

CARACTERIZACIÓN ESTRUCTURAL DE VIGAS DE PINBOO CON PINES
PRESECADOS

Natalia Hernández Viedman

Universidad del Valle

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería Civil y Geomática

Programa Académico de Ingeniería Civil

Santiago de Cali, Enero de 2026

CARACTERIZACIÓN ESTRUCTURAL DE VIGAS DE PINBOO CON PINES

PRESECADOS

Natalia Hernández Viedman

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniería Civil

Directores:

José Jaime García Álvarez

Jhonathan Alexander Duque Orobio

Universidad del Valle

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería Civil y Geomática

Programa Académico de Ingeniería Civil

Santiago de Cali, Enero de 2026



Nota de aceptación

Aprobado por el comité de grado en cumplimiento de los requisitos exigidos por la Universidad del Valle para optar al título de Ingeniera Civil.

Jurado

Jurado

Santiago de Cali, Enero de 2026

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por darme la fortaleza, la confianza y la serenidad necesarias para continuar y alcanzar esta meta.

A mi mamá, por su amor, sus palabras de apoyo y por acompañarme en cada etapa de este proceso. A mi hermano, por estar siempre presente. A mi tío, por toda su ayuda y por brindarme su apoyo en todo momento.

A mis abuelos, aunque no estén físicamente conmigo, sé que siempre me han apoyado y estarían muy orgullosos de cada logro alcanzado.

A mi pareja, por ser una pieza fundamental en este trabajo de investigación, por su paciencia, comprensión y por acompañarme en cada uno de los proyectos que realicé a lo largo de la carrera. Gracias por estar a mi lado, por ayudarme en todo y por brindarme apoyo incondicional durante todo este proceso.

A mi amiga, por su apoyo constante, su ayuda desinteresada y por animarme en los momentos difíciles.

A mis directores, por su guía, dedicación y acompañamiento constante, así como por su disposición para resolver mis dudas y orientarme en cada etapa del proceso.

A todas las personas que, de una u otra manera, me han brindado su ayuda, apoyo y cariño durante este proceso.

Y finalmente, a mis mascotas, por su compañía y cariño en cada noche de traspaso, convirtiéndose en una fuente de tranquilidad y alegría durante este camino.

CONTENIDO

LISTA DE TABLAS	7
LISTA DE ILUSTRACIONES	7
RESUMEN	9
I. INTRODUCCIÓN.....	10
1.1. Introducción general.....	10
1.2. Formulación del problema	13
1.3. Objetivos	14
1.3.1. Objetivo general.....	14
1.3.2. Objetivos específicos	14
II. MARCO TEÓRICO	15
2.1. Antecedentes	15
2.2. Estado del arte	17
2.3. <i>Guadua Angustifolia Kunth</i>	19
2.3.1. Características del material	19
2.3.2. Ciclo de vida de la Guadua	19
2.3.3. Partes del culmo.....	20
III. CARACTERIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LATAS Y PINES DE GUADUA	21
3.1. Caracterización mecánica de latas de Guadua	21
3.1.1. Fabricación de latas.....	21
3.1.2. Ensayo a flexión pura en latas	23
3.2. Caracterización mecánica de pines de Guadua	29
3.2.1. Fabricación de pines	29
3.2.2. Ensayo a flexión pura en pines	30
3.2.3. Ensayo a cortante doble en pines	33
IV. CONSTRUCCIÓN DE VIGAS DE PINBOO	37
4.1. Evaluación del espaciamiento óptimo entre pines	37
4.1.1. Fabricación de prototipos.....	37
4.1.2. Ensayo a flexión pura en probetas de Pinboo de 70 cm	38
4.1.3. Discusión de resultados.....	41
4.2. Prototipos finales.....	44

4.2.1.	Fabricación de prototipos.....	44
4.2.2.	Presecado de pines	44
V.	RESULTADOS Y ANÁLISIS	46
5.1.	Ensayo a flexión pura en prototipos finales	46
5.2.	Determinación del momento de inercia teórico y efectivo	47
5.3.	Análisis de resultados de los ensayos.....	48
5.4.	Análisis estadístico de los resultados	53
5.4.1.	Análisis de varianza (ANOVA)	53
5.4.2.	Análisis descriptivo.....	54
5.5.	Análisis comparativo con estudios previos	55
5.6.	Recomendaciones de diseño para el uso de vigas de Pinboo según la norma NSR-10 .	56
VI.	CONCLUSIONES	59
VII.	REFERENCIAS.....	61
VIII.	ANEXOS	66
A.1.	Construcción de elementos para el montaje experimental	66
A.2.	Ensayos de determinación de espaciamiento	68

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Resultados ensayos de flexión en latas a 4 puntos, 70 especímenes.....	28
Tabla 2 Resultados ensayos de flexión en pines a 4 puntos, 35 especímenes.....	33
Tabla 3 Resultados de carga máxima para cada espaciamiento entre pines.	41
Tabla 4 Resultados experimentales de probetas finales.	50
Tabla 5 Separación admisible de vigas de 8 latas en entrepisos y cubiertas de acuerdo con la NSR-10.	57

LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1 Elaboración del Pinboo.....	12
Ilustración 2 Esquema de direcciones radial y tangencial de la guadua.	15
Ilustración 3 Tableros de Pinboo.....	17
Ilustración 4 Conformación de un culmo de guadua.	20
Ilustración 5 Fabricación de latas de caracterización.	22
Ilustración 6 Dimensiones de las probetas. (1) Sentido radial, (2) Sentido tangencial (mm).....	23
Ilustración 7 Montaje experimental (mm).	24
Ilustración 8 Montaje experimental de latas.	25
Ilustración 9 Falla típica en latas.	25
Ilustración 10 Curva de carga vs Desplazamiento.	27
Ilustración 11 Distribución gamma MOR.....	28
Ilustración 12 Distribución normal MOE.	28
Ilustración 13 Fabricación de pines de guadua.	29
Ilustración 14 Montaje experimental de pines.	30
Ilustración 15 Falla típica en pines.	31
Ilustración 16 Curva de carga vs Desplazamiento.	32
Ilustración 17 Distribución gamma MOR.....	33
Ilustración 18 Distribución gamma MOE.....	33
Ilustración 19 Montaje experimental.	34
Ilustración 20 Montaje experimental de cortante en pines.	34
Ilustración 21 Falla típica de cortante.	35
Ilustración 22 Curva de carga vs Desplazamiento.	36
Ilustración 23 Fabricación de prototipos.....	37
Ilustración 24 Probetas con distintas separaciones (mm).	38
Ilustración 25 Montaje experimental.	39
Ilustración 26 Curvas de carga vs desplazamiento.	40
Ilustración 27 Fallas típicas para probetas con espaciamiento de 100mm.	42
Ilustración 28 Fallas típicas para probetas con espaciamiento de 150mm.	43
Ilustración 29 Fallas típicas para probetas con espaciamiento de 200mm.	43
Ilustración 30 Probetas finales (mm).	46
Ilustración 31 Montaje experimental.	47

Ilustración 32 Curvas de carga vs desplazamiento.	49
Ilustración 33 Montaje y falla típica en las probetas de 4 latas	52
Ilustración 34 Montaje y falla típica en las probetas de 8 latas.	53
Ilustración 35 Distribución de $P_{\text{máx}}$ por alternativa.....	54
Ilustración 36 Relación $P_{\text{máx}}$ - $\delta_{\text{máx}}$ de cada probeta.	55
Ilustración 37 Separación de viguetas para entresijos y cubiertas (mm).	58
Ilustración 38 Dispositivo de aplicación de carga caracterización mecánica del bambú.	66
Ilustración 39 Dispositivo de aplicación de carga prototipos de espaciamiento.....	66
Ilustración 40 Dispositivo de aplicación de carga prototipos finales.....	67
Ilustración 41 Apoyos y arriostramientos laterales, respectivamente.	67
Ilustración 42 Probeta de 70cm, con espaciamiento de 200 mm, con latas sin cepillar.	68
Ilustración 43 Probeta de 70cm, con espaciamiento de 150 mm, con latas cepilladas.....	68

RESUMEN

El objetivo de este estudio fue evaluar el comportamiento de elementos estructurales de *Guadua angustifolia Kunth* elaboradas con el sistema constructivo Pinboo, mediante el cual se unen latas con pines de guadua insertados transversalmente. Las latas son listones que se obtienen de culmos mediante cortes longitudinales. Comparadas con el uso de culmos, las latas reducen el desperdicio del material y son más regulares geométricamente. Los pines fueron previamente secados para reducir sus dimensiones temporalmente y facilitar su instalación. En la primera fase se caracterizó el material; mediante ensayos de flexión y cortante doble perpendicular a las fibras. En la segunda fase se realizaron pruebas piloto con base en las cuales se definió experimentalmente un espaciamiento óptimo entre pines de 200 mm. Con este espaciamiento se construyeron vigas de 1.6 m de longitud con variación del número de latas (4 y 8) y el diámetro de los pines (9.5 mm y 12.7 mm). Se ensayaron a flexión cinco especímenes de cada grupo con la fuerza orientada perpendicular a los pines.

El incremento del número de latas de cuatro a ocho aumentó la capacidad en términos de esfuerzos entre el 18 % y el 40 %. Este comportamiento confirma la influencia del momento de inercia en la respuesta estructural, por lo que el aumento de la sección conlleva un incremento de la capacidad resistente. Por otro lado, la relación entre el momento de inercia efectivo y el teórico fue similar tanto en los prototipos de cuatro y ocho latas, lo que confirma una adecuada acción conjunta de los elementos, aunque se presentaron fenómenos de inestabilidad lateral-torsional. Con base en los límites de deflexión establecidos en la Tabla G.3.2-1 por la NSR-10, la separación admisible entre vigas de ocho latas varió entre 124 y 1280 mm para entrepisos y entre 155 y 1610 mm para cubiertas.

Palabras clave: *Guadua angustifolia*, flexión, cortante, pines, rigidez, Pinboo.

I. INTRODUCCIÓN

1.1.Introducción general

Durante las últimas décadas, la guadua ha obtenido mayor reconocimiento como un material sostenible en el ámbito de la construcción, debido a sus destacadas propiedades estructurales y beneficios ecológicos (Rampal et al., 2023). Como un recurso natural, la guadua presenta múltiples ventajas, tales como su rápido crecimiento y su capacidad de regenerarse sin necesidad de replantación. Adicionalmente, los guaduales se distinguen por su capacidad de absorber grandes cantidades de dióxido de carbono, contribuyendo de manera significativa a la mitigación del cambio climático. A pesar de sus cualidades estructurales, la implementación de la guadua en aplicaciones estructurales enfrenta desafíos considerables que deben de ser abordados con el fin de garantizar mayor eficiencia y seguridad a la hora de construir (Aniñon & Estelito, 2024).

Entre los aspectos que deben considerarse en el uso estructural del bambú se encuentra la caracterización de sus propiedades mecánicas, las cuales están influenciadas por variables como la especie, la edad de maduración, el contenido de humedad y las condiciones de crecimiento. Estas variaciones, propias de los materiales naturales, inciden en el comportamiento estructural del material y hacen necesaria la definición de criterios de selección y diseño adecuados para su aplicación en sistemas constructivos (Vélez, 2006). En este sentido, investigaciones previas han reportado valores representativos que evidencian su potencial estructural, como resistencias a la compresión de hasta 98.2 MPa en *Bambusa nutan*, resistencias a la tracción de 226.3 MPa en *Bambusa tulda* y resistencias al corte paralelo a las fibras de 19.5 MPa en *Dendrocalamus hamiltonii*, además, de un módulo de elasticidad aproximadamente un 84% superior al de la madera, lo que le confiere mayor rigidez y

estabilidad y permite la implementación de elementos estructurales más ligeros (Aniñón & Lessandro Estelito, 2024). Los desafíos en el uso de culmos de guadua se deben a sus variaciones dimensionales, irregularidades naturales y su forma cilíndrica y hueca, lo que hace más complejo diseñar uniones debido a que no son perfectamente circulares ni uniformes (Janssen, 2000). Por otro lado, el uso de culmos implica un alto desperdicio de material debido a las fisuras longitudinales, características que aumentan la complejidad del diseño y de la construcción en comparación con materiales más uniformes (Mitch et al., 2010). En este contexto, se ha explorado el uso de latas de guadua, entendidas como listones obtenidos mediante cortes longitudinales del culmo, que pueden unirse entre sí para conformar elementos estructurales compuestos (Aniñón & Estelito, 2024). Dado que el comportamiento estructural de estos elementos compuestos está fuertemente condicionado por el tipo de unión empleada, diversos estudios han analizado distintos sistemas de conexión para elementos de bambú. De acuerdo con la revisión realizada por Aniñón y Estelito (2024), la unión de elementos de bambú puede lograrse mediante conexiones tradicionales, como amarres con fibras naturales, sintéticas o zunchos metálicos y conexiones modernas, que incluyen pernos o tornillos, abrazaderas metálicas, platinas de acero, etc. Otra alternativa, explorada en la presente investigación es el uso de pines de guadua que unen múltiples latas o listones del mismo material para formar miembros estructurales compuestos. Esta técnica, llamada Pinboo, fue usada en sus inicios para el desarrollo de paneles con fines arquitectónicos y estéticos (Better Bamboo Buildings, s. f.). Sin embargo, en los últimos años ha resurgido como una opción viable para la construcción de elementos con uso estructural.

