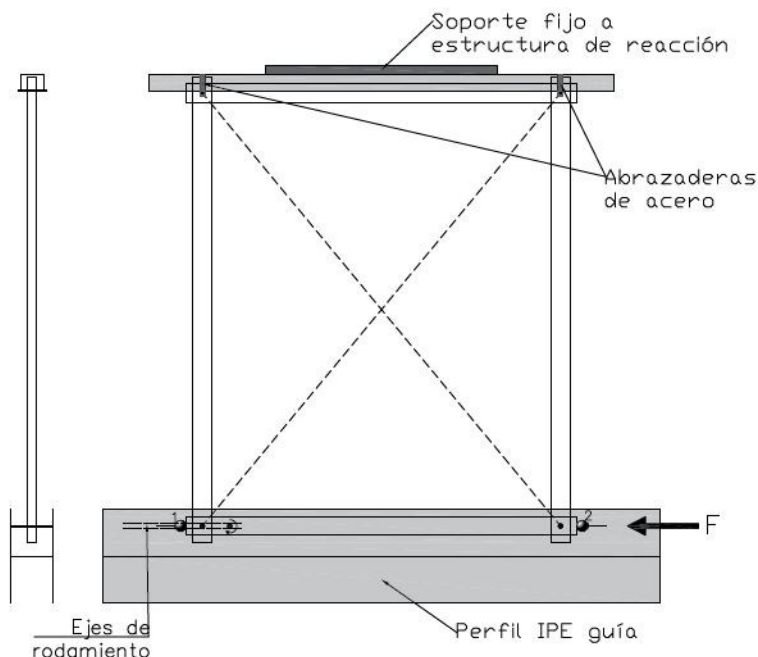
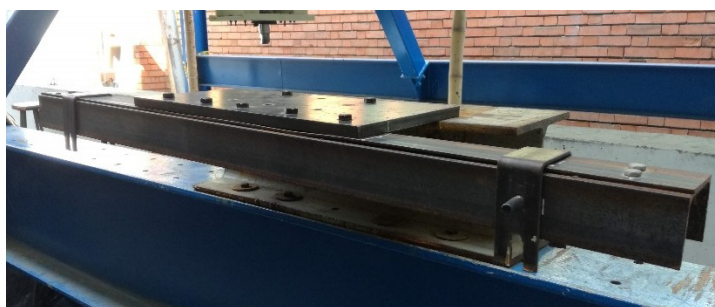


Figura 3.9. Configuración de ensayo a carga lateral del panel.



(a)



(b)

Figura 3.10. (a) Perfil sujeto al marco y (b) platina de sujeción.

El panel se ensayó bajo carga monotónica. En el nodo inferior izquierdo se emplearon dos perfiles, conformados por dos ángulos cada uno, con la función de evitar el movimiento fuera del plano de los elementos horizontales, pero permitir el desplazamiento vertical y horizontal del nodo (Figura 3.11, a). La aplicación de la carga se realizó en el extremo inferior izquierdo con ayuda de un gato hidráulico de 20 toneladas de capacidad y 100 mm de carrera. La celda de carga (Celda OP-312 de 1.5 ton) se apoyó bajo presión entre el gato y la pared del pedestal (Figura 3.11, c).

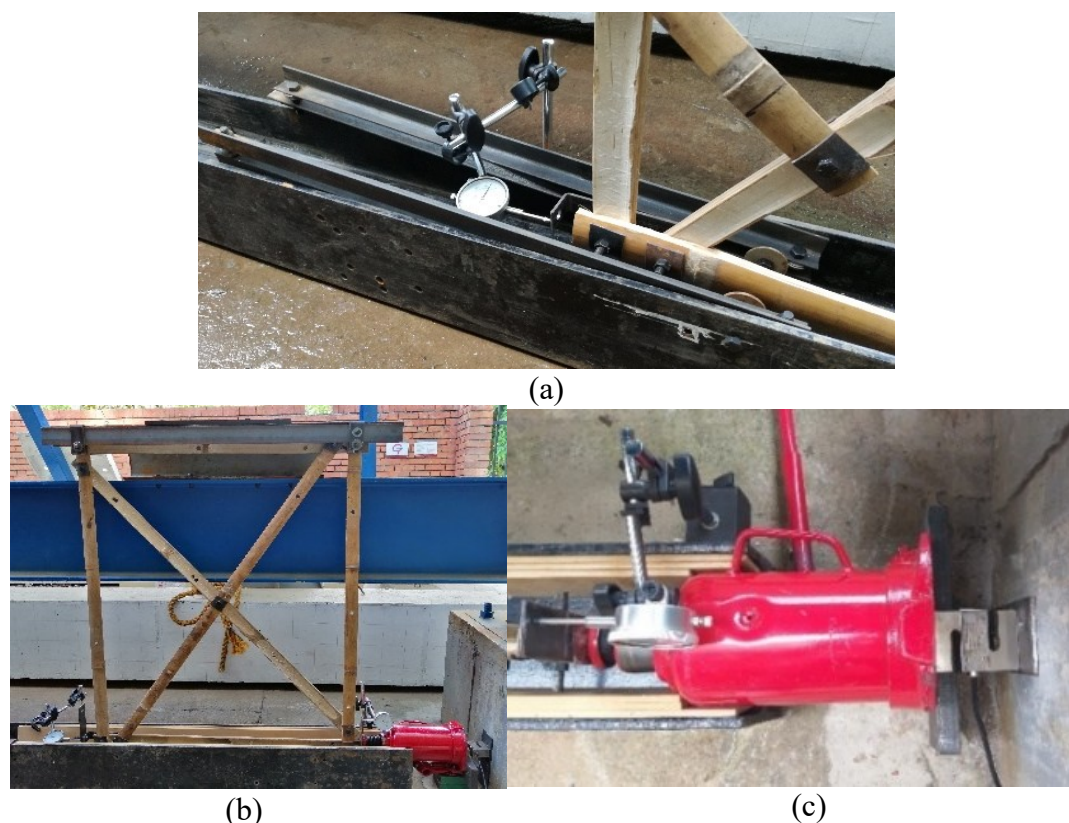


Figura 3.11. (a) Ejes guía de desplazamiento, (b) Montaje experimental y (c) Montaje Gato-Celda.

Se midió el desplazamiento en los nodos inferiores por medio de comparadores de carátula de 25.4 mm de rango y 0.025 mm de resolución (puntos 1 y 2 en la Figura 3.9). La lectura de la carga (en kilos fuerza) se realizó con un lector OMEGA (DP 41s) que fue previamente calibrado para su adecuado uso. Al panel se le aplicó carga en incrementos de 100 N aproximadamente y se registraron los valores de la carga y desplazamiento entre cada incremento.

3.2.2. Prueba a compresión simple

La prueba se realizó en la Máquina Universal de Ensayos del Laboratorio MERO (Mecánica de Rocas), con una celda de carga tipo S de 1500 Lb. Se aplicó carga a una tasa de 0.006 cm/s, que es la mínima velocidad de trabajo. El montaje se adaptó de acuerdo con el esquema de la Figura 3.12.

El panel se ubicó de forma simétrica con el objetivo de que la carga transmitida a través del perfil se dividiera en partes iguales a los dos nodos superiores. El panel se fijó a la máquina por medio de una precarga.

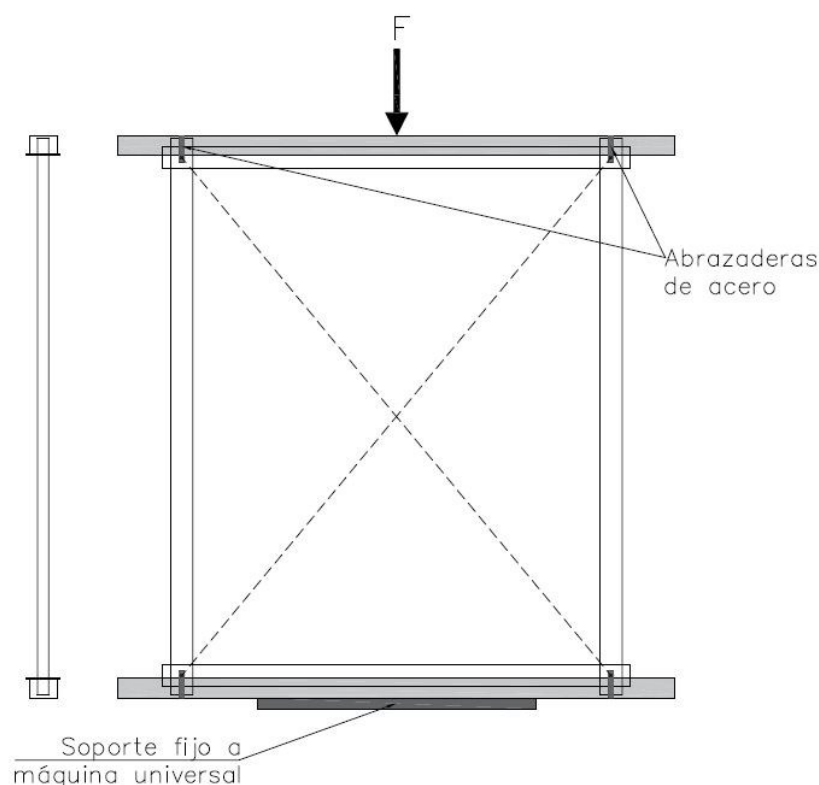


Figura 3.12. Configuración del panel a carga vertical.

Para la transmisión de la carga, el sistema se conformó con dos perfiles tipo C, fijados al marco de pruebas, que permitieron la transmisión de esta al panel a través de los pernos. Por otro lado, en la parte superior se adaptó una platina en la cual se pernarón cuatro pies de apoyo. A su vez, cada par de pies se encontraba entrelazado por un perno para evitar la separación de estos. La anterior configuración tuvo como objeto evitar el movimiento rotacional del panel (Figura 3.13, b). En la base se empleó una platina de $\frac{3}{4}$ " fija al marco mediante cuatro pernos, sobre la cual se fijó el perfil tipo C de apoyo del panel (Figura 3.13, c).



(a)



(b)



(c)

Figura 3.13. (a) Montaje carga de compresión, (b) Configuración superior del montaje y (c) configuración inferior del montaje.

Para la calibración de la celda de carga, se empleó un anillo de carga como se muestra en la Figura 3.14, a, con lo que se generó una curva de calibración para la corrección de los datos.