El presente trabajo, explora el uso de latas conectadas con pines para el desarrollo de vigas, como caso de estudio particular, debido a su alto potencial para proyectos sociales.

Adicionalmente, se evalúa el efecto del presecado de pines, el cual facilita su instalación debido a la reducción volumétrica al bajar el contenido de humedad. En este contexto, el sistema Pinboo permite un mayor control en el diseño y en el proceso constructivo mediante el empleo de uniones normalizadas. El proceso de elaboración del sistema Pinboo se muestra en la Ilustración 1.

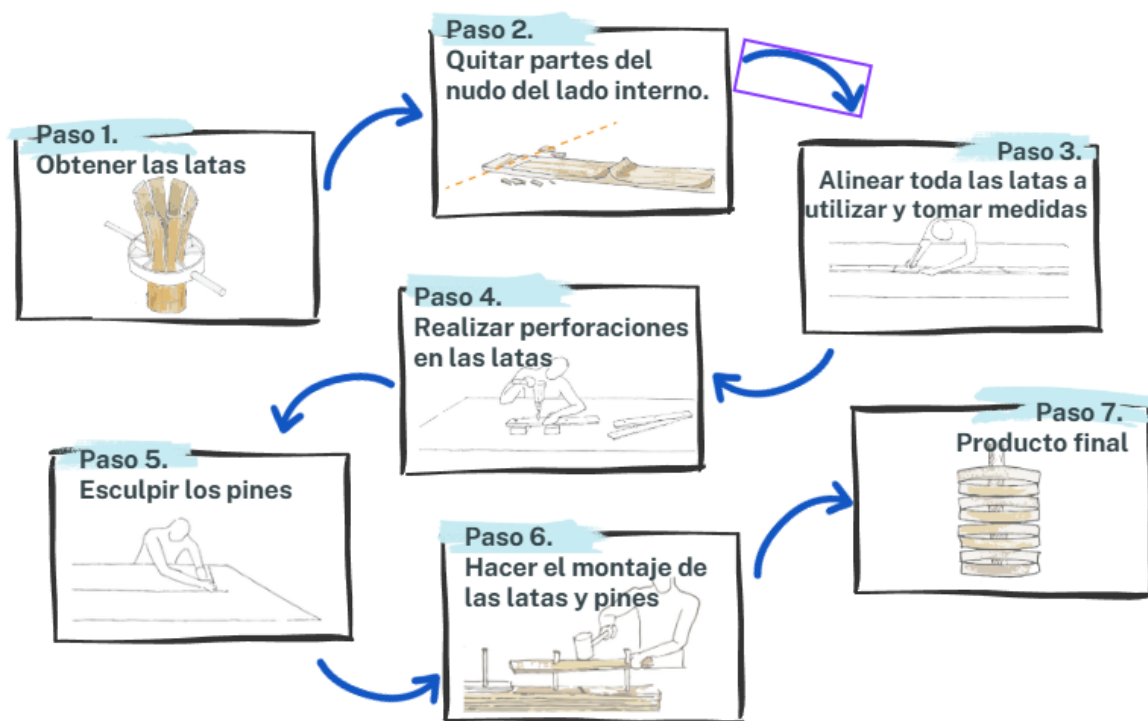


Ilustración 1 Elaboración del Pinboo

Fuente: Elaboración propia a partir de Manual para la construcción con bambú (Lucila Aguilar Arquitectos, 2019).

El propósito de esta investigación es evaluar el desempeño estructural a flexión de las vigas construidas mediante el sistema Pinboo, se busca identificar las ventajas y limitaciones de esta técnica frente a los métodos tradicionales. Los factores analizados fueron el número de lata y la separación entre pines. De las cinco probetas de cada grupo, cuatro fueron

ensayadas después de que los pines recuperaran la humedad de equilibrio mientras que la restante se ensayó inmediatamente después de ser ensamblada con los pines aún secos. Los elementos aquí desarrollados pueden ser potencialmente usados para la construcción de entresijos, elementos de cubierta, mezanines y plataformas livianas, especialmente en sistemas constructivos donde se requieran elementos estructurales de bajo peso, fácil fabricación, montaje y compatibilidad con soluciones en bambú.

1.2. Formulación del problema

En la actualidad, la guadua se reconoce como un material con alto potencial para la construcción sostenible; sin embargo, su aplicación estructural aún enfrenta limitaciones técnicas asociadas a vacíos de conocimiento en el diseño y en el comportamiento de sistemas estructurales y de conexión, situación que ha sido identificada en la literatura (Aniñon et al., 2024). En particular, las conexiones entre elementos de guadua rolliza presentan desafíos derivados de la naturaleza anisotrópica del material, incrementando el riesgo de fallos estructurales cuando no se cuenta con criterios de diseño adecuados.

En este contexto, la caracterización de la guadua sometida a esfuerzos de flexión resulta especialmente relevante, dado que este tipo de sollicitación es común en elementos estructurales y su respuesta está influenciada tanto por las propiedades del material como por las condiciones de conexión. Si bien existen normativas como el Título G de la NSR-10 y la Norma Andina, estas presentan un alcance limitado y no abordan de manera suficiente aspectos críticos del comportamiento estructural en sistemas compuestos, lo que ha restringido su aplicación en estructuras de mayor complejidad. Como alternativa al uso tradicional de culmos de guadua, surge el sistema Pinboo, el cual emplea pines de bambú para ensamblar latas de guadua y conformar elementos estructurales, facilitando el manejo del material y el

proceso constructivo. Estos elementos poseen geometrías controladas que facilitan el diseño de conexiones normalizadas. Por otra parte, pueden construirse a partir de culmos defectuosos, lo que aumenta el aprovechamiento del material. Además, poseen una densidad aparente mayor que los culmos, lo que optimiza el espacio y reduce costos de almacenamiento y transporte (López & Correal, 2009). No obstante, a pesar de su potencial, en la literatura existente no se han reportado estudios que presenten una caracterización mecánica del sistema Pinboo, lo que evidencia un vacío de conocimiento que limita su implementación en el ámbito de la construcción.

Con el fin de responder a los problemas expuestos anteriormente, se propone la siguiente pregunta de investigación:

¿Cuál es el desempeño estructural de vigas de Pinboo con pines presecados bajo cargas de flexión?

1.3.Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Caracterizar el comportamiento estructural de vigas de Pinboo con pines presecados bajo cargas de flexión.

1.3.2. Objetivos específicos

- Caracterizar las propiedades mecánicas de latas y pines de guadua.
- Construir elementos de Pinboo bajo diferentes configuraciones dimensionales.
- Evaluar experimentalmente el comportamiento de las vigas bajo cargas de flexión.

II. MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes

La caracterización de la guadua presenta varios desafíos significativos debido a los diversos factores que influyen en sus propiedades mecánicas, tales como la especie, la edad y las condiciones de crecimiento. La variabilidad de estos aspectos dificulta la evaluación de las propiedades mecánicas y su uso en aplicaciones estructurales. Adicionalmente, la guadua presenta un comportamiento anisotrópico, con propiedades mecánicas que varían según la dirección radial, tangencial y longitudinal, como se muestra en la Ilustración 2, obteniéndose planos de carga longitudinal–tangencial y longitudinal–radial, lo que puede resultar en un comportamiento impredecible bajo cargas de servicio, limitando su implementación en proyectos de construcción (Singh et al., 2019).

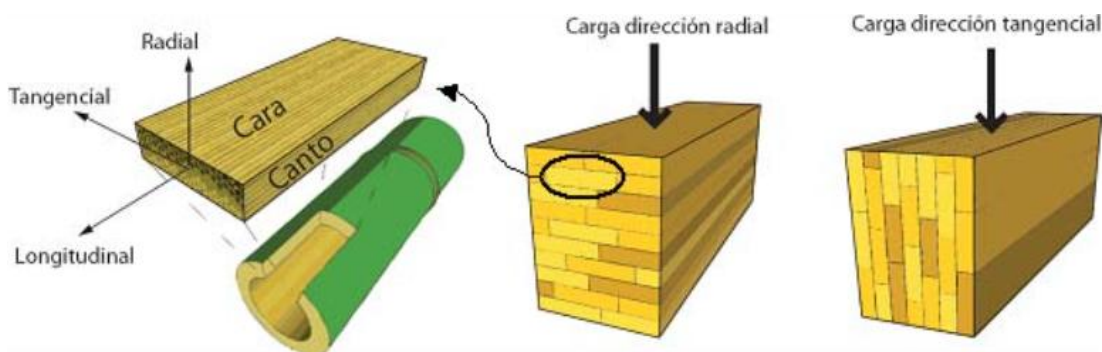


Ilustración 2 Esquema de direcciones radial y tangencial de la guadua.

Fuente: López y Correal (2009).

En este sentido, el uso de técnicas constructivas innovadoras como el pinboo, ha surgido como una solución potencial para mejorar la eficiencia de los sistemas compuestos de

guadua. Este enfoque puede ser particularmente beneficioso en la creación de estructuras sostenibles y eficientes, alineándose con las necesidades actuales del sector de la construcción.

Asimismo, se ha destacado la importancia de comprender los factores que afectan las propiedades mecánicas del bambú, mediante pruebas que evidencian su variabilidad. Estos estudios subrayan la necesidad de estandarizar su uso en la construcción, lo cual es fundamental para asegurar la calidad y la seguridad de las estructuras (Sánchez Vivas et al., 2019; Chen et al., 2020).

Por otro lado, existe una guía técnica que proporciona prácticas recomendadas para el uso de la guadua, abordando no solo los métodos de aplicación, sino también explorando diferentes tipos de conexiones y ofreciendo instrucciones sobre su correcta ejecución (Lucila Aguilar Arquitectos, 2019). La implementación de tales prácticas puede contribuir significativamente a optimizar las construcciones y fortalecer su confiabilidad estructural.

Finalmente, se ha realizado una revisión exhaustiva sobre los avances en las técnicas de conexión para estructuras de bambú, las cuales se fundamentan en la transmisión eficiente de cargas axiales para aprovechar la resistencia en la dirección de las fibras. Este estudio no solo respalda la adopción de técnicas de conexión adecuadas, sino que también resalta el potencial del bambú para abordar los desafíos en la construcción sostenible.(Aniñon & Estelito, 2024).

2.2.Estado del arte

Aún existen vacíos sobre el comportamiento de sistemas compuestos de guadua, lo que ha limitado su adopción en la construcción moderna (Sánchez Vivas et al., 2019). Estos vacíos son mayores en elementos estructurales como vigas.

Por lo tanto, la aparición de técnicas como el Pinboo ha representado un esfuerzo significativo por superar estas limitaciones. El Pinboo, que consiste en el uso de pines de guadua para conectar latas, busca ofrecer una alternativa que minimice el uso de componentes metálicos y conserve la naturaleza ecológica del material. Sin embargo, aunque el Pinboo ha demostrado cierta efectividad, la falta de estudios que analicen su comportamiento limitan su aplicabilidad (Fernández Sánchez, 2022). En la Ilustración 3 se presenta un ejemplo de tableros de Pinboo.



Ilustración 3 Tableros de Pinboo.

Fuente: Better Bamboo Buildings, s. f.

La investigación realizada por Aniñon y Estelito (2024) destaca que, a pesar de los avances en el desarrollo de técnicas de conexión, la estandarización sigue siendo un desafío. El Pinboo resuelve parcialmente algunos problemas de las conexiones metálicas, como la oxidación y la incompatibilidad de materiales, pero introduce otros inconvenientes, como la necesidad de una alta precisión en la fabricación.

Además, los estudios sobre las propiedades de la guadua, como los realizados por Sánchez Vivas et al. (2019) y Janssen (2000), indican que sus propiedades mecánicas varían según la especie, la edad y las condiciones de crecimiento, lo que afecta la efectividad de las técnicas de conexión. En este contexto, el sistema Pinboo busca adaptarse a dicha variabilidad. Una alternativa es el uso de laminados de bambú; sin embargo, su fabricación requiere equipos de alta presión y temperatura, lo que limita su aplicación en comunidades de bajos recursos.

Desde una perspectiva crítica, la ausencia de normas y guías técnicas adecuadas para la implementación de la guadua en la construcción revela un enfoque experimental. Aunque existen iniciativas para mejorar la caracterización del material y desarrollar nuevas técnicas de conexión, aún no se cuenta con estudios específicos que analicen el comportamiento a flexión de vigas compuestas de guadua, lo que representa un vacío que esta investigación busca cubrir.

2.3. *Guadua Angustifolia Kunth*

2.3.1. Características del material

La información presentada en este apartado se basa en lo expuesto por Vélez (2006). La *Guadua angustifolia Kunth* es una de las especies de bambú más representativas de América Latina y de mayor relevancia estructural en Colombia. Pertenece a la familia Poaceae y se caracteriza por su rápido crecimiento, alta resistencia mecánica y buena adaptabilidad a climas tropicales. Estas propiedades, junto con su bajo impacto ambiental, la convierten en un material atractivo para aplicaciones estructurales sostenibles.