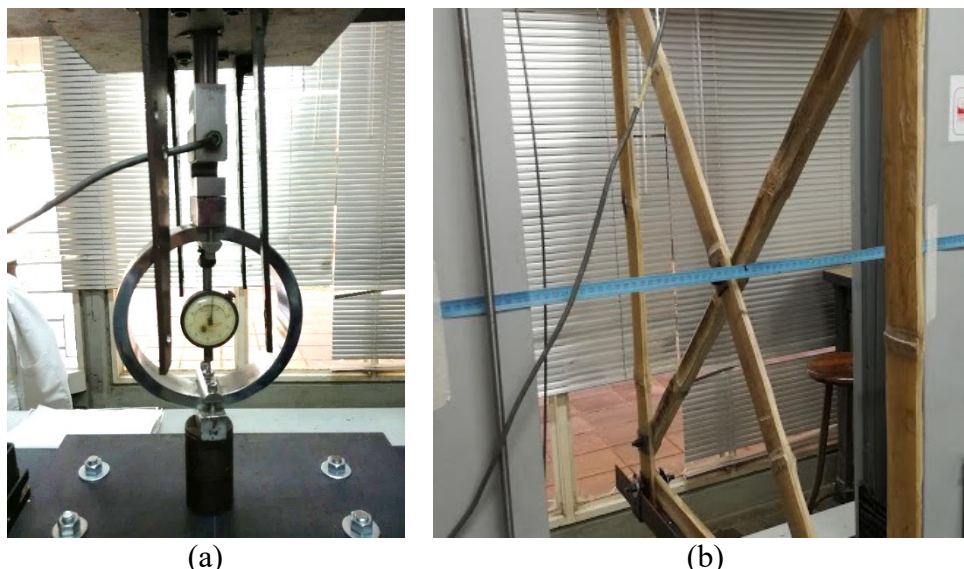


Figura 3.14. (a) Calibración con anillo de carga y (b) Ubicación de la cinta métrica.

Adicionalmente, se determinó la carga crítica de pandeo, que se registró a través de una grabación. Para lo anterior se coordinó el inicio de la prueba con el inicio de la grabación, que se hizo con un ayuda de un celular y un trípode, con el fin de darle estabilidad al vídeo. Por otra parte, la deflexión horizontal se leyó por medio de cinta métrica (incertidumbre de ± 10 mm), que se ubicó de acuerdo con la Figura 3.14, b. En suma, la carga crítica de pandeo se anotó como el valor a partir del cual el panel comenzó a presentar deflexión fuera de su plano.

3.2.3. Resultados y características de falla

3.2.3.1. Ensayo de carga lateral

Se presentó un comportamiento relativamente consistente entre las tres réplicas (Figura 3.15). La carga máxima lateral obtenida en los ensayos fue de 6007 N para la configuración C – III, que fue 74% y 54% veces mayor que la máxima carga registrada por las configuraciones C – I y C – II respectivamente (Figura 3.16). La rigidez inicial lateral máxima de la configuración C – III fue un 29% y 22% mayor que la rigidez máxima de las configuraciones C – I y C – II respectivamente (Figura 3.17).

En las dos primeras configuraciones se presentó un patrón similar en la curva inicial. Este comportamiento cambia después de que se alcanza la carga máxima, a partir de donde inicia la respuesta dúctil del sistema. En la tercera configuración se presenta el mismo patrón al inicio de la curva, sin embargo, esta configuración no muestra la zona dúctil, dado que la prueba se terminó cuando se llegó a un desplazamiento excesivo aún sin fallar.

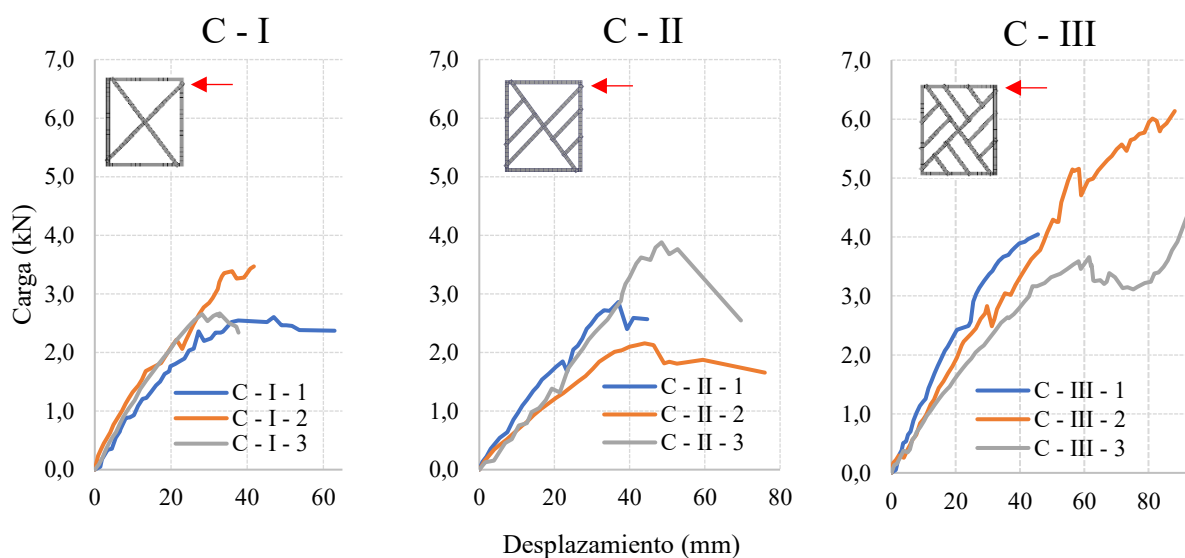


Figura 3.15. Curvas de carga vs desplazamiento lateral

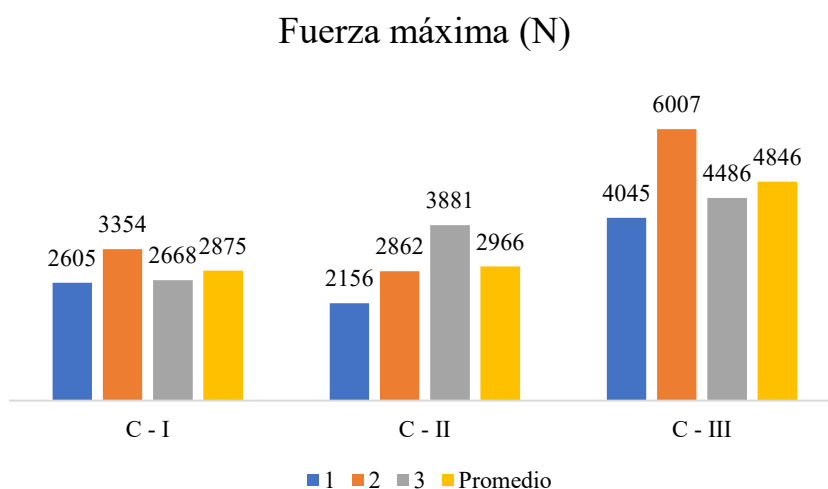


Figura 3.16. Fuerza máxima para carga lateral y promedio.

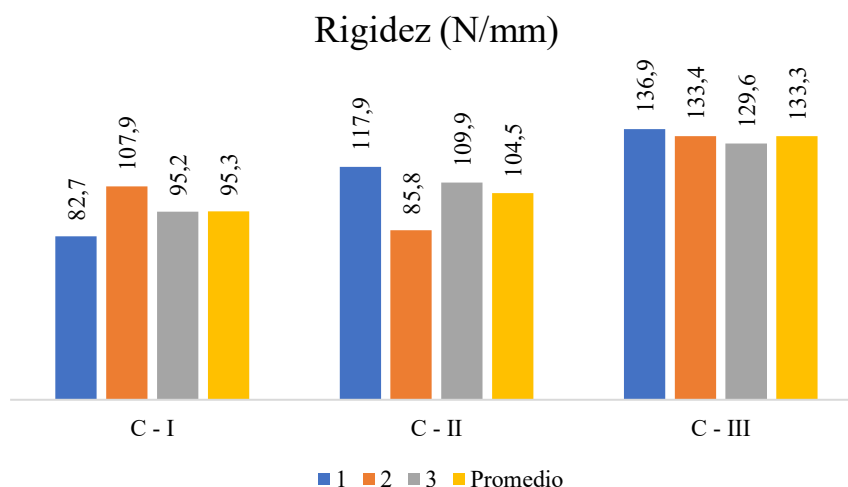


Figura 3.17. Rigidez inicial lateral.

En la Tabla 3.4 se describe la falla dada en cada configuración durante los ensayos; en la Figura 3.18 se presentan algunos ejemplos. La mayoría de las fallas están dadas por el doblamiento de las latas debido al pandeo. Otro tipo de falla es por desgarre en las zonas nodales. En todas las configuraciones se presentó pandeo de la lata vertical izquierda (Figura 3.19).

Tabla 3.4. Descripción de falla por configuración

Prototipo	Tipo de falla
C - I - 1	No falló
C - I - 2	Doblamiento de latas internas
C - I - 3	Desgarre del nodo - lata horizontal superior
C - II - 1	Fractura lata vertical cercana al nodo
C - II - 2	Doble por aplastamiento de la diagonal
C - II - 3	Doble por aplastamiento de la diagonal
C - III - 1	Desgarre del nodo - lata horizontal superior
C - III - 2	No falló
C - III - 3	No falló

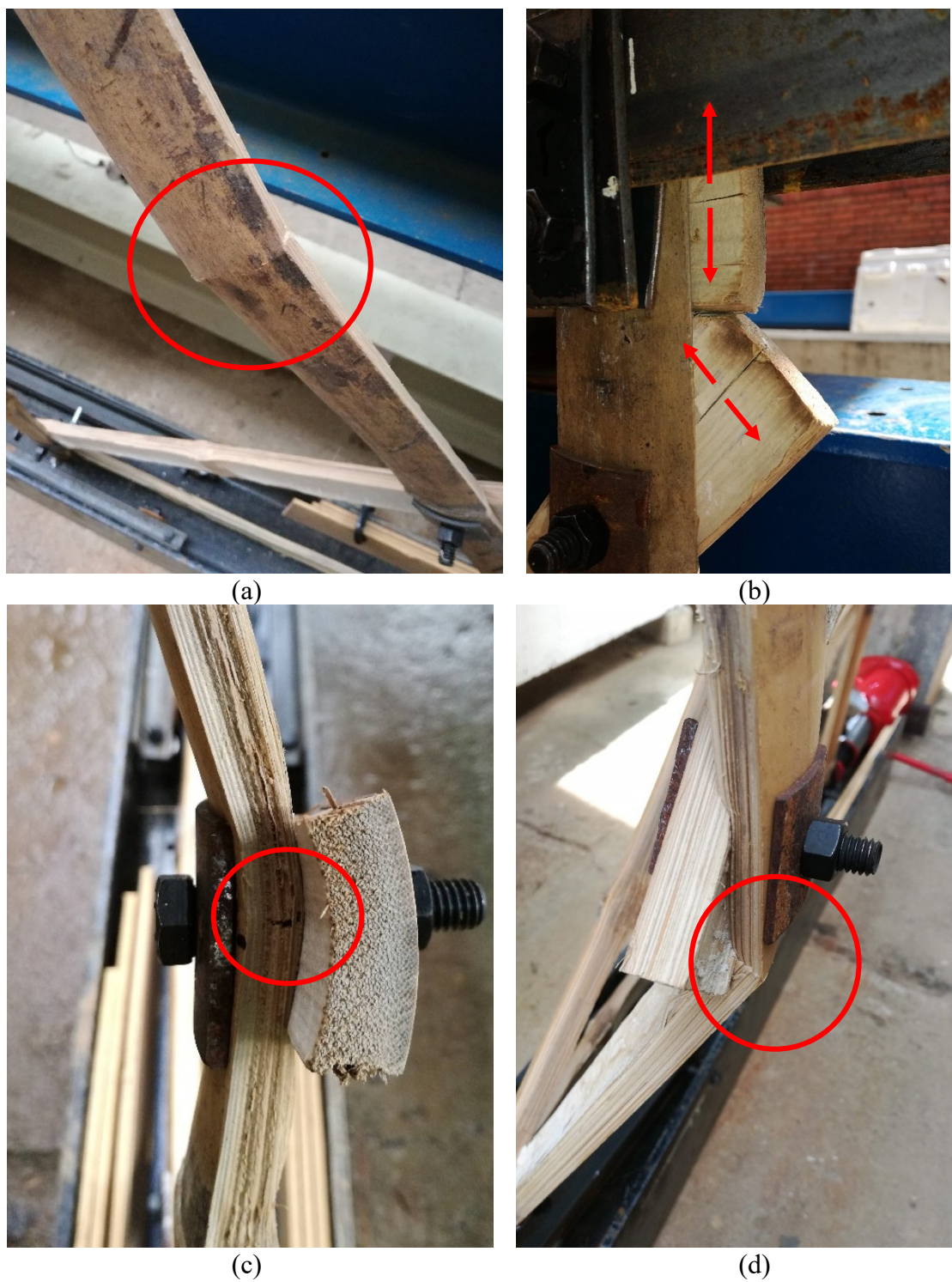


Figura 3.18. Modos de falla. a) Dobleces de lata, b) desgarre de elemento horizontal, c) agrietamiento en zona nodal y d) dobleces por aplastamiento de diagonal.

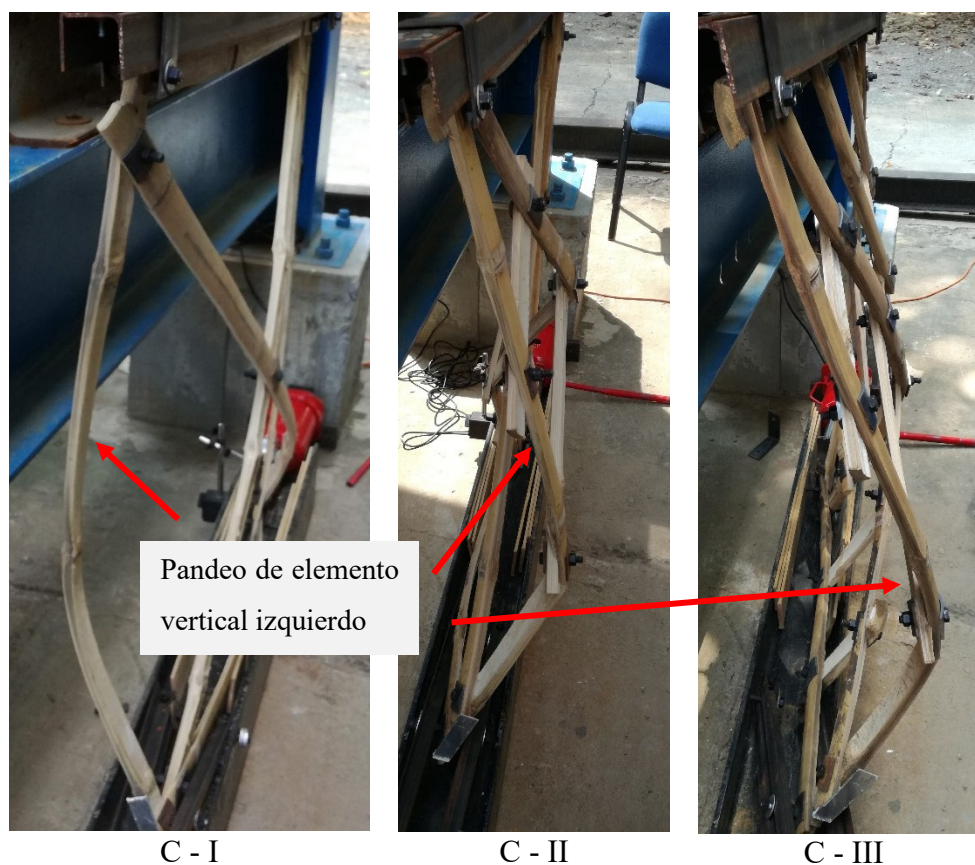


Figura 3.19. Forma del panel después de la prueba. Lata vertical izquierda en rojo.

3.2.3.2. Ensayo de compresión simple

La mayoría de los paneles presentaron un comportamiento dúctil. La configuración C – III fue la que soportó mayor nivel de carga al registrar 10,6 kN, sin embargo, se presentó una falla frágil al llegar a este escalón de carga. Por otra parte, la configuración C – II fue la que menos carga soportó con un nivel de 4,3 kN. Las tres configuraciones presentaron un comportamiento inicial similar, que cambió al llegar a la carga máxima, momento a partir del cual las curvas presentaron un desfase (Figura 3.20).

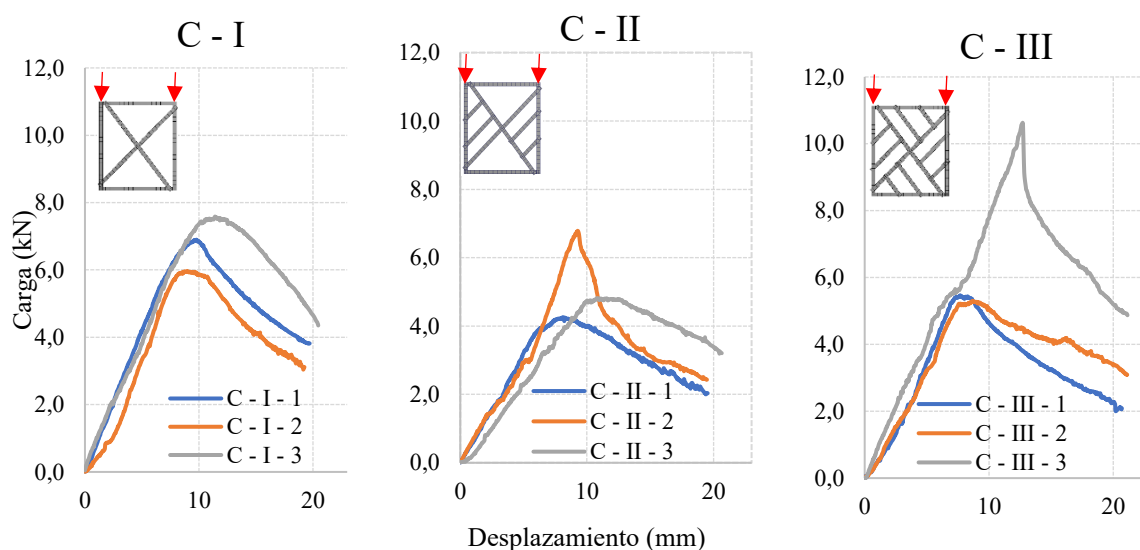


Figura 3.20. Gráficas de carga vertical vs desplazamiento para cada grupo de configuración.

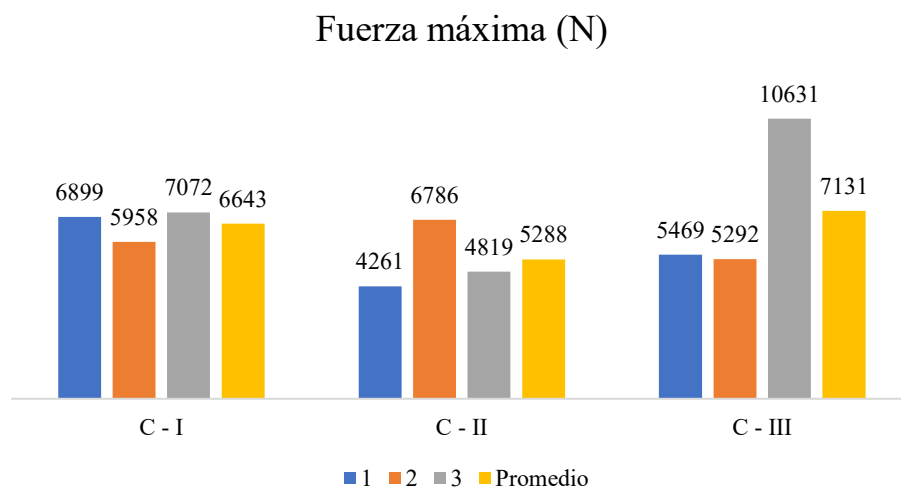


Figura 3.21. Fuerza máxima para cada configuración.

Otro parámetro analizado fue la carga crítica de pandeo. En la Figura 3.22 se presenta este valor tomado como la carga a partir de la cual inicia el pandeo. Además, se registró la deflexión horizontal máxima alcanzada por cada panel (Figura 3.23). La lectura de este valor no está regida por una normativa, sin embargo, se tomó con ayuda de grabación y cinta métrica (incertidumbre de ± 10 mm), con el objetivo de determinar de la manera más precisa posible la deflexión fuera del plano del panel.

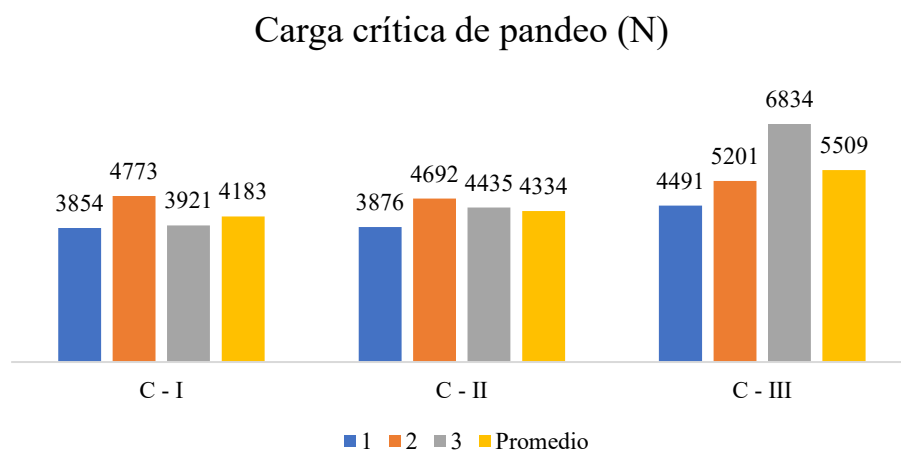


Figura 3.22. Carga crítica de pandeo.