Desde el punto de vista morfológico, la guadua presenta culmos cilíndricos, huecos y de crecimiento cónico, con alturas entre 18 y 30 m, diámetros entre 8 y 18 cm y espesores de pared promedio entre 1 y 2.5 cm. Su estructura fibrosa, reforzada por la presencia de nudos, le confiere una elevada capacidad para resistir esfuerzos de flexión y compresión, lo que resulta favorable en sistemas estructurales livianos y sismorresistentes.

2.3.2. Ciclo de vida de la Guadua

El ciclo biológico de la *Guadua angustifolia Kunth* comprende varias etapas que influyen directamente en sus propiedades mecánicas, según lo descrito por Vélez (2006). En las fases iniciales, correspondientes al renuevo y a la guadua joven o “viche”, el material presenta alto contenido de humedad y baja resistencia, por lo que no es apto para construcción.

La etapa óptima para su aprovechamiento estructural es la guadua madura o “hecha”, entre los 2 y 6 años, cuando el culmo alcanza su máxima rigidez y estabilidad dimensional. En la presente investigación se utilizó guadua correspondiente a esta fase, con edades entre 2

y 5 años, la cual fue sometida a un proceso de inmunización posterior al corte para garantizar su durabilidad.

En las etapas posteriores, guadua sobremadura y guadua seca, se presenta una pérdida progresiva de humedad y resistencia mecánica, lo que limita su uso estructural.

2.3.3. Partes del culmo

De acuerdo con el *Estudio Arquitectónico Malaka* (2020), el culmo de la guadua se divide en diferentes segmentos según su posición longitudinal y sus variaciones geométricas. Estos segmentos comprenden la cepa, la basa, la sobrebasa, el varillón y la copa, los cuales presentan diferencias en diámetro, espesor y longitud, tal como se muestra en la Ilustración 4.

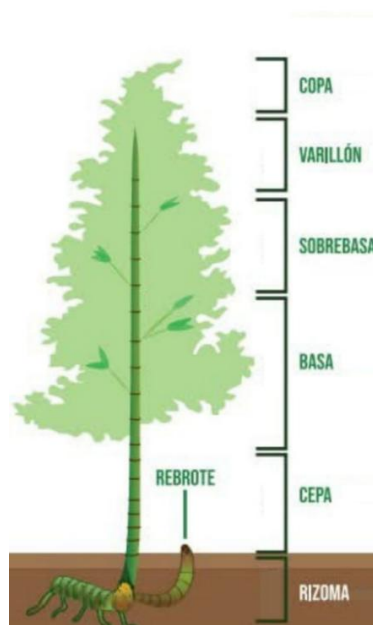


Ilustración 4 Conformación de un culmo de guadua.

Fuente: Estudio Arquitectónico Malaka. (2020).

III. CARACTERIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LATAS Y PINES DE GUADUA

En esta etapa se analizó el comportamiento de especímenes de pines y latas de *Guadua angustifolia Kunth*, sometidos a ensayos de flexión y cortante doble perpendicular a las fibras.

3.1. Caracterización mecánica de latas de Guadua

3.1.1. Fabricación de latas

Latas se elaboraron con los siguientes pasos, tal como se presenta en la Ilustración 5. Las latas de los miembros estructurales tuvieron un ancho de 40mm siguiendo los pasos 1-3. El paso cuatro consistió en reducir el ancho a 12mm para especímenes que fueron utilizados para caracterizar el material.

- **Paso 1:** los culmos de guadua fueron cortados longitudinalmente para obtener latas con anchos aproximados entre 6 y 7 cm, utilizando la herramienta conocida como “estrella china”. El espesor inicial de las latas correspondió al espesor natural del culmo, el cual fue aproximadamente de 15 mm.
- **Paso 2:** las latas obtenidas se limpiaron y ajustaron con una sierra de mesa, eliminando los entrenudos de la cara interna para conseguir una superficie lisa y continua, adecuada para el posterior cepillado.
- **Paso 3:** se realizó el cepillado de ambas caras de cada lata del Paso 1, reduciendo el espesor de manera progresiva hasta alcanzar un valor aproximado de 10 mm.
- **Paso 4:** a partir de las latas ya acondicionadas obtenidas en el Paso 3, se obtuvieron latas de aproximadamente 12 mm de ancho, mediante cortes manuales con machete.

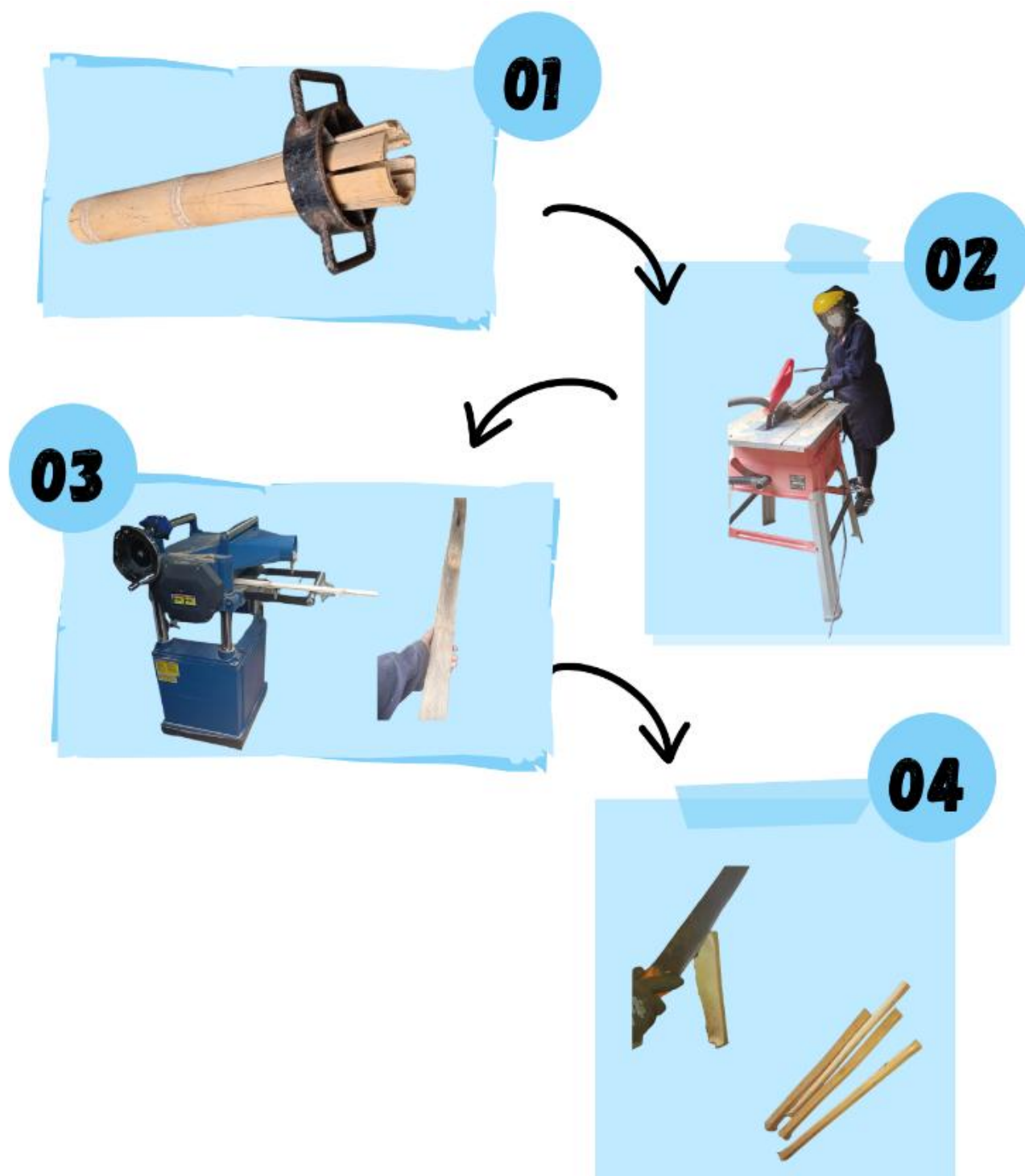


Ilustración 5 Fabricación de latas de caracterización.

3.1.2. Ensayo a flexión pura en latas

Con el objetivo de evaluar la rigidez y resistencia de las latas bajo flexión pura se ensayaron 30 probetas de *Guadua angustifolia Kunth*, con dimensiones nominales de 260 mm de longitud y secciones rectangulares de 10×12 mm. Los ensayos se realizaron con la carga aplicada en el plano radial-longitudinal de la guadua (Ilustración 2), es decir, con la carga aplicada en la dirección circunferencial perpendicular a las fibras.

Estos ensayos complementan los realizados por Jhonatan Harvey Duque Quintero (2025) en su proyecto de grado, “*Diseño de viguetas de latas de bambú atornilladas para soporte de entrepisos y cubiertas*”, quien ensayó 35 probetas en dirección circunferencial y 5 en dirección radial, usando el mismo montaje. De esta manera, el conjunto de datos analizado incluyó un total de 70 probetas.

En la Ilustración 6 se muestran la orientación y las dimensiones de las probetas empleadas.

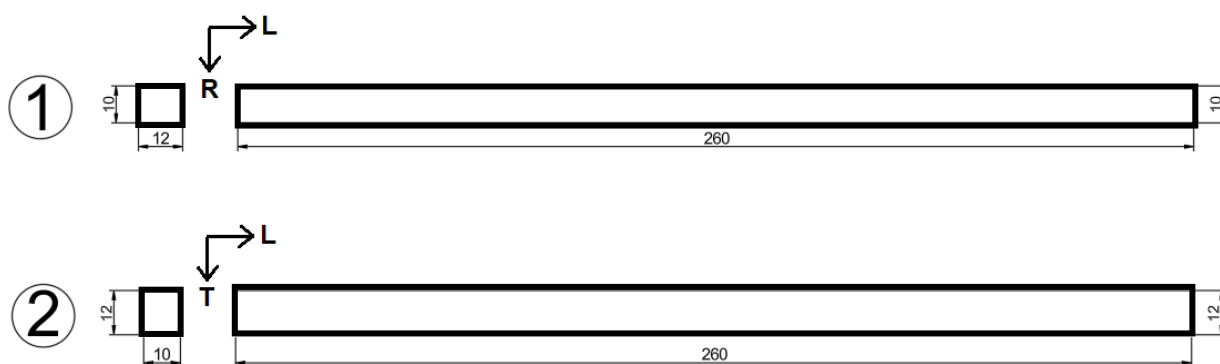


Ilustración 6 Dimensiones de las probetas. (1) Sentido radial, (2) Sentido tangencial (mm).

Las latas tuvieron una humedad promedio de 11.15 % ($CV = 4.3 \%$), obtenida con un hidrómetro compacto Extech MO50, bajo una humedad relativa ambiental cercana al 65 %. En los cálculos se utilizaron las dimensiones reales de cada espécimen, medidas con un calibrador.

Las pruebas se llevaron a cabo en una máquina universal de ensayos, mediante un montaje de flexión a cuatro puntos. Se aplicó una velocidad de carga de 4 mm/min, establecida a partir de ensayos preliminares y conforme a la norma ASTM D198-15 [28]. Se utilizó una celda de carga *OP-312-10* de 13.3 kN. El montaje experimental se muestra en las Ilustraciones 7 y 8.

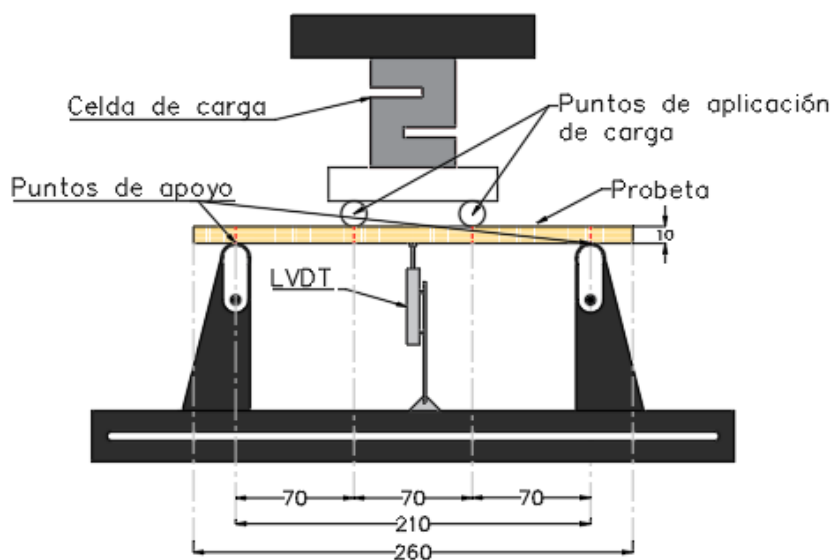


Ilustración 7 Montaje experimental (mm).



Ilustración 8 Montaje experimental de latas.

La falla típica de las latas se caracterizó por una curvatura pronunciada del elemento, evidenciando grandes deformaciones sin presentarse fractura súbita. (Ilustración 9)



Ilustración 9 Falla típica en latas.