La configuración C – III requirió de un alto nivel de carga en una de sus probetas para iniciar el pandeo, sin embargo, este fue un dato atípico comparado con la respuesta de las otras pruebas, en donde el promedio de carga osciló entre los 3800 N y 5200 N. Además, en el diagrama de deflexión horizontal se observa un menor pandeo de la configuración C – III en comparación con las otras dos configuraciones.

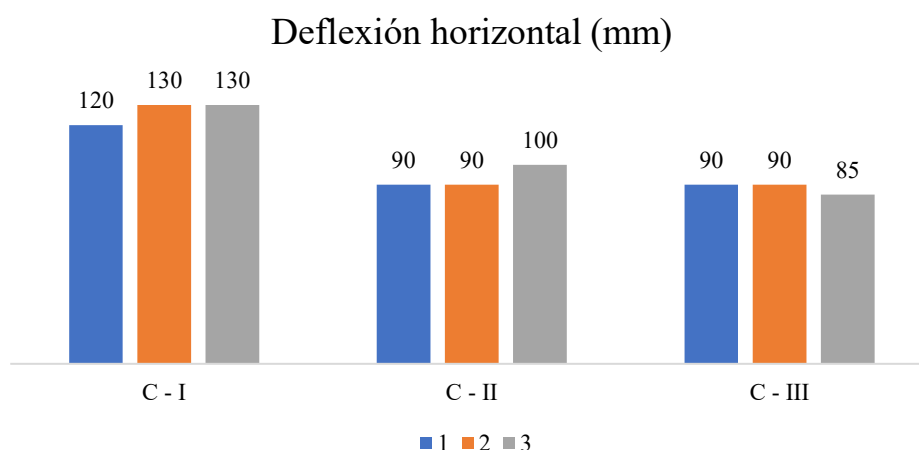


Figura 3.23. Deflexión horizontal.

En cuanto a los modos de falla, las probetas de la configuración C – I fallaron por doblamiento de las latas verticales luego del pandeo debido a la falta de elementos internos (Figura 3.24, a). Por otro lado, en las configuraciones restantes la falla se localizó cerca de las conexiones entre las latas diagonales y las verticales (Figura 3.24, b, c y d).

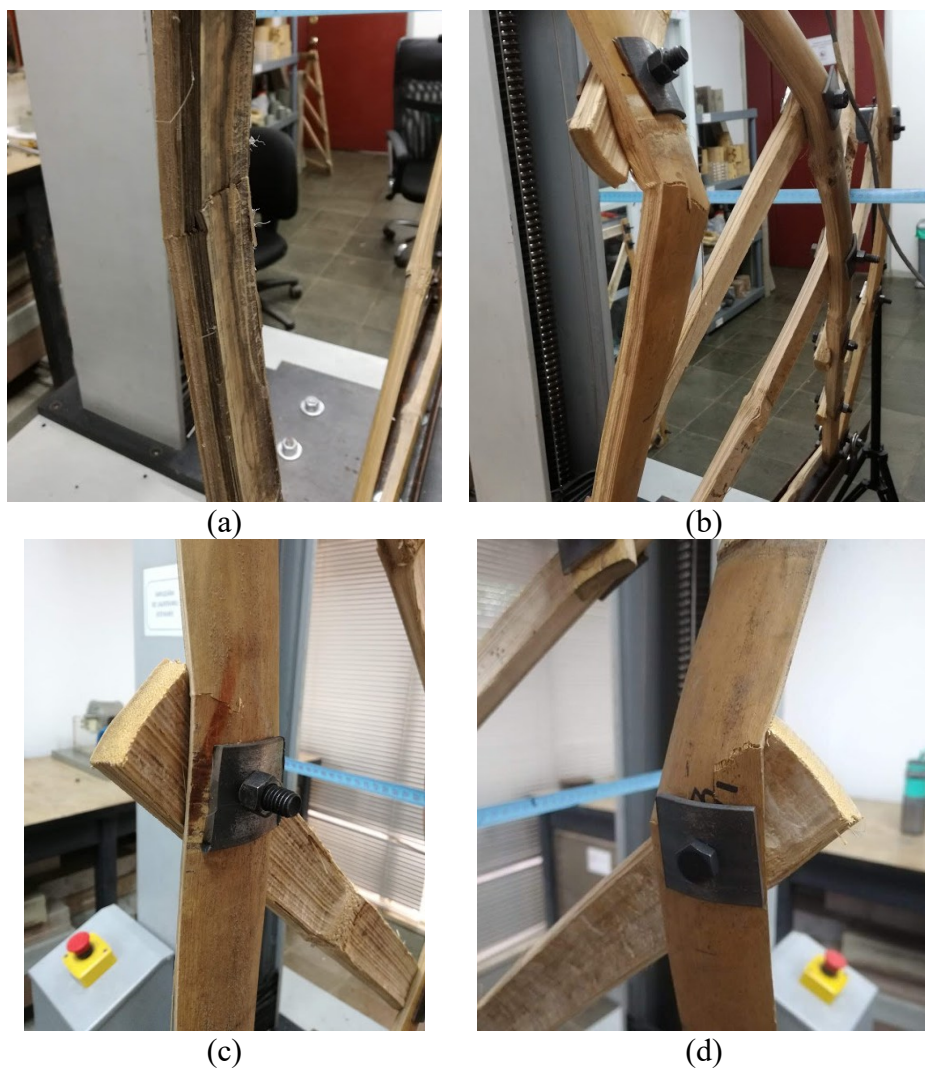


Figura 3.24. Modos de falla presentados en algunas configuraciones.

3.2.3. Modelos

Con el objetivo de comparar la predicción teórica con la respuesta experimental de los paneles en cuanto a la rigidez lateral inicial y la carga crítica de pandeo, se retomaron los modelos realizados en el capítulo dos con las propiedades presentadas en la Tabla 3.5.

Tabla 3.5. Propiedades empleadas en el modelo [18], [25]

Propiedad	Valor	Propiedad	Valor	Propiedad	Valor
E_{11} (MPa)	860	ν_{12}	0.22	G_{12} (MPa)	352
E_{22} (MPa)	860	ν_{13}	0.01	G_{13} (MPa)	581
E_{33} (MPa)	13450	ν_{23}	0.01	G_{23} (MPa)	581

Se cambiaron las condiciones de carga y los espesores de las latas (Tabla 3.6), para que fuesen consistentes con las experimentales. Además, se tuvo en cuenta que las latas de un lado estaban en un plano ligeramente diferente de las latas del otro lado, como se describe en la Figura 3.25.

Tabla 3.6. Espesor promedio de latas por configuración empleadas en el modelo.

Configuración	Espesor	COV
C - I	12,1	0,04
C - II	12,1	0,03
C - II	12,5	0,06

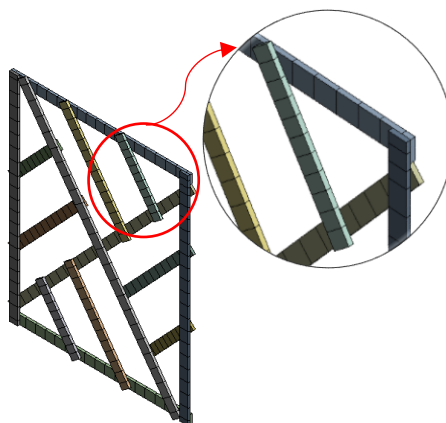


Figura 3.25. Desfase de los elementos del panel. Configuración C- III.

3.2.3.1. Rigidez lateral

En los modelos se aplicó la carga experimental promedio de cada configuración (Figura 3.16). La rigidez se calculó con la relación entre la fuerza y el desplazamiento máximo horizontal obtenidos para cada modelo. Este valor teórico fue alrededor de un 27% menor que la experimental para las tres configuraciones (Tabla 3.7).

Tabla 3.7. Rigidez experimental vs teórica

Configuración	K (N/mm)		
	Experimental	Teórico	Diferencia
C - I	96,1	64,6	33%
C - II	104,5	75,6	28%
C - III	133,3	106,4	20%

Para disminuir la diferencia anterior, se varió el módulo de elasticidad longitudinal (E_{33}); con una variación del 3,35% de este módulo se logró el ajuste presentado en Tabla 3.8. Cabe resaltar, que el módulo resultante para ajustar los resultados ($E=13900$ MPa) se encuentra dentro del rango de

módulos de elasticidad determinados en diversas investigaciones, como se mostró en el capítulo 1 de este documento.

Tabla 3.8. Ajuste de rigidez teórica

Configuración	K (N/mm)		Diferencia
	Experimental	Teórico ($E = 13900$ MPa)	
C - I	96,1	90,8	5%
C - II	104,5	106,7	2%
C - III	133,3	140,3	5%

Type: Directional Deformation(X Axis)
Unit: mm

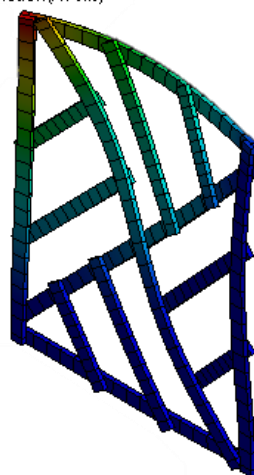
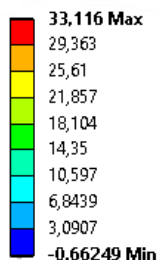


Figura 3.26. Contorno de desplazamientos para la configuración C – III ante una carga de 4846 N y ajustado con $E_{33} = 13900$ MPa.

3.2.3.2. Carga crítica de pandeo

Se comparó la carga crítica de pandeo presentada durante los ensayos con la determinada en los modelos (Figura 3.28). La carga teórica fue menor en un 13%, 21% y 2% a la experimental, para las configuraciones C-I, C-II y C-III respectivamente (Figura 3.28).

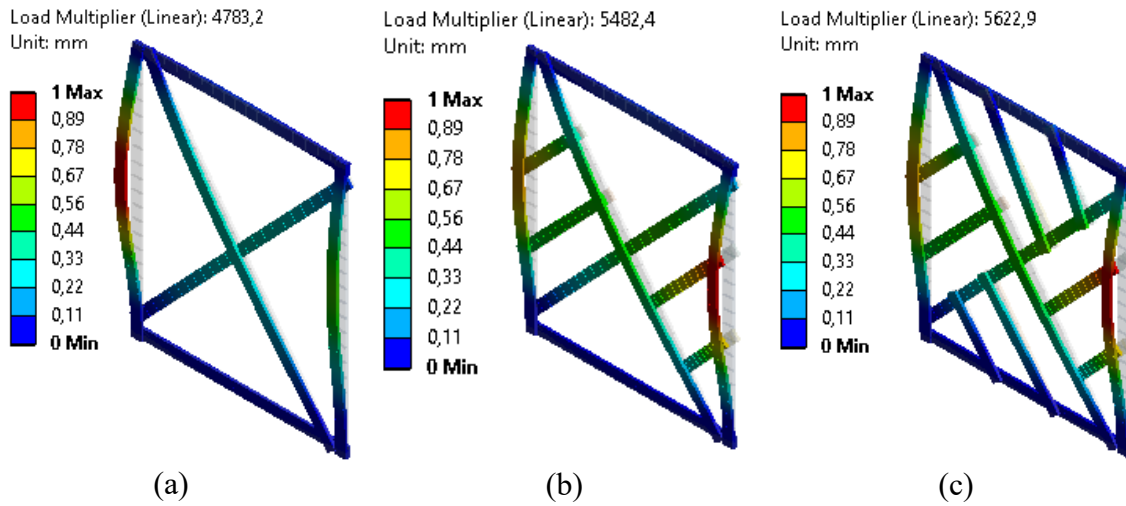


Figura 3.27. Carga crítica de pandeo teórica para cada configuración. (a) C - I, (b) C - II y (c) C - III.

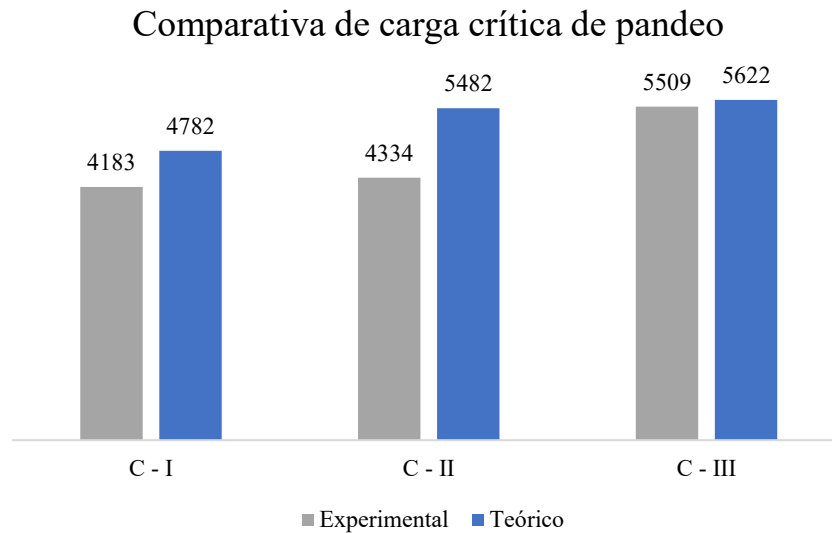


Figura 3.28. Carga crítica de pandeo teórica y experimental.

Capítulo 4. Consideraciones y recomendaciones de uso.

En este capítulo se analizó teóricamente el reforzamiento de paredes de culmos con la inclusión de los paneles de guadua desarrollados en este proyecto. Posteriormente, se hizo un análisis preliminar para verificar la deriva de una aplicación de los módulos reforzados para una estructura de dos niveles. Además, se presenta un estimativo del peso y costo de cada panel y se dan recomendaciones para el proceso constructivo y ensamble.

4.1. Uso para rigidizar módulos de pared

Los paneles pueden ser usados para rigidizar los muros de culmos de guadua presentados en el capítulo I. En la Figura 4.1 se presenta un esquema del panel C – III ensamblado en el muro. Se propone emplear la conexión desarrollada por Morán, R [32] y modificarla para permitir el acople del marco. La modificación consiste en cambiar la diagonal interna que une las abrazaderas por dos diagonales laterales (Figura 4.2).

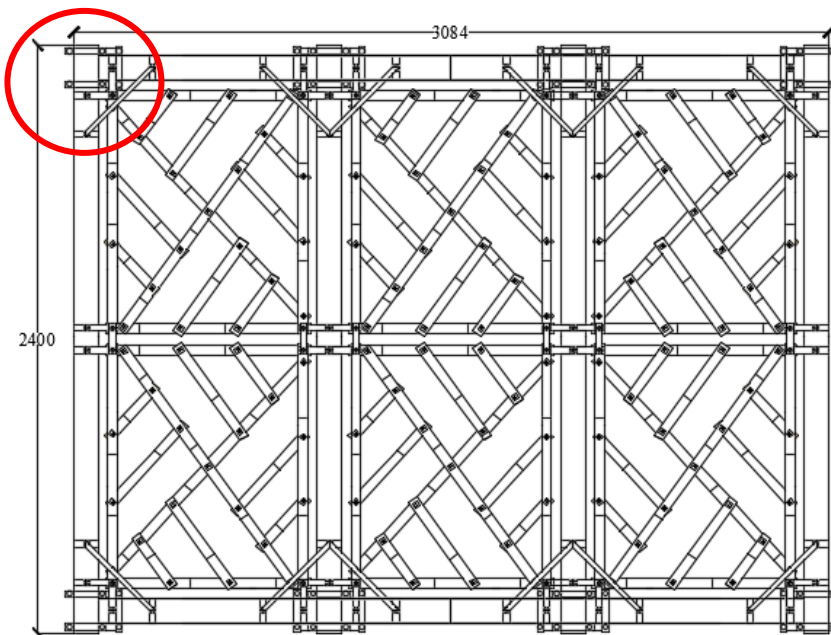


Figura 4.1. Esquema de panel ensamblado en muros de culmos de guadua. Unión tipo VI modificada (círculo rojo). (Unidades en mm).

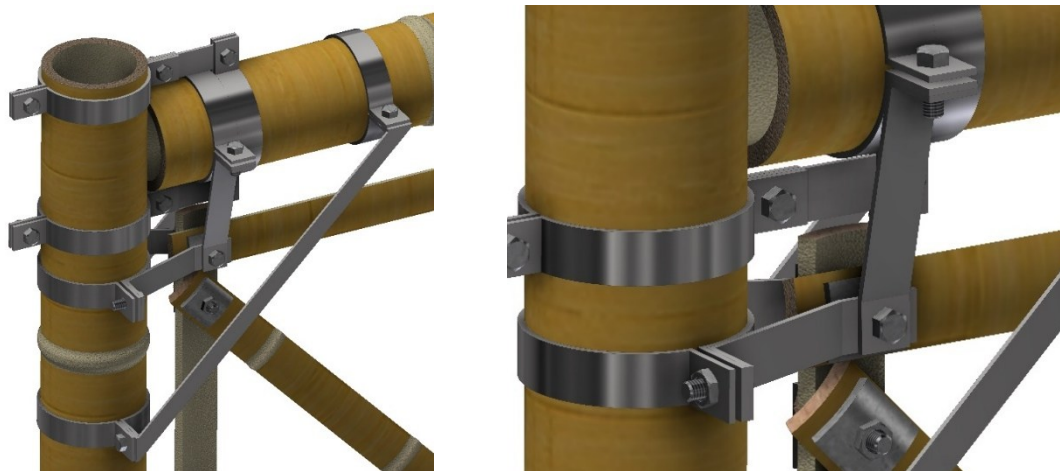


Figura 4.2. Detalle de conexión propuesta para el ensamble panel – muro.

La unión propuesta en el ensamble panel – muro se realiza mediante cuatro platinas de acero inclinadas y dispuestas como se muestra en la Figura 4.2 .

4.1.1. Modelación

En el programa ANSYS AIM se realizó un modelo de un muro con conexiones a momento similar al desarrollado por Moran, R [32]. La representación de los culmos se hizo con un elemento tipo viga con una sección tubular circular de 110 mm de radio exterior y 10 mm de espesor. Se fijó el culmo inferior y se aplicó una carga de 4000 N en el extremo superior derecho del muro.

Adicionalmente, se incluyeron paneles en cada sección. La conexión entre panel y culmo se realizó por medio de latas de acero estructural con 1/8” de espesor, a través de una conexión tipo fija entre: panel – lata de acero y lata de acero – culmo GAK (Figura 4.3). La conexión culmo – culmo se hizo articulada con una rigidez rotacional de 230.585 N.m/rad, que fue la rigidez inicial promedio de la conexión DW reportada por Moran, R en su investigación [32].

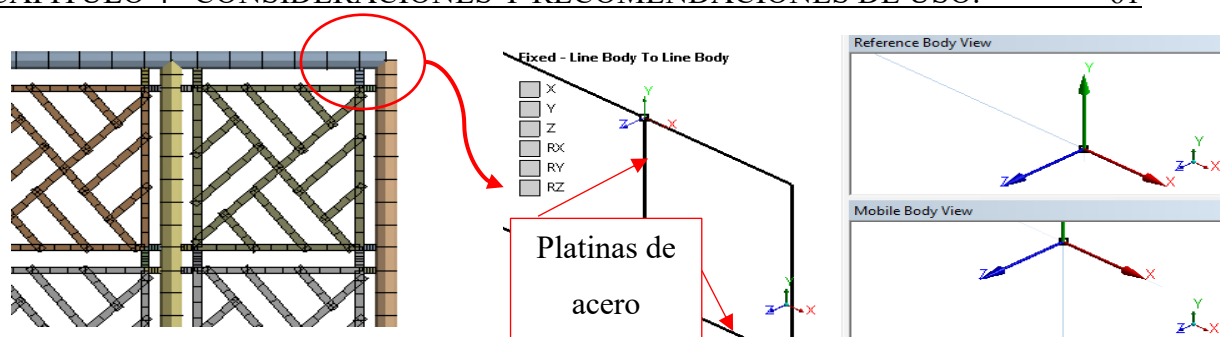
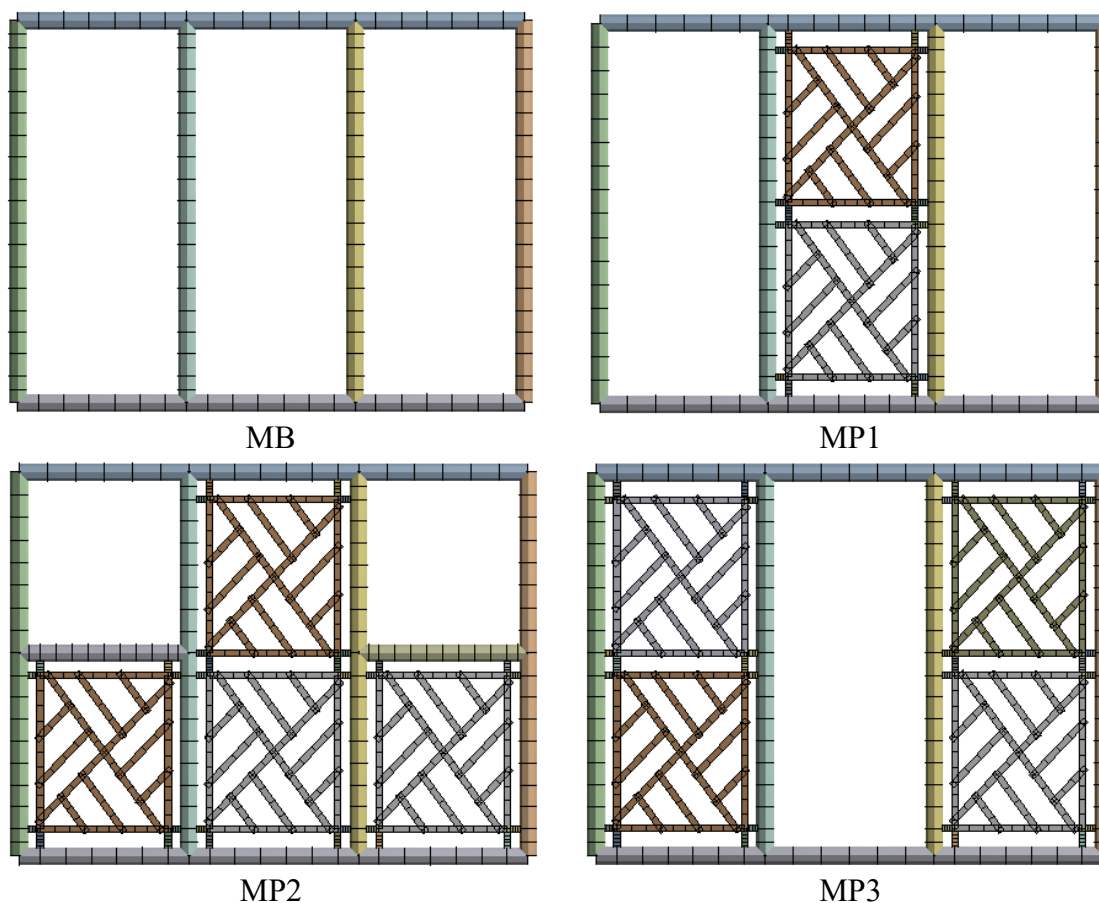