Con esta configuración se determinó el módulo de elasticidad (MOE) y el módulo de rotura (MOR), calculados a partir de las ecuaciones establecidas en la norma ASTM D198-15 [28], las cuales se presentan a continuación:

$$MOR = \frac{P_{max}l}{bd^2} \quad (1)$$

$$MOE = \frac{23 (P_{40\%} - P_{10\%})l^3}{108bd^3(\Delta_{40\%} - \Delta_{10\%})} \quad (2)$$

donde:

- $P\%$ = porcentaje de la carga máxima.
- $\Delta\%$ = deflexión central correspondiente al porcentaje de la carga máxima.
- $P_{m\acute{a}x}$ = carga máxima.
- l = luz entre apoyos (210 mm).
- b = ancho de la probeta (10 o 12 mm, según orientación).
- d = altura de la probeta (10 o 12 mm, según orientación).

Las curvas carga vs desplazamiento (Ilustración 10) presentan inicialmente una zona aproximadamente lineal, asociada al comportamiento elástico de las probetas. Posteriormente, se evidencia una pérdida progresiva de rigidez, hasta alcanzar una carga máxima. A partir de este punto, la respuesta varía entre probetas, presentándose una estabilización de la carga o una caída abrupta, asociada al inicio del proceso de falla.

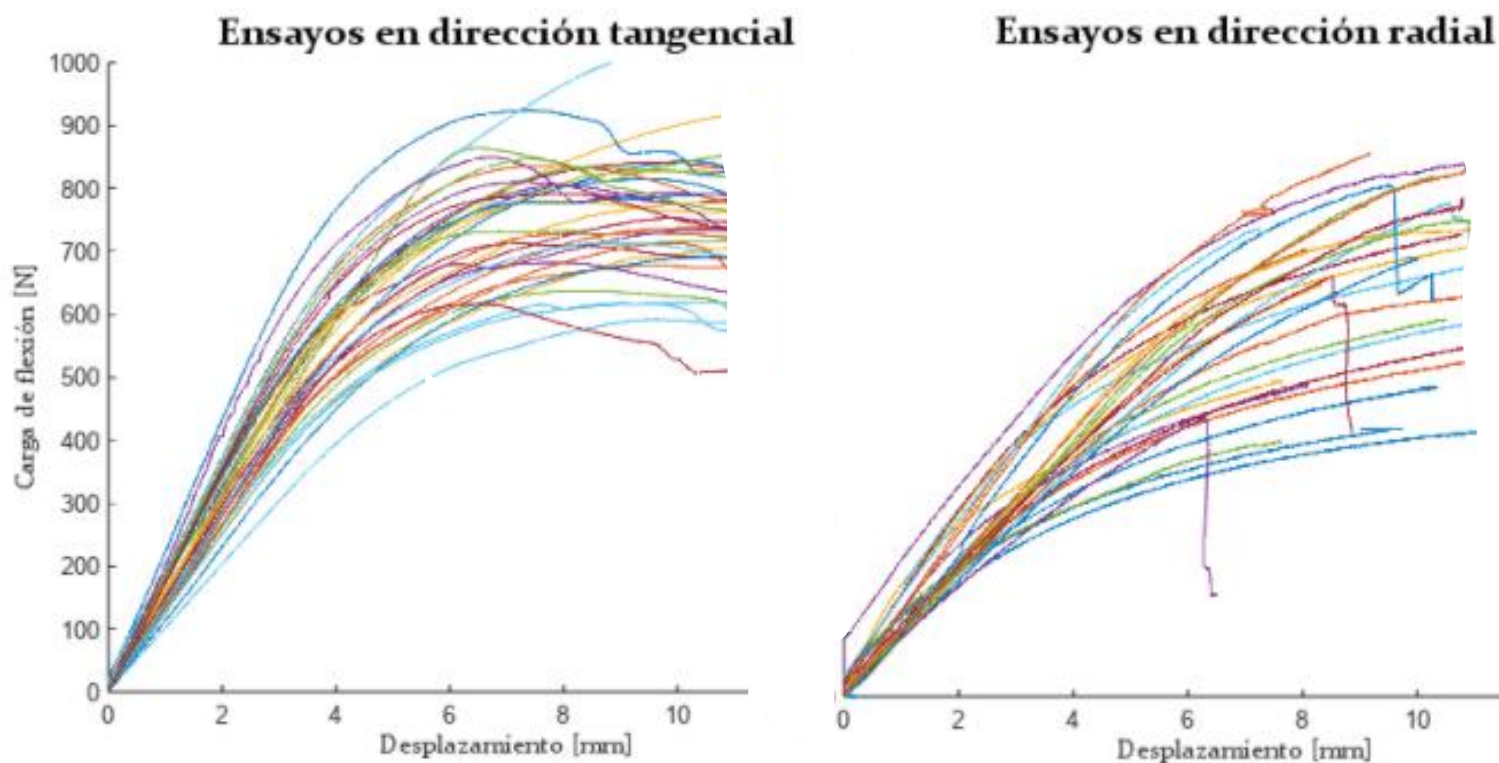


Ilustración 10 Curva de carga vs Desplazamiento.

Fuente: Imagen izquierda: Jonathan Duque, 2025. Imagen derecha: (elaboración propia).

El análisis estadístico mostró que el MOE sigue una distribución normal, verificada mediante las pruebas de Shapiro-Wilk [31] y Anderson-Darling [32], mientras que el MOR se ajusta a una distribución Gamma según la prueba de Kolmogorov-Smirnov [33], como se aprecia en las Ilustraciones 11 y 12.

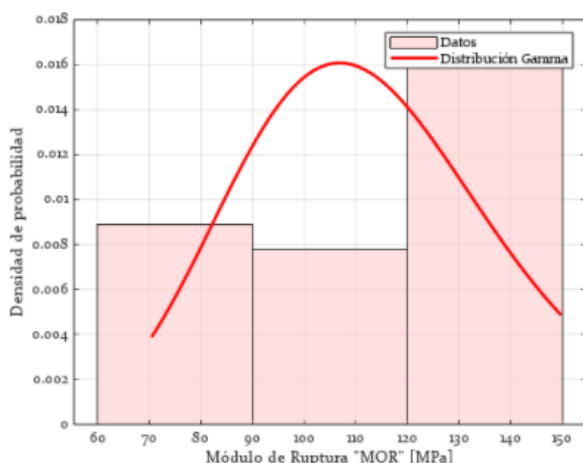


Ilustración 11 Distribución gamma MOR.

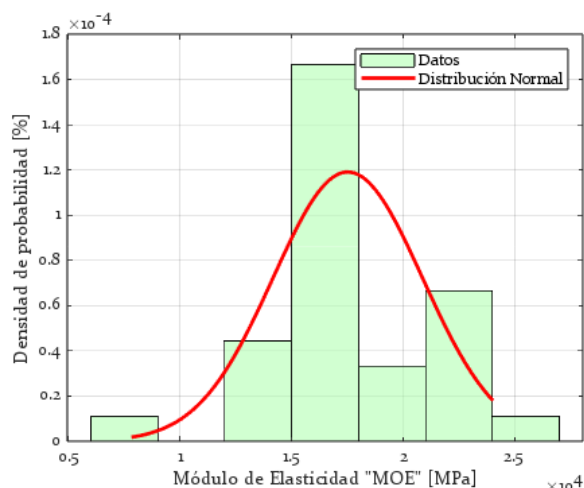


Ilustración 12 Distribución normal MOE.

En la Tabla 1 se presentan los resultados de los ensayos de flexión a cuatro puntos realizados en latas de guadua, correspondientes a un total de 70 especímenes.

Tabla 1 Resultados ensayos de flexión en latas a 4 puntos, 70 especímenes.

	Tangencial (35 especímenes)	Radial (35 especímenes)
MOR	98.4 MPa ($CV=12.1\%$)	112.6 MPa ($CV = 15.52\%$)
MOE	16.1 GPa ($CV=11.9\%$)	14.7 GPa ($CV= 19.12\%$)

El material presentó mayor módulo de elasticidad en la dirección tangencial y mayor resistencia a la flexión en la radial. La menor variación del MOE en la dirección tangencial indica un comportamiento más uniforme, mientras que la mayor dispersión del MOR radial sugiere una respuesta menos consistente entre probetas. El análisis de varianza (ANOVA) mostró que las diferencias en el MOR son estadísticamente significativas ($p = 3.52 \times 10^{-6}$), mientras que para el MOE no se evidenciaron diferencias estadísticamente significativas entre orientaciones ($p = 0.142$).

3.2. Caracterización mecánica de pines de Guadua

3.2.1. Fabricación de pines

Para la fabricación de los pines se realizaron los pasos del 1 al 4 descritos en la sección 3.1.1 para la extracción de latas. Estos fueron complementados con los siguientes pasos 5 y 6, tal como se presenta en la Ilustración 13.

- **Paso 5:** las latas de menor tamaño fueron lijadas en un esmeril, eliminando progresivamente las aristas o bordes de la sección rectangular.
- **Paso 6:** Las latas lijadas se ubicaron en el mandril de un taladro y se hicieron girar a través de una cuchilla circular para obtener pines cilíndricos de guadua.



Ilustración 13 Fabricación de pines de guadua.

3.2.2. Ensayo a flexión pura en pines

La caracterización mecánica de la guadua se complementó mediante ensayos de flexión pura de 35 pines, elaborados en la presente investigación. Las pruebas se realizaron con la carga aplicada en el plano tangencial-longitudinal de la guadua (Ilustración 2). La orientación de este plano se aseguró mediante el posicionamiento previo de cada probeta y el descenso controlado del cabezal de la máquina hasta el ajuste adecuado del pin, garantizando la correcta aplicación de la carga y evitando desplazamientos o rotaciones durante el ensayo.

Las muestras tuvieron dimensiones nominales de 260 mm de longitud y secciones circulares de 9.5 mm de diámetro ($CV = 1.8\%$). Los pines, con humedad promedio de 12.57 % ($CV = 4.8\%$), se ensayaron usando el mismo montaje de flexión descrito previamente para latas (Ilustración 14).



Ilustración 14 Montaje experimental de pines.

La falla típica de los pines fue similar al de las latas presentadas en la sección 3.1.2, con un ligero aplastamiento en la parte de los apoyos (Ilustración 15)



Ilustración 15 Falla típica en pines.

Se calculó el módulo de ruptura (MOR) y el módulo de elasticidad (MOE) con las ecuaciones (1) y (2), respectivamente. La respuesta carga–desplazamiento presentó el mismo comportamiento descrito en la Sección 3.1.2, el cual se ilustra en la Ilustración 16, caracterizado por una zona inicial lineal elástica, seguida de una pérdida progresiva de rigidez hasta alcanzar una carga máxima y, posteriormente, una estabilización o caída abrupta asociada a la falla del espécimen.

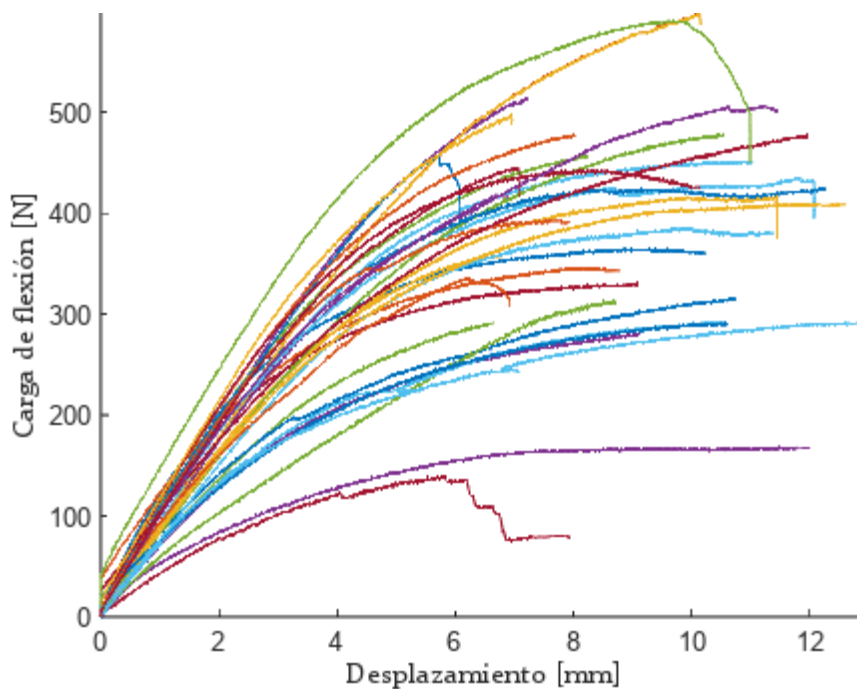


Ilustración 16 Curva de carga vs Desplazamiento.

Al igual que en las pruebas realizadas con las latas, el análisis estadístico de los pines mostró que el MOE sigue una distribución normal verificada mediante las pruebas de Shapiro-Wilk [31] y Anderson-Darling [32], mientras que el MOR se ajusta a una distribución Gamma según la prueba de Kolmogorov-Smirnov [33], como se aprecia en las Ilustraciones 17 y 18.

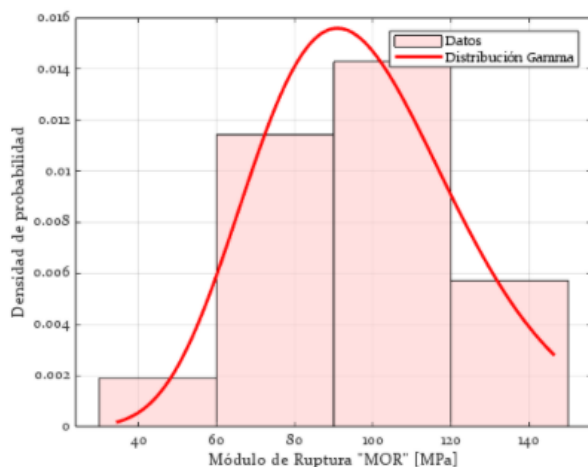


Ilustración 17 Distribución gamma MOR.

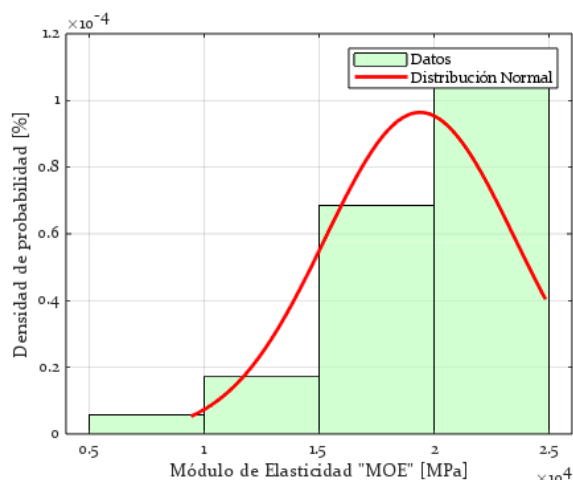


Ilustración 18 Distribución gamma MOE.

El MOR y el MOE (Tabla 2) fueron similares a los obtenidos en las pruebas de flexión de las latas bajo carga circunferencial.

Tabla 2 Resultados ensayos de flexión en pines a 4 puntos, 35 especímenes.

MOR	98.02 MPa ($CV=13.9\%$)
MOE	17.3 GPa ($CV=11.3\%$)

3.2.3. Ensayo a cortante doble en pines

Una caracterización complementaria de los pines se llevó a cabo mediante ensayos de cortante doble perpendicular a las fibras, siguiendo un procedimiento análogo al empleado en pruebas de varillas metálicas. Se ensayaron un total de 35 probetas, elaboradas y preparadas durante el desarrollo de la presente investigación con dimensiones nominales de 260 mm de longitud y secciones circulares de 9.5 mm de diámetro. Se registraron la carga y desplazamiento máximos. Los pines tuvieron una humedad promedio de 11.43 % ($CV = 5.3\%$), medidos en humedad relativa ambiental cercana al 66 %.

Al igual que en la prueba de las latas, se aplicó una velocidad de carga de 4 mm/min. Se utilizó la misma celda de carga OP-312-10 13.3 kN. El montaje experimental se muestra en las Ilustraciones 19 y 20.

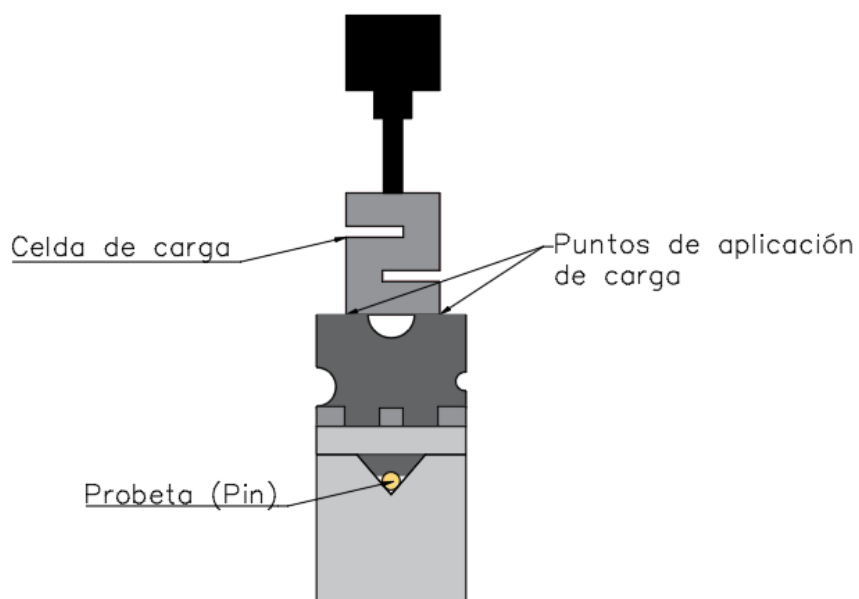


Ilustración 19 Montaje experimental.



Ilustración 20 Montaje experimental de cortante en pines.

La falla típica esta caracterizado por la fractura abrupta del elemento, acompañado de aplastamiento local del material en la zona de aplicación de carga. (Ilustración 21)



Ilustración 21 Falla típica de cortante.

Con los resultados obtenidos, se calculó el esfuerzo cortante con la ecuación (3).

$$\tau = \frac{P}{2A} \quad (3)$$

Además, con el E medido en las pruebas de flexión y adoptando un valor del coeficiente de Poisson (ν) de 0.3 (Saraz et al, 2007) se calculó el módulo de corte con la ecuación (4).

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (4)$$

Se obtuvo una resistencia al cortante de 53.2 MPa ($CV=9.8\%$) y un módulo de corte de 6.7 GPa ($CV=11.3\%$).

La curva carga–desplazamiento (Ilustración 22), presenta un incremento progresivo de la carga hasta alcanzar un valor máximo, seguido de una caída abrupta, indicando la falla del espécimen.

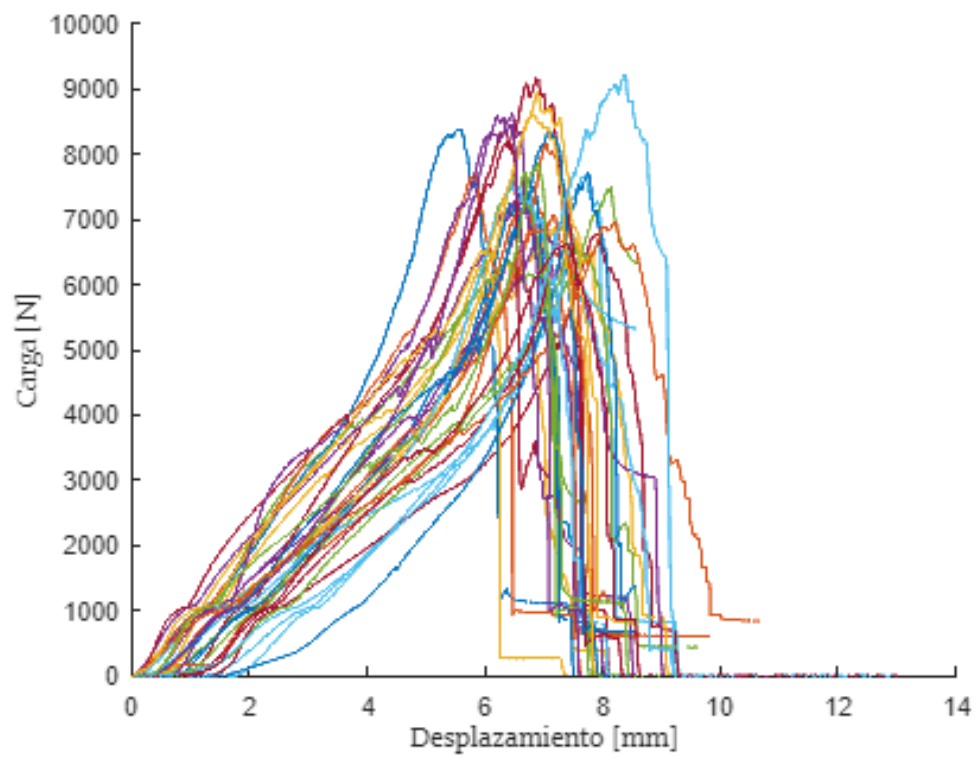


Ilustración 22 Curva de carga vs Desplazamiento.

IV. CONSTRUCCIÓN DE VIGAS DE PINBOO

4.1.Evaluación del espaciamiento óptimo entre pines

4.1.1. Fabricación de prototipos

Para la fabricación de los prototipos se aplicaron los pasos 1 a 3 descritos en la Sección 3.1.1, correspondientes a la extracción de latas, a partir de los cuales se incorporaron las siguientes etapas adicionales (Ilustración 23):

- **Paso 4:** se marcaron las posiciones de los agujeros en las latas procesadas.
- **Paso 5:** las latas fueron agrupadas, prensadas y taladradas juntas. Luego, los pines fueron insertados mediante impactos controlados con un martillo.

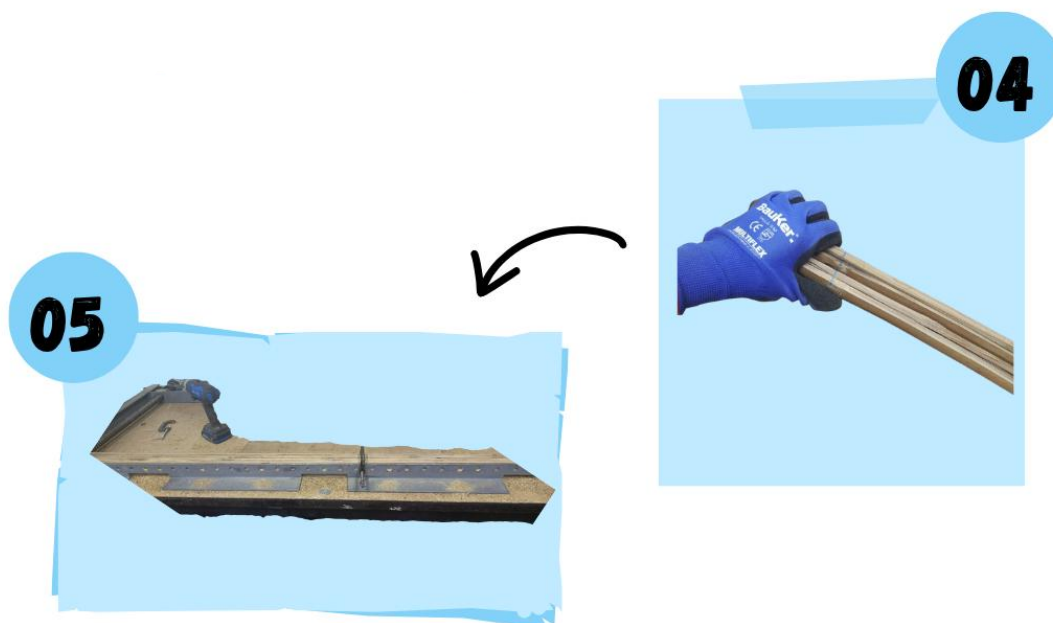


Ilustración 23 Fabricación de prototipos.

4.1.2. Ensayo a flexión pura en probetas de Pinboo de 70 cm

Para establecer el espaciamiento más adecuado, se realizaron ensayos pilotos con probetas conformadas por cuatro latas de 10 mm de espesor y 40 mm de ancho. Se probaron tres separaciones entre pines: 100 mm, 150 mm y 200 mm. En cada caso se realizaron cuatro ensayos.

Los tres primeros ensayos emplearon latas cepilladas, correspondientes a las probetas VSL10, VSL15 y VSL20 (donde “VSL” indica viga cepillada y el número corresponde a la separación en cm), mientras que el cuarto se efectuó con latas sin cepillar, correspondientes a las probetas VSSL10, VSSL15 y VSSL20 (donde “VSSL” indica viga sin cepillar), con el fin de evaluar la influencia del acabado superficial en el comportamiento del conjunto. En la Ilustración 24 se presentan las dimensiones de las probetas empleadas y su respectiva separación. Los detalles de la preparación de estas probetas se muestran en el Anexo A.2.

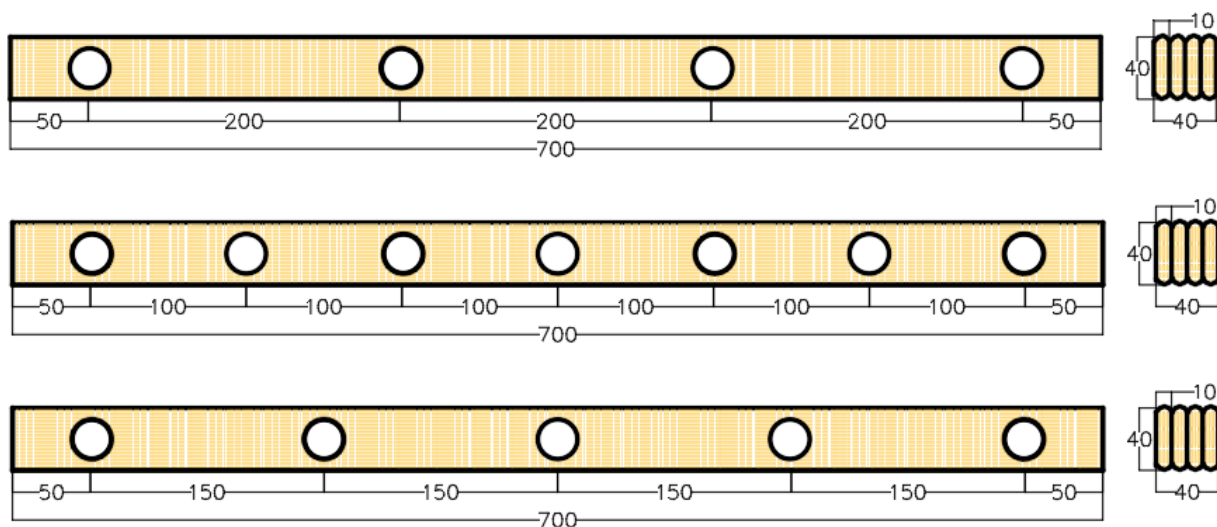


Ilustración 24 Probetas con distintas separaciones (mm).