Figura 4.3. Muro con paneles y conexión lata – culmo.

Los culmos se modelaron con las propiedades ortotrópicas de la Tabla 3.5 y los paneles con el módulo de elasticidad longitudinal determinado en el ajuste ($E_{33} = 13900$ MPa). Se realizó el modelo base (MB) más cinco modelos con la distribución de paneles que se puede observar en la Figura 4.4, en este caso el panel empleado fue el C-III; esta misma distribución se realizó además con los paneles C-I y C-II, para un total de 16 modelos.



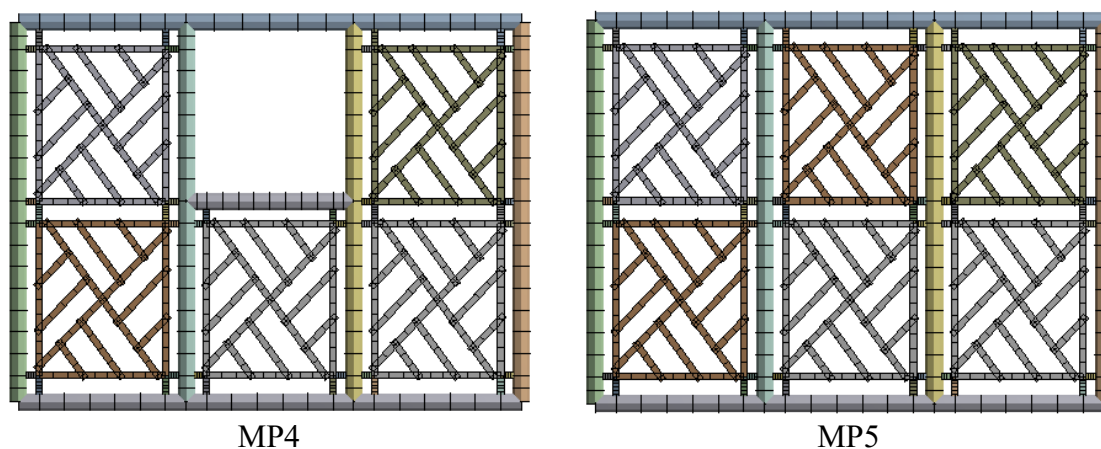


Figura 4.4. Muros de culmos de guadua con paneles de latas en diferentes disposiciones. Panel: Configuración C - III.

4.1.2. Resultados

En la Figura 4.5 se presentan los resultados de rigidez de cada muro de acuerdo con los paneles empleados en cada caso (C – I, C – II y C – III). La rigidez de los muros incrementó a medida que se adicionaron paneles. De igual forma, fue mayor al pasar de emplear la configuración C – I a emplear la configuración C – III.

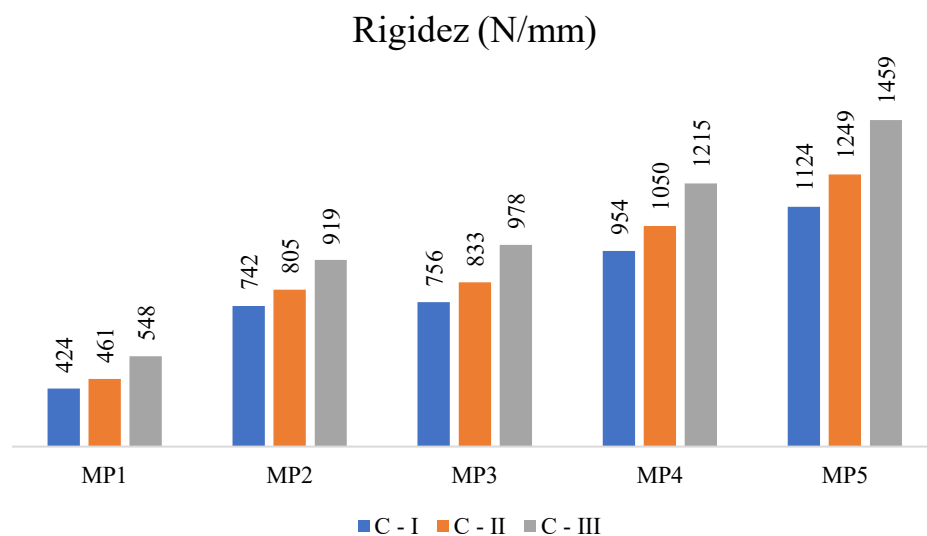


Figura 4.5. Rigidez por cada configuración muro – panel.

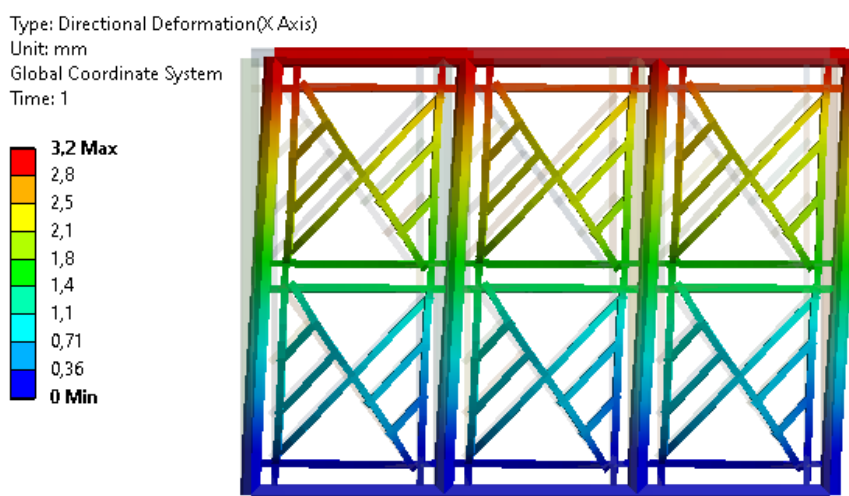


Figura 4.6. Deplazamiento horizontal de muro MP5, panel C – II para una carga de 4000 N.

La rigidez del muro MB con juntas de rigidez rotacional finita y sin paneles fue de 88,6 N/mm. Este valor aumentó en todas las distribuciones empleadas, con un incremento mínimo del 377% con el panel C – I en el muro MP1 y un incremento máximo de 1542% con el panel C – III en el muro MP5 (Tabla 4.1).

Tabla 4.1. Diferencia de rigidez respecto a MB para cada muro de acuerdo con el tipo de panel ensamblado.

Rigidez MB	88,6 N/mm					
Configuración de muro	Tipo de panel ensamblado					
	C - I		C - II		C - II	
	K (N/mm)	Diferencia	K (N/mm)	Diferencia	K (N/mm)	Diferencia
MP1	423	377%	460	419%	547	517%
MP2	740	735%	803	806%	917	934%
MP3	755	752%	831	837%	976	1001%
MP4	952	974%	1048	1082%	1212	1267%
MP5	1122	1165%	1250	1310%	1455	1542%

4.2. Verificación preliminar de deriva para dos niveles

Se determinó la deriva de una aplicación del módulo de pared, sin paneles (condición **A**) y con paneles (condición **B**) para dos niveles. En la Figura 4.7 se muestra la configuración de cada nivel, que tiene un área de 3x3 m² y 2,4 metros de altura, por lo que la estructura de este estudio tendría dos niveles de este tipo. Este módulo de un nivel fue analizado previamente por los ingenieros Laura Villegas [33] y Richard Moran [32] en sus respectivos trabajos de investigación.

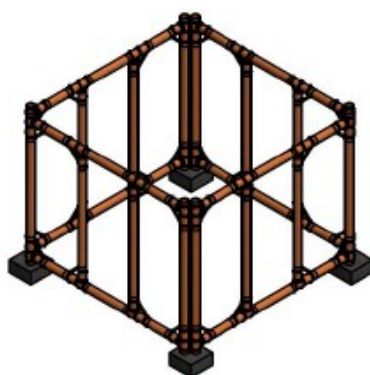


Figura 4.7. Módulo tridimensional base para vivienda modular prefabricada basado en módulos de pared con uniones a momento [32].

4.2.1. Características generales

Se consideró una estructura de uso residencial y ubicada en la ciudad de Cali (amenaza sísmica alta, $A_a=0.25$ y $A_v=0.25$ [38]). Además, se asumió una aplicación típica con un perfil de suelo tipo D. Con base en la información anterior, Villegas, L [33] obtuvo en su investigación una aceleración en la base (S_a) para estructuras de bajo periodo fundamental; en este análisis se tomó el mismo valor. Así, el cortante sísmico en la base se calculó de acuerdo con lo estipulado en la sección A.4.3.1 de la norma:

$$V_s = S_a * g * M$$

Ecuación 4-1

En la Ecuación 4-1, **S_a** es aceleración en la base igual a 0,81, **g** es la aceleración de la gravedad 9,81 m/seg² y **M** es la masa total de la estructura (kg) según la condición **A** o **B**.

Para la condición **A**, se tomó la masa determinada por Villegas, L en su estudio igual a 553 kg [33] y para la condición **B** se sumó el aporte en masa de los paneles, igual a 14,8 kg por panel (Tabla 4.4), es decir 236,8 kg al tener cada nivel 16 paneles, para un total de 789,5 kg por piso y 1579 kg para toda la estructura.