Las pruebas se llevaron a cabo en una máquina universal de ensayos² mediante un montaje de carga en cuatro puntos, aplicando una velocidad de carga de 4 mm/min, definida a partir de ensayos preliminares y conforme a la norma ASTM D198-15 [28]. La carga aplicada se midió mediante una celda de carga OP-312-10¹ de 13.3 kN, y se aplicó en dos puntos³ separados 200 mm, mientras que las probetas se apoyaron sobre apoyos inferiores⁴. Adicionalmente, se indica el sentido de aplicación de la carga durante el ensayo⁵. El montaje experimental se muestra en la Ilustración 25, y los componentes del montaje experimental se presentan en el Anexo A.1.



Ilustración 25 Montaje experimental.

A continuación, en las Ilustraciones 26, se presentan las curvas de carga vs. desplazamiento obtenidas para cada configuración de espaciamiento.

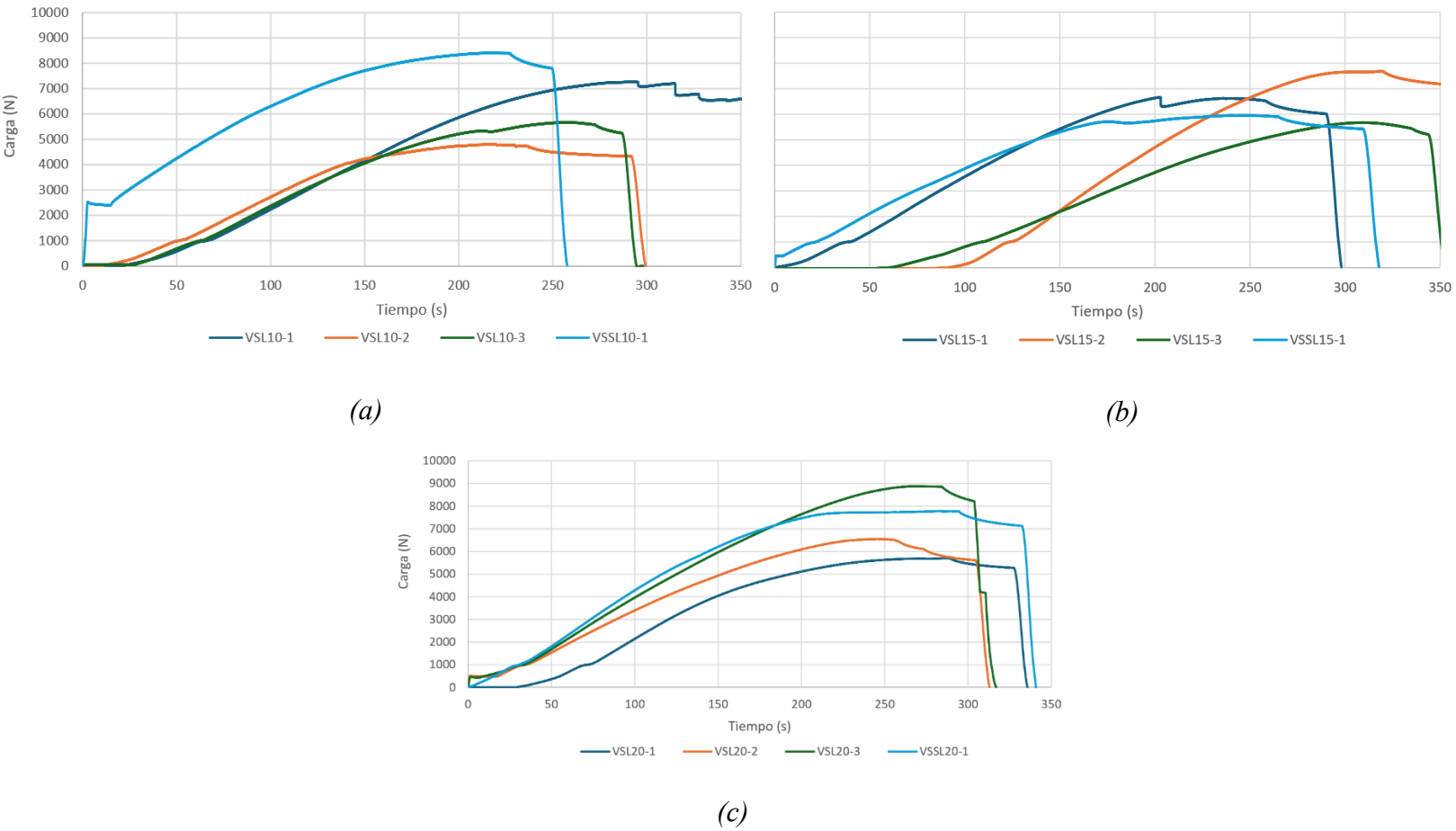


Ilustración 26 Curvas de carga vs desplazamiento.

(a) Probeta con separación de 100 mm, (b) Probeta con separación de 150 mm y (c) Probeta con separación de 200 mm.

Los cálculos de los esfuerzos máximos a flexión de los prototipos se realizaron considerando la teoría clásica de la resistencia de materiales. En la Tabla 3 se presentan los valores obtenidos para cada probeta, calculados mediante la Ecuación (5) (Gere y Timoshenko, 1997):

$$\sigma = \frac{M \cdot c}{I} \quad (5)$$

donde:

- M = momento flector.
- c = distancia al eje neutro.
- I = momento de inercia de la sección.

Tabla 3 Resultados de carga máxima para cada espaciamiento entre pines.

Espaciamiento [mm]	Carga máxima [N]	σ [MPa]
VSL10 (3 especímenes)	5913.5 ($CV=15.9\%$)	55.4
VSL15 (3 especímenes)	6674.4 ($CV=14.8\%$)	62.6
VSL20 (3 especímenes)	7458.4 ($CV=12.5\%$)	69.9
VSSL10 (1 espécimen)	5512.3	51.7
VSSL15 (1 espécimen)	5955.9	55.8
VSSL20 (1 espécimen)	6552.5	61.4

Se realizó un análisis de varianza (ANOVA) de un factor para evaluar el efecto del espaciamiento en la respuesta estructural de las probetas, utilizando un nivel de significancia de 0.05.

Los resultados mostraron que los niveles de espaciamiento tienen un efecto estadísticamente significativo sobre la carga máxima ($p = 7.65 \times 10^{-7}$). Entre las configuraciones evaluadas, el espaciamiento de 200 mm presentó la mayor carga máxima, por lo que fue seleccionado para la fabricación de las probetas a escala real.

4.1.3. Discusión de resultados

Aunque de manera intuitiva podría esperarse que un menor espaciamiento entre pines mejore el comportamiento estructural, los resultados experimentales mostraron una tendencia contraria. En los ensayos se observó que, para el espaciamiento de 100 mm, se produjo ruptura de fibras, generando fallas prematuras y fisuras longitudinales en las latas, cerca de los puntos de aplicación de carga (Ilustración 27). Con el espaciamiento de 150 mm, se registraron fisuras longitudinales, aunque menores que en el caso anterior, y más orientadas hacia el eje neutro

(Ilustración 28). Por el contrario, las probetas con espaciamiento de 200 mm no presentaron fisuración visible. (Ilustración 29).

Esto se explica porque los agujeros generan concentraciones de esfuerzo, y al quedar relativamente cerca entre ellos pueden alterar la capacidad global de las vigas. Además, cuando el punto de aplicación de carga queda ubicado cerca de los concentradores de esfuerzos, se pueden aumentar localmente los esfuerzos y se generan fallas prematuras.

El ANOVA respalda que las diferencias entre los espaciamientos no son producto del azar y confirma que la mayor separación soporta mayor carga.



Ilustración 27 Fallas típicas para probetas con espaciamiento de 100mm.



Ilustración 28 Fallas típicas para probetas con espaciado de 150mm.



Ilustración 29 Fallas típicas para probetas con espaciado de 200mm.

4.2. Prototipos finales

4.2.1. Fabricación de prototipos

La elaboración de los prototipos de guadua se realizó siguiendo el mismo procedimiento descrito en la sección 4.1, con la salvedad de que los pines fueran secados antes de su instalación para evaluar su efecto sobre la facilidad de construcción y el comportamiento mecánico de las vigas.

4.2.2. Presecado de pines

Se realizaron pruebas de presecado para los pines siguiendo los lineamientos establecidos en la norma NTC 5525, con el fin de determinar su contenido de humedad. Para ello, se registró la masa de las probetas antes y después de 24 horas de secado en horno, considerando el proceso finalizado cuando la diferencia entre mediciones sucesivas no excedió 0.01 g.

El objetivo del presecado fue facilitar el proceso de ensamblaje, ya que la reducción temporal de su diámetro facilita su inserción. Adicionalmente, al recuperar su humedad natural, los pines generan una presión de contacto con el agujero, lo que sugiere que el presecado del pin tiene también un efecto mecánico positivo.

El contenido de humedad (CH) se calculó como el porcentaje de pérdida de masa respecto a la masa seca, conforme a la ecuación (6).

$$CH = \frac{m - m_o}{m_o} \times 100 \quad (6)$$

donde:

- m = masa de la probeta antes del secado.
- m_o = masa de la probeta después del secado.

El contenido de humedad fue del 12.3% ($CV = 3.8\%$). El diámetro inicial fue de 9.5 mm ($CV = 1.7\%$). Tras el proceso de secado, el diámetro se redujo aproximadamente a 8.5 mm ($CV = 2.4\%$), evidenciando la contracción dimensional asociada a la pérdida de humedad.

V. RESULTADOS Y ANÁLISIS

En esta fase se presentan los resultados de los ensayos de las probetas finales con una separación entre pines de 200 mm y una longitud de 1600 mm.

5.1. Ensayo a flexión pura en prototipos finales

Al igual que en las vigas de los experimentos previos, las vigas tuvieron una altura de 40mm (equivalente al ancho de las latas) y un ancho o base variable según el número de latas usadas.

Se evaluaron cuatro configuraciones experimentales, combinando el número de latas (4 y 8) y el diámetro de los pines (9.5 mm y 12.7 mm) (Ilustración 30). En cada caso se elaboraron cinco probetas. La identificación VPP corresponde a vigas con pines pequeños (9.5 mm) y VPG a vigas con pines grandes (12.7 mm). Cuatro de ellas se probaron después de que los pines presecados alcanzaran la humedad de equilibrio, para lo cual se esperó un tiempo de 4 días. La quinta probeta se probó inmediatamente después de que los pines presecados fueron ensamblados.

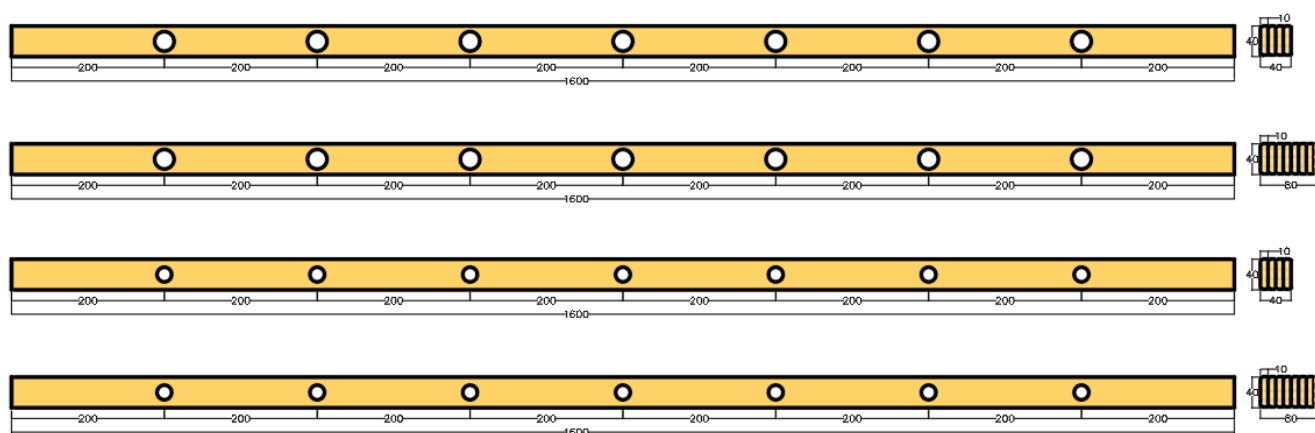


Ilustración 30 Probetas finales (mm).

La carga se aplicó con un actuador hidráulico¹ a 0.33 mm/s, alcanzando la falla en aproximadamente 4 min, en concordancia con la ASTM D198-2015 [33]. La carga se midió con una celda OP-312-10², previamente utilizada en la caracterización del bambú. La deflexión central se registró con un LVDT³ y un sensor de desplazamiento por hilo⁴. La carga se aplicó en dos puntos separados 500 mm mediante un elemento específico⁵, con apoyos inferiores⁶ soldados a un perfil metálico. Además, se instalaron ocho restricciones laterales⁷ en los tercios extremos de las probetas para reducir el pandeo lateral. El sentido de aplicación de la carga en las probetas⁹, se muestra en la Ilustración 31.

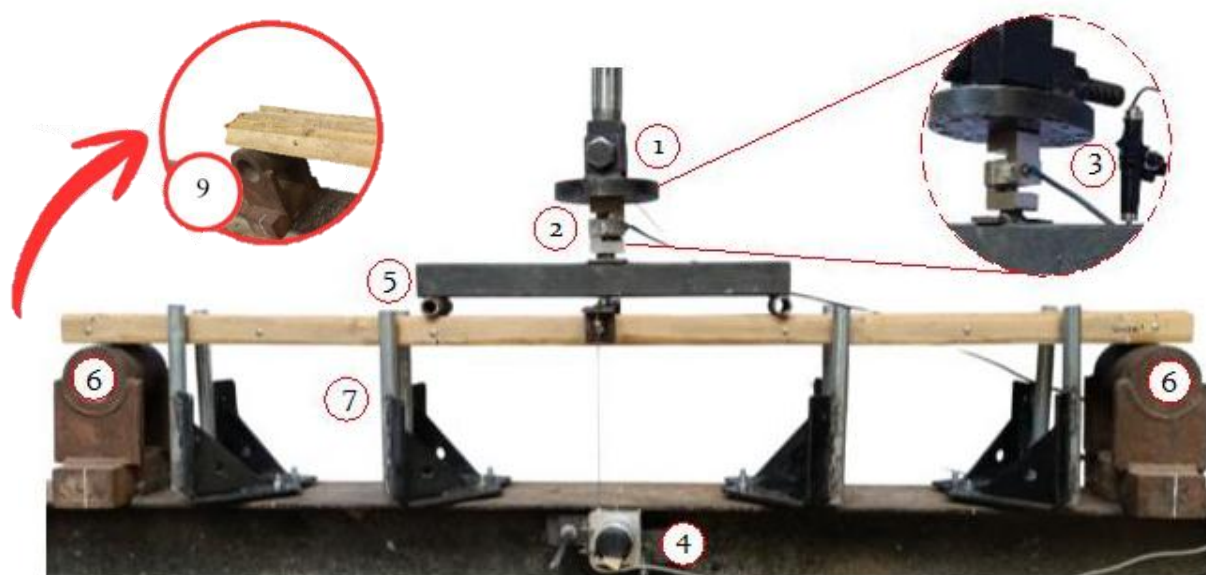


Ilustración 31 Montaje experimental.

5.2.Determinación del momento de inercia teórico y efectivo

El momento de inercia efectivo (I_{ef}) se determinó a partir de la porción inicial de las curvas carga-deflexión, considerando el 40 % de la carga máxima, y se comparó con el valor

teórico (I_{teo}) obtenido a partir del modelo geométrico de la sección, mediante las siguientes ecuaciones (7) y (8):

$$I_{ef} = \frac{P \cdot L_a}{48 \cdot E \cdot \delta_{m\acute{a}x}} (3L^2 - 4L_a^2) \quad (7)$$

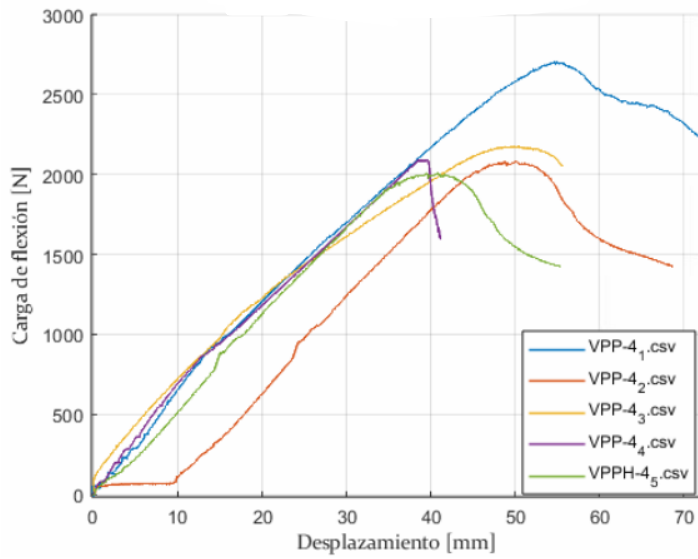
$$I_{teo} = \frac{bh^3}{12} \quad (8)$$

donde:

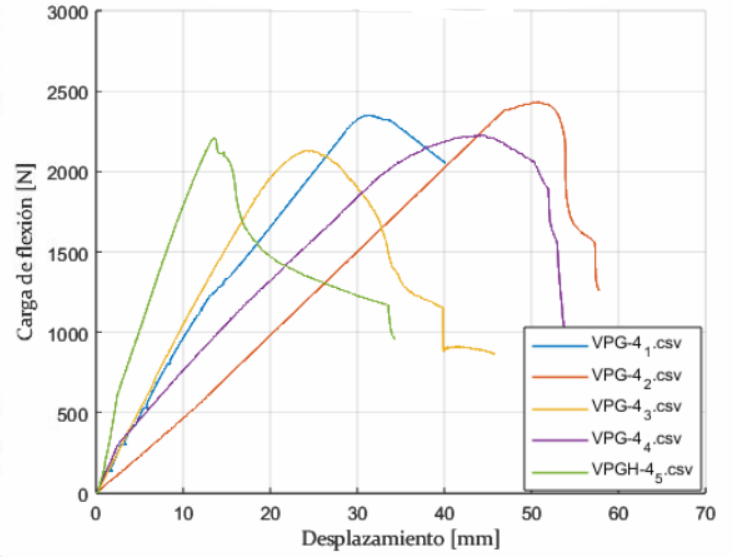
- P = carga en el rango elástico.
- L_a = distancia desde el apoyo hasta el punto de aplicación de la carga.
- L = longitud total entre apoyos.
- E = módulo de elasticidad de la guadua (16050 MPa)
- $\delta_{m\acute{a}x}$ = deflexión máxima correspondiente a la carga.

5.3. Análisis de resultados de los ensayos

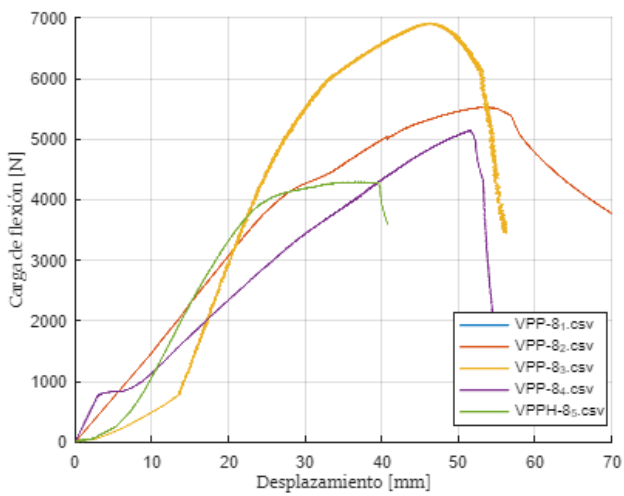
Las curvas de carga vs desplazamiento (Ilustración 32) presentan inicialmente una zona aproximadamente lineal, asociada al comportamiento elástico de las probetas. Luego, se evidencia una pérdida progresiva de rigidez, hasta alcanzar una carga máxima. A partir de este punto, la probeta presenta una caída abrupta, asociada al inicio del proceso de falla.



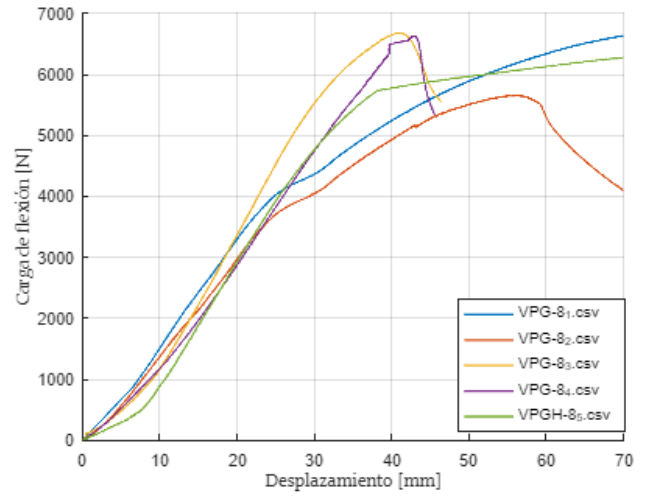
(a)



(b)



(c)



(d)

Ilustración 32 Curvas de carga vs desplazamiento.

(a) Probeta de 4 latas con pines de 9.5 mm, (b) Probeta de 4 latas con pines de 12.7 mm, (c) Probeta de 8 latas con pines de 9.5 mm y (d) Probeta de 8 latas con pines de 12.7 mm

En la Tabla 4 se presentan los resultados de los ensayos a flexión de los prototipos, correspondientes a un total de 20 especímenes.

En términos generales, los resultados muestran que el desempeño estructural de las vigas depende del número de latas y del tipo de pin. En conjunto, las vigas con ocho latas y pines PG (12.7 mm) presentaron menores coeficientes de variación que aquellas con pines PP (9.5 mm).

Tabla 4 Resultados experimentales de probetas finales.

Grupo	Probeta	$P_{m\acute{a}x}$ [N]	$P_{m\acute{a}x}$ [N] Promedio	$\delta_{m\acute{a}x}$ [mm]	σ [MPa]	σ [MPa] Promedio	I_{ef} [$\times 10^5 \text{ mm}^4$]	I_{teo} [$\times 10^5 \text{ mm}^4$]	I_{ef}/I_{teo}
VPP-4	VPP-4_1	2699.3	2212 ($CV=12.29\%$)	54.7	63.3	51.9 ($CV=12.6\%$)	1.93	2.13	0.91
	VPP-4_2	2083.2		50.1	48.8		1.82	2.13	0.85
	VPP-4_3	2174.8		50.2	51.0		1.85	2.13	0.87
	VPP-4_4	2094.9		39.6	49.1		1.78	2.13	0.84
	VPPH-4_5	2009.2		40.7	47.1		1.73	2.13	0.81
VPG-4	VPG-4_1	2349.5	2269 ($CV=5.29\%$)	31.2	55.1	53.2 ($CV=5.3\%$)	2.10	2.13	0.99
	VPG-4_2	2431.5		50.7	57.0		1.91	2.13	0.90
	VPG-4_3	2128.9		23.9	49.9		2.09	2.13	0.98
	VPG-4_4	2226.8		44.4	52.2		1.87	2.13	0.88
	VPGH-4_5	2210.4		31.6	51.8		2.11	2.13	0.99
VPP-8	VPP-8_1	4290.5	5209 ($CV=14.65\%$)	46.5	50.3	61.3 ($CV=10.6\%$)	3.97	4.27	0.93
	VPP-8_2	5524.1		53.7	64.7		4.13	4.27	0.97
	VPP-8_3	6906.3		45.9	80.9		4.08	4.27	0.96
	VPP-8_4	5144.5		51.6	60.3		3.97	4.27	0.93
	VPPH-8_5	4182.5		45.5	48.2		4.01	4.27	0.94
VPG-8	VPG-8_1	6690.0	6400 N ($CV=6.88\%$)	70.5	78.4	75.0 ($CV=6.9\%$)	4.14	4.27	0.97
	VPG-8_2	5651.4		56.0	66.2		3.97	4.27	0.93
	VPG-8_3	6679.0		41.1	78.3		4.23	4.27	0.99
	VPG-8_4	6625.1		42.8	77.6		3.97	4.27	0.93
	VPGH-8_5	6354.9		70.6	74.5		3.94	4.27	0.92

Los resultados evidencian que desempeño estructural depende según el tipo de configuración y el número de elementos. En las vigas de cuatro latas, ambas configuraciones

mostraron comportamientos similares en términos de capacidad resistente; sin embargo, las VPG-4 presentaron una menor dispersión de resultados y un momento de inercia efectivo más cercano al teórico, lo que indica una mejor colaboración entre las latas y los conectores.

En el caso de las vigas de ocho latas, se observó valores de inercia efectiva cercanos al teórico, lo que confirma una adecuada eficiencia estructural del sistema compuesto. No obstante, las VPP-8 presentaron la mayor variabilidad experimental, además de la presencia predominante de fallas por pandeo lateral.

En términos generales, las VPG-8 mostraron el mejor desempeño global, combinando mayor capacidad resistente, baja variabilidad y una interacción estructural más eficiente entre sus componentes. De acuerdo con la Tabla 4, y con base en un análisis de varianza, se determina que existen diferencias significativas en términos de esfuerzos entre las vigas VPP4 y VPP8 ($p = 0.0002$), y entre las VPG4 y VPG8 ($p = 0.00003$).

Cabe señalar que las probetas VPPH y VPGH, correspondientes a pines insertados inmediatamente después de ser retirados del horno, registraron cargas inferiores entre el 3% y el 23% frente a las demás configuraciones. Esta condición, evaluada intencionalmente en una única probeta por grupo, confirma que los pines con diámetros relativamente menores a los de los agujeros no permiten una buena interacción mecánica, lo que limita la transmisión de fuerzas y reduce el desempeño estructural de las vigas.