Tabla 4.2. Resultado de análisis de carga lateral para las dos condiciones.

	Condición A	Condición B
Masa por nivel (kg)	553	790
Masa total (kg)	1105	1579
Vs (N)	8780	12534
Fx (N)	4390	6267
Fh (N)	2195	3134

Los resultados se resumen en la Tabla 4.2. La fuerza sísmica horizontal para cada nivel se calculó de acuerdo con las ecuaciones A.4.3-2 y A.4.3-3 de la norma [38], con un C_{vx} igual a 0,5 para las dos condiciones, que se traduce en igual fuerza sísmica para cada nivel. La carga lateral por piso (F_x) se consideró en las dos direcciones ortogonales en planta y es resistida por dos módulos en cada dirección por lo que se dividió en dos para obtener la carga lateral por módulo (F_h).

Las cargas verticales se tomaron igual al caso de carga más crítico reportado por Morán, R, en un análisis similar al de este estudio pero para una estructura de un nivel [32]. En él se considera un material de piso ligero con una carga muerta y viva de 20 kg/m² y 180 kg/m², respectivamente [38].

4.2.2. Modelo

Se retomaron los modelos MB y MP3, realizados en la sección 4.1.1. y se adicionó un nivel en cada uno. Las cargas empleadas y su disposición se muestran en la Figura 4.8. Se generó una condición de apoyo simple en los extremos inferiores puesto que se supone este comportamiento cuando las columnas de los módulos de pared están soportadas por pedestales [32].

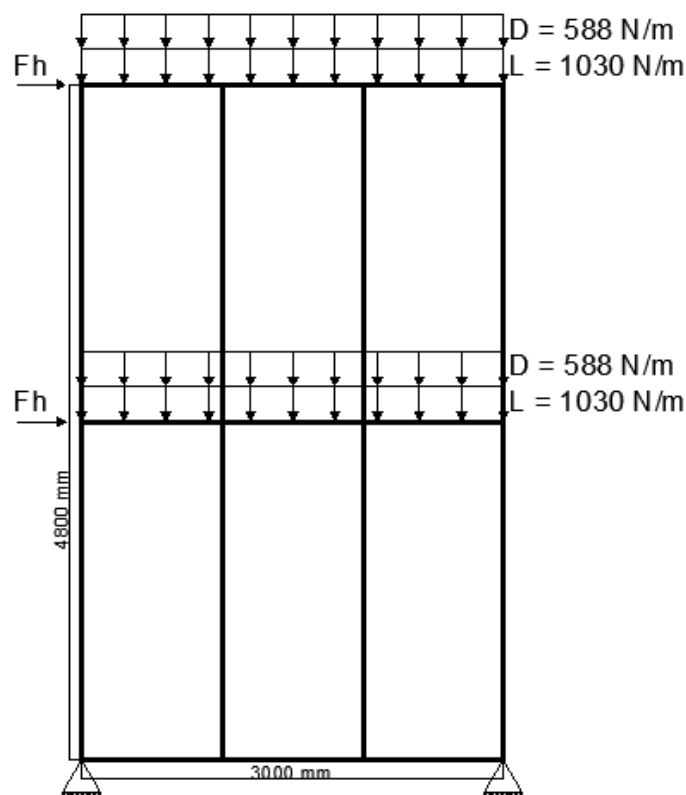


Figura 4.8. Distribución de cargas y apoyo para las condiciones A y B.

4.2.3. Resultados

Con base en los resultados presentados en la Tabla 4.3 la deriva máxima de la condición B sería 0,51%, menor al 1% que es el máximo porcentaje admitido por la norma NSR-10 [38]. Por otro lado, se observó que la condición A no cumplió el requisito de deriva máxima.

Tabla 4.3. Resultados de deriva para las dos condiciones

	Condición A	Condición B
Δ_1 (mm)	90,6	26,7
Δ_2 (mm)	53,2	14,5
Δ (mm)	37,4	12,2
% de deriva	1,56	0,51

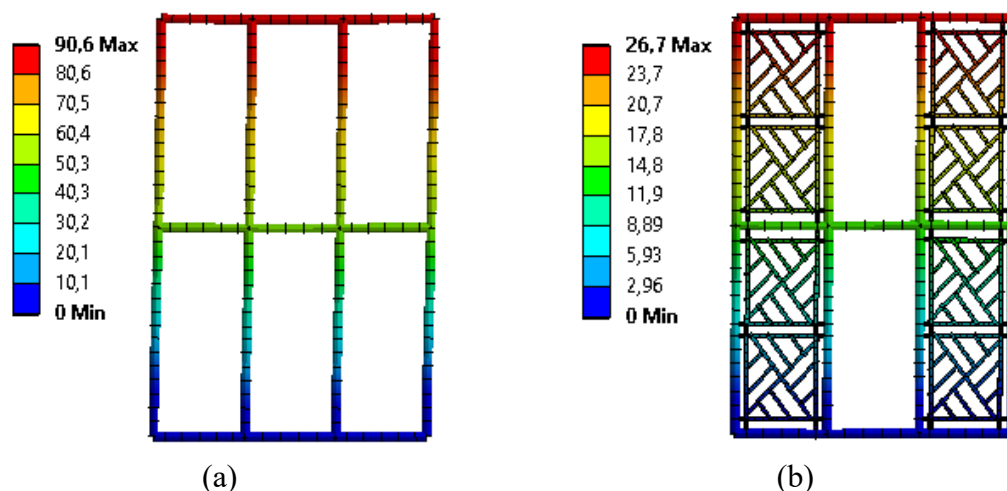


Figura 4.9. Contorno de desplazamiento para los dos modelos (a) Condición A y (b) Condición B. Unidades en mm.

4.3. Uso para rigidizar módulos para puentes peatonales

Otra posible aplicación es en puentes peatonales de guadua, de acuerdo con el esquema presentado en la Figura 4.10. La unión propuesta para este caso es similar a la presentada en el ensamble panel – muro.

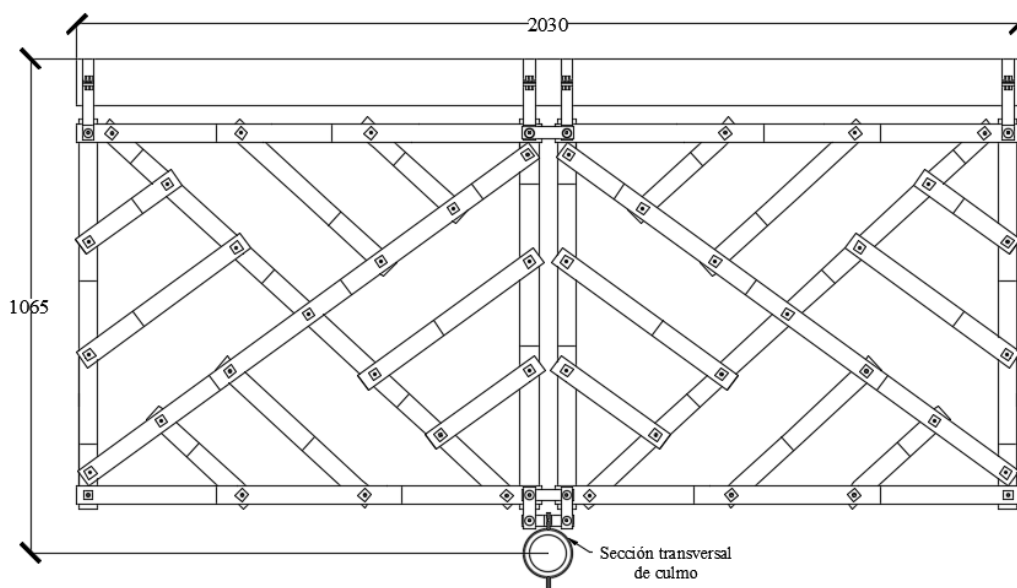


Figura 4.10. Propuesta de uso en puente peatonal (unidades en mm).

4.4. Peso y costo de cada panel

Se estima el costo de cada panel con base en el precio de los materiales empleados y la mano de obra. Los valores presentados en la Tabla 4.4 están referidos a materiales comprados localmente en almacenes de la ciudad de Cali (Colombia) durante el año 2019 con una gravación del IVA del 19%. Se debe considerar que estos costos variarán en función de la cantidad de paneles a fabricar. Entre mayor sea la producción, menores serán los costos.

En la mano de obra se consideró el tiempo empleado en armar cada panel, desde la disposición y corte de cada lata hasta el ensamble de todos los componentes (lata, pernos, platinas y tuercas). Hablar un poco más.

Tabla 4.4. Peso y costo por configuración, ML (metro lineal).

Material	Unidad	Peso (Kg/unidad)	Valor unitario	Cantidad	C - I Total peso (kg)	Total Costo	Cantidad	C - II Total peso (kg)	Total Costo	Cantidad	C - II Total peso (kg)	Total Costo
Lata de guadua 40 x 10 mm ²	ML	0,50	\$ 1.500	6,18	3,09	\$ 9.270	7,78	3,89	\$ 11.670	9,38	4,69	\$ 14.070
Varilla roscada 3/8"	ML	0,30	\$ 5.000	0,48	0,14	\$ 2.400	0,48	0,14	\$ 2.400	0,48	0,14	\$ 2.400
Platina curva perforada	unidad	0,04	\$ 200	18	0,72	\$ 3.600	34	1,36	\$ 6.800	50	2,00	\$ 10.000
Perno 3/8"	unidad	0,25	\$ 600	9	2,25	\$ 5.400	17	4,25	\$ 10.200	25	6,25	\$ 15.000
Tuerca hexagonal 3/8"	unidad	0,07	\$ 200	9	0,62	\$ 1.800	17	1,17	\$ 3.400	25	1,72	\$ 5.000
Mano de obra (1 persona)	Día	-	\$ 60.000	1	-	\$ 60.000	1	-	\$ 60.000	1	-	\$ 60.000
Totales					6,82 kg	\$ 82.470		10,81 kg	\$ 94.470		14,80 kg	\$ 106.470

4.5. Recomendaciones generales

- Se recomienda que las latas no presenten nodos en las uniones de las esquinas, y en caso de presentarse, se raspe la capa sobresaliente de este. Lo anterior con el fin de que no quede una unión más gruesa que la otra, ya que esto genera partes del panel fuera del plano.
- Es importante emplear latas que tengan espesores y anchos de al menos de 10 mm y 40 mm respectivamente, que fueron las dimensiones promedio empleadas en los análisis.
- En el proceso constructivo se recomienda armar inicialmente el marco y verificar que en cada esquina las latas presenten un ángulo de 90°. Posteriormente, se señalan los puntos donde irán los elementos internos para luego proceder a perforar.
- Durante los ensayos se evidenció que los paneles perdieron resistencia cuando aumentó la deflexión fuera del plano. Por tanto, se sugiere emplear elementos adicionales que restrinjan ese tipo de desplazamientos. Tales mecanismos pueden ser similares al propuesto en la Figura 4.2. De esta forma, la rigidez de los paneles será mayor que las obtenidas en este estudio. El análisis de estas configuraciones arriostradas fuera del plano serán objeto de otros proyectos.
- Para garantizar la integridad del panel y resistencia a las condiciones climatológicas, se recomienda aplicar una sustancia protectora sobre las latas y los elementos metálicos.

Capítulo 5. Discusión y conclusiones

- Las latas de guadua como elementos constructivos permiten adoptar diferentes geometrías para la creación de nuevos sistemas que puedan tener funcionalidad arquitectónica y estructural.
- En la prueba de carga lateral se determinó la fuerza máxima y la rigidez inicial. Las fuerzas máximas resistidas por cada panel fueron de 3.354 N, 3.881 N y 6.007 N para las configuraciones C – I, C – II y C – III respectivamente. Además, la rigidez inicial fue 80,23 N/mm, 104,5 N/mm y 133,3 N/mm para esas mismas configuraciones. Tras analizar los anteriores resultados, la tercera configuración fue la que presentó mejor comportamiento, mientras que las dos primeras configuraciones presentaron resultados similares entre sí.
- En la prueba de carga axial se analizó principalmente la carga crítica de pandeo. La carga mínima de pandeo fue de 3.921 N, 3.876 N y 4.491 N para las configuraciones C- I, C – II y C – III respectivamente. Se evidencia que ante esta propiedad, los paneles no difirieron mucho en sus resultados.
- Se desarrollaron modelos teóricos para comparar la rigidez experimental, con un ajuste del 5%, 2% y 5% para las configuraciones C – I, C – II y C – III respectivamente. Al comparar la carga crítica de pandeo teórica con la experimental se obtuvo una diferencia del 13%, 21% y 2% para las configuraciones C – I, C – II y C – III respectivamente.
- En algunos resultados se observó gran variabilidad, esto es porque se trabajó con un material natural, y a pesar del intento de controlar todas las variables (humedad, espesores, anchos), fue imposible tener un control más cercano como en otros materiales más homogéneos.
- De las tres configuraciones propuestas la que presentó mejores resultados, tanto en carga axial como lateral, fue la tercera configuración, C – III, con mayor cantidad de elementos diagonales.

- Se determinó la deriva de una aplicación del módulo de pared arriostrado con el panel C – III, con un resultado menor al 1% exigido por la norma NSR10 [38]. Este análisis preliminar fue en el plano y no se consideró el aporte en rigidez que se obtiene al realizar un análisis más desarrollado que considere la estructura en sus tres dimensiones. Es decir que se evaluó la estructura bajo una condición crítica con unos resultados de deriva positivos en busca de estructuras de guadua de dos niveles.
- El uso de los paneles en muros de culmos de guadua aporta versatilidad a los procesos constructivos, especialmente ante la necesidad de colocar puertas y ventanas. Además, los paneles pueden tener una posibilidad de uso en su aplicación en puentes peatonales, con base en la carga que resisten y la condición de apoyo que se genere en el puente. La investigación en este campo puede ofrecer una gran variedad de posibilidades.
- Se examinó la funcionalidad de un sistema estructural conformado por latas de guadua en el que se obtuvieron resultados adecuados para ser implementados en estructuras reales. Con el uso de estos paneles se busca incentivar la aplicación de la guadua en sistemas constructivos como muros o puentes.
- Emplear mecanismos que restrinjan el pandeo de los elementos internos de los paneles puede mejorar considerablemente el desempeño de estos. Se plantea analizar lo anterior en trabajos posteriores.
- Se propone realizar más investigaciones en el desarrollo de los paneles, al diseñar sistemas con dos latas en lugar de una en cada elemento y observar la influencia en el desempeño del panel.

Bibliografía

- [1] J. Cobos Fischer y X. León Rodríguez, «Propiedades Físicas-Mecánicas De La Guadua Angustifolia Kunth Y Aplicación Al Diseño De Baterías Sanitarias Del IASA II.», p. 134, 2007.
- [2] M. N. Muchiri y M. O. Muga, «A preliminary yield model for natural Yushania alpina bamboo in Kenya.», *J. Nat. Sci. Res.*, vol. 3, n.º 10, pp. 77-84, 2013.
- [3] Y. Isagi, T. Kawahara, K. Kamo, y H. Ito, «Net production and carbon cycling in a bamboo Phyllostachys pubescens stand», *Plant Ecol.*, vol. 130, n.º 1, pp. 41-52, 1997.
- [4] M. Añazco, *Estudio de vulnerabilidad del bambú (Guadua angustifolia) al cambio climático en la costa del Ecuador y norte del Perú*. 2014.
- [5] O. Barreto, «Elaboración del perfil y la caracterización tecnológica, administrativa y financiera de las empresas de transformación de guadua», Armenia, ATN/ME-10697-CO, 2009.
- [6] H. A. Agudelo, A. V. Hernández, y D. A. R. Cardona, «Sostenibilidad: actualidad y necesidad en el sector de la construcción en Colombia», *Gestión y Ambient.*, vol. 15, n.º 1, pp. 105-118, 2012.
- [7] Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, «NSR-10, Título G Norma Sísmoresistente Colombiana», 2010.
- [8] M. Villegas, *Guadua: Arquitectura y Diseño*. Bogotá, Colombia, 2003.
- [9] K. Ghavami y A. B. Marinho, «Propriedades físicas e mecânicas do colmo inteiro do bambu da espécie Guadua angustifolia», *Rev. Bras. Eng. Agrícola e Ambient.*, vol. 9, n.º 1, pp. 107-114, 2005.

-
- [10] E. Salas Delgado, «Actualidad y futuro de la arquitectura de bambú en Colombia», *TDX (Tesis Dr. en Xarxa)*, 2008.
- [11] M. Mejia Estrada, «Extracción y caracterización mecánica de las fibras de bambú (*Guadua angustifolia*) para su uso potencial como esfuerzo de material compuesto», *Univ. los Andes*, n.º January 2010, pp. 1-146, 2010.
- [12] S. Vélez, «Arquitectura con bambú», 2018.
- [13] O. A. Arce-Villalobos, «Fundamentals of the Design of Bamboo Structures», 2002.
- [14] T. Wan, «Numerical Analysis of Laminated Bamboo Strip Lumber (Lbsl)», n.º July, p. 200, 2005.
- [15] H. P. S. Abdul Khalil, I. U. H. Bhat, M. Jawaaid, A. Zaidon, D. Hermawan, y Y. S. Hadi, «Bamboo fibre reinforced biocomposites: A review», *Mater. Des.*, vol. 42, n.º July, pp. 353-368, 2012.
- [16] P. Chaowana, M. C. Barbu, y A. Frühwald, «Bamboo - A functionally graded composite material», *For. Prod. J.*, vol. 65, n.º 3-4, pp. S48-S53, 2015.
- [17] S. Amada, T. Munekata, Y. Nagase, Y. Ichikawa, A. Kirigai, y Y. Zhifei, «The mechanical structures of bamboos in viewpoint of functionally gradient and composite materials», *J. Compos. Mater.*, vol. 30, n.º 7, pp. 800-819, 1996.
- [18] J. Duque y J. J. García, «Desarrollo de una unión base-columna para estructuras de guadua», Universidad del Valle, Colombia, p. 91, 2018.
- [19] Lucia Aguilar, «Manual para la Construcción con Bambú», p. 49, 2017.
- [20] W. Carvajal, W. Ortegón, y C. Romero, «Elementos estructurales en bambú», Universidad Nacional de Colombia, 1981.
- [21] L. F. López y J. F. Correal, «Exploratory study of the glued laminated bamboo guadua

-
- angustifolia as a structural material», *Maderas. Cienc. y Tecnol.*, vol. 11, n.º 3, pp. 171-182, 2009.
- [22] F. A. L. Baéz, C. F. U. Bonells, y S. A. Pardo, «Modular footbridges of guadua angustifolia kunth», *Key Eng. Mater.*, vol. 668, pp. 218-226, 2016.
- [23] P. Luna, J. Lozano, y C. Takeuchi, «Determinación experimental de valores característicos de resistencia para guadua angustifolia», *Maderas Cienc. y Tecnol.*, vol. 16, n.º 1, pp. 77-92, 2014.
- [24] G. Orozco, L. Villegas, y J. J. García, «Mechanical behavior of bamboo species Guadua angustifolia under compression along the thickness of the culm», *Key Eng. Mater.*, vol. 600, pp. 49-56, 2014.
- [25] J. J. García, C. Rangel, y K. Ghavami, «Experiments with rings to determine the anisotropic elastic constants of bamboo», *Constr. Build. Mater.*, vol. 31, pp. 52-57, 2012.
- [26] Torres Franco Yessenia Torres, «Bambú, Una Cultura Y Una Evolución», p. 66, 2017.
- [27] L. Villegas, R. Morán, y J. J. García, «A new joint to assemble light structures of bamboo slats», *Constr. Build. Mater.*, vol. 98, pp. 61-68, 2015.
- [28] V. Puri, P. Chakraborty, S. Anand, y S. Majumdar, «Bamboo reinforced prefabricated wall panels for low cost housing», *J. Build. Eng.*, vol. 9, n.º November 2016, pp. 52-59, 2017.
- [29] L. Villegas, R. Morán, y J. J. García, «Combined culm-slat Guadua bamboo trusses», *Eng. Struct.*, vol. 184, n.º February, pp. 495-504, 2019.
- [30] O. Hidalgo López, *The Gift of the Gods*. 2003.
- [31] J. C. Herrera Martinez y C. P. Takeuchi Tam, «Comportamiento de pórticos en Guadua angustifolia, rigidizados mediante paneles prefabricados en bahareque», *Ing. e Investig.*, vol. 29, n.º 3, pp. 5-12, 2009.

- [32] R. Moran, «Desarrollo de juntas con precompresión transversal para culmos de guadua *Angustifolia Kunth*», Universidad del Valle, 2019.
- [33] L. V. Villegas, «PROPUESTA DE PROCESO CONSTRUCTIVO DE UN SISTEMA MODULAR PREFABRICADO DE GUADUA *ANGUSTIFOLIA* PARA VIVIENDA», 2017.
- [34] J. M. Gere y B. J. Goodno, *Mecánica de materiales*, Séptima ed. México, D.F.: Cengage LearningTM.
- [35] L. V. Villegas, «Desarrollo y evaluación de una nueva unión para estructuras de latas de guadua», Universidad del Valle, 2014.
- [36] P. Pantoja, «Caracterización de uniones de latas», Universidad del Valle, 2020.
- [37] I. 60812, «International Standard International Standard - ISO 21581», *61010-1* © *Iec2001*, vol. 2006, p. 13, 2006.
- [38] NSR-10, «NSR-10 Requisitos generales de diseño y construcción sismo resistente», *Nsr-10*, vol. Título A, p. 186, 2010.