Durante las pruebas, se evidenció un pandeo lateral significativo, acompañado de una reducción progresiva en la capacidad de carga, motivo por el cual los ensayos se detuvieron antes de que el material alcanzara su falla dentro de los niveles de esfuerzo aplicados. Estas

inestabilidades se pueden evidenciar en la Ilustración 33, correspondiente a las configuraciones de 4 latas, y en la Ilustración 34, correspondiente a las de 8 latas.



Ilustración 33 Montaje y falla típica en las probetas de 4 latas



Ilustración 34 Montaje y falla típica en las probetas de 8 latas.

5.4. Análisis estadístico de los resultados

5.4.1. Análisis de varianza (ANOVA)

Se evaluó la influencia del número de latas y del diámetro del pin sobre la carga máxima mediante un ANOVA de dos factores con réplica, considerando como factores el número de latas (4 y 8) y el diámetro del pin (9.5 y 12.7 mm), y como variable de respuesta la carga máxima $P_{\text{máx}}$, con un nivel de significancia de 0.05.

Los resultados indican que el número de latas tiene un efecto estadísticamente significativo sobre $P_{\max}$ ($p = 4.8 \times 10^{-7}$), y que el tipo de pin también presenta un efecto significativo, aunque secundario ($p = 0.037$). La interacción entre ambos factores no resultó significativa ($p = 0.056$), lo que confirma que el número de latas es el factor determinante en la capacidad de las vigas, mientras que el tipo de pin contribuye de manera secundaria al comportamiento estructural.

5.4.2. Análisis descriptivo

En general, las vigas de ocho latas presentaron mayor capacidad resistente que las de cuatro. Las configuraciones con pines PG mostraron un comportamiento más estable, mientras que las de pines PP presentaron mayor variabilidad, con coeficientes de variación entre 5 % y 15 %. En las vigas VPP predominó la falla por pandeo lateral, mientras que las VPG evidenciaron mejor estabilidad. La Ilustración 35 presenta la distribución de la carga máxima mediante diagramas de cajas y bigotes, y la Ilustración 36 muestra la relación entre carga máxima y desplazamiento máximo de las probetas.

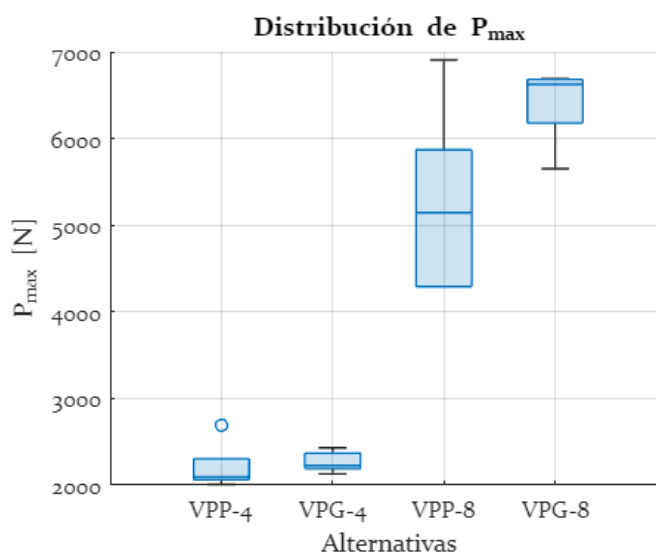


Ilustración 35 Distribución de $P_{\max}$ por alternativa.

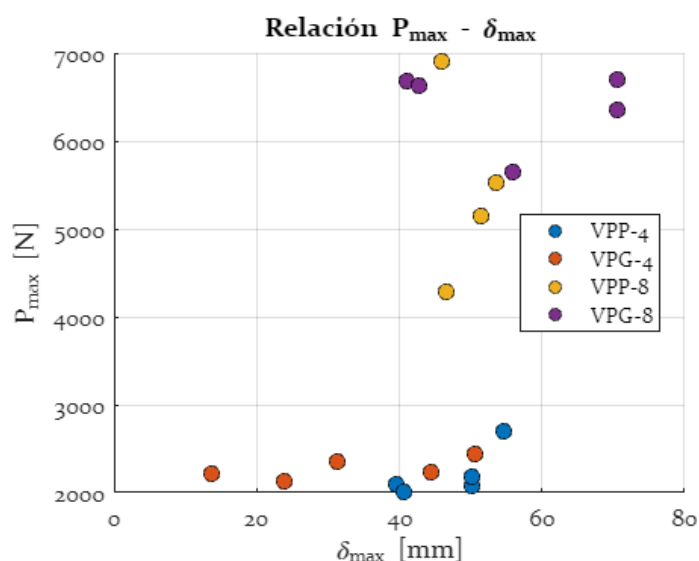


Ilustración 36 Relación $P_{\max}$ - $\delta_{\max}$ de cada probeta.

5.5. Análisis comparativo con estudios previos

Al comparar los resultados con los reportados por Duque Quintero (2025), se observa una tendencia similar de incremento de la capacidad resistente al aumentar el número de latas. En dicho estudio, las vigas unidas con tornillos alcanzaron cargas promedio de 3395 N y 6709 N para configuraciones de cuatro y ocho latas, respectivamente. En este trabajo, las vigas unidas con pines alcanzaron 2240 N y 5816 N. Aunque las cargas con pines son ligeramente menores, el comportamiento es comparable, lo que evidencia que el sistema de pines constituye una alternativa de conexión más sencilla y sostenible, con una eficiencia estructural similar a la de los elementos metálicos.

5.6.Recomendaciones de diseño para el uso de vigas de Pinboo según la norma NSR-10

A partir de las pruebas realizadas, se evaluó el comportamiento de las vigas frente a los límites de deflexión establecidos en el Título G de la NSR-10 (Tabla G.3.2-1) para pisos y cubiertas, considerando las cargas típicas de uso.

Para determinar la separación admisible entre vigas, se adoptaron los límites de deflexión máxima admisible establecidos en el Título G de la NSR-10 (Tabla G.3.2-1).

- Entrepisos

$$\delta_{adm} = \frac{L}{300}$$

- Cubiertas

$$\delta_{adm} = \frac{L}{240}$$

Para cada luz libre analizada (L), se estableció la deflexión máxima admisible (δ_{max}) y se determinó la separación máxima entre vigas (S) que garantiza el cumplimiento del estado límite de servicio (Tabla 5).

A partir del límite de deflexión admisible, se calculó la carga lineal máxima utilizando la expresión de deflexión para una viga simplemente apoyada sometida a carga distribuida uniforme, considerando el momento de inercia correspondiente a las vigas de ocho latas. Además, se empleó el módulo de elasticidad E medido experimentalmente en las pruebas de flexión.

$$\delta = \frac{5\omega L^4}{384EI}$$

Posteriormente, la carga lineal obtenida (ω) se relacionó con la carga superficial total actuante q (correspondiente a la suma de la carga muerta de 400 kg/m² y la carga viva de 180 kg/m², conforme a lo establecido en la norma para el uso considerado).

La separación admisible entre vigas S se determinó mediante:

$$S = \frac{\omega}{q}$$

Tabla 5 Separación admisible de vigas de 8 latas en entrepisos y cubiertas de acuerdo con la NSR-10.

Separación máxima para uso en entrepisos		
L [mm]	$d_{\text{máx}}$ [mm]	S [mm]
750	2.5	1280
1000	3.3	370
1250	4.2	204
1500	5	124
Separación máxima para uso en cubiertas		
750	3.1	1610
1000	4.8	462
1250	5.2	255
1500	6.3	155

Donde:

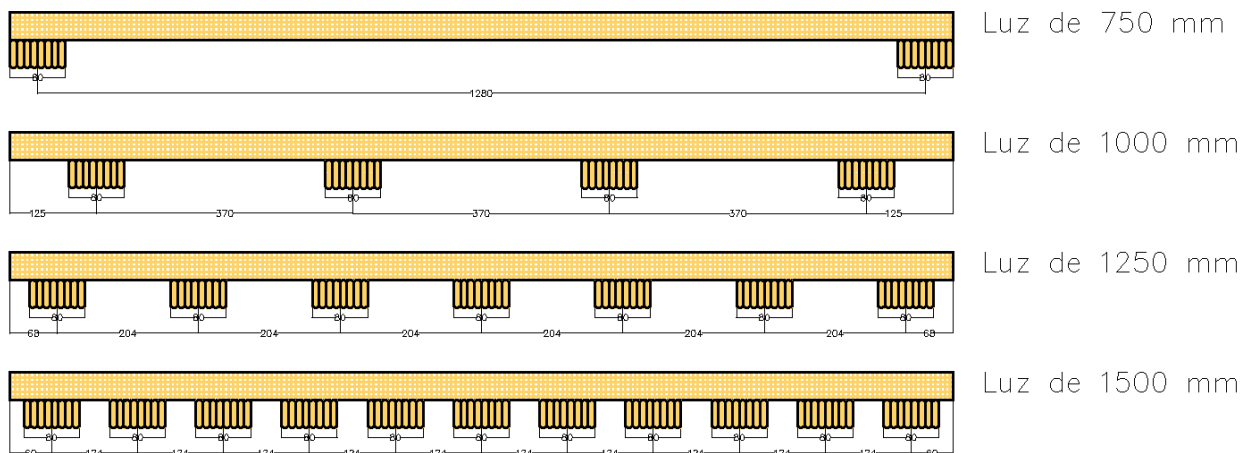
L = luz libre de la viga.

d_{max} = deflexión máxima admisible según NSR-10.

S = separación máxima entre ejes de vigas que satisface el criterio de deflexión.

En la Ilustración 37 se presenta un esquema que representa los valores de separación entre viguetas para entrepisos y cubiertas, calculados para las distintas luces evaluadas y previamente determinados en la Tabla 5.

Entrepisos



Cubiertas

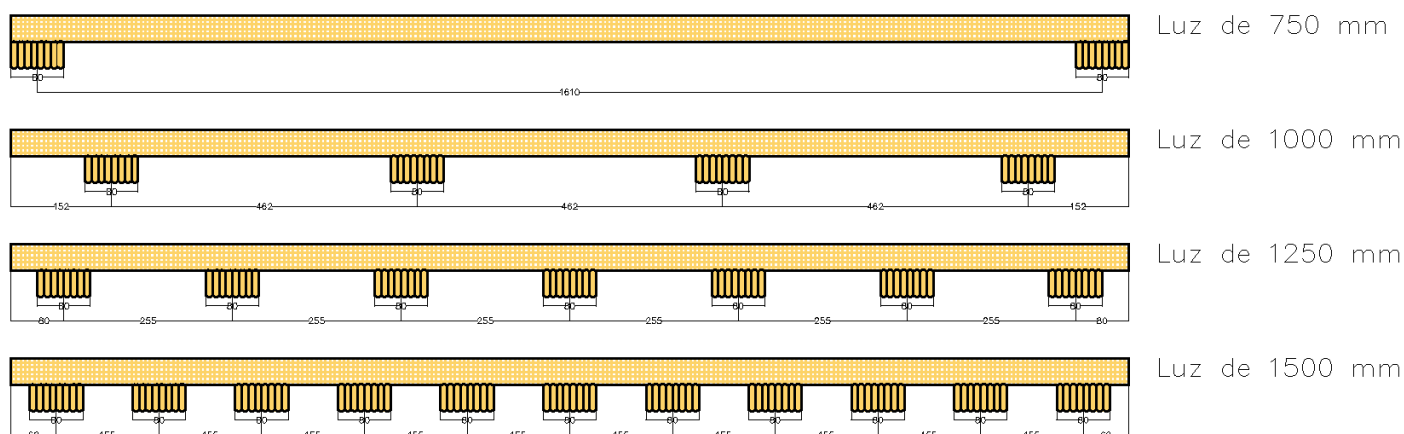


Ilustración 37 Separación de viguetas para entrepisos y cubiertas (mm).

Para luces mayores el sistema no cumple los límites de deflexión exigidos por la norma bajo las condiciones evaluadas, por lo que deben tenerse en cuenta estas limitaciones dentro del diseño arquitectónico. Para aumentar las luces puede explorarse el uso de elementos con mayor número de latas o implementar estrategias de refuerzo, arriostramiento lateral e incremento de inercia mediante conectores de cortante.

VI. CONCLUSIONES

Este estudio evaluó experimentalmente el comportamiento a flexión de vigas compuestas de *Guadua angustifolia* Kunth elaboradas con el sistema Pinboo, considerando la caracterización mecánica del material, la influencia del espaciamiento entre pines y la respuesta estructural de las vigas a escala real.

En la caracterización del material se determinaron valores de módulo de elasticidad (16.1 GPa, $CV= 11.9\%$), módulo de ruptura (112.6 MPa, $CV= 15.52\%$) y módulo de corte (53.2 MPa, $CV= 9.8\%$). En el módulo de elasticidad no se evidenciaron diferencias significativas según la orientación de la fibra, mientras que en el módulo de ruptura sí se identificaron diferencias asociadas a esta variable.

En el análisis del espaciamiento entre pines se observaron diferencias estadísticamente significativas en la carga máxima alcanzada. El espaciamiento de 200 mm presentó mayor capacidad que separaciones menores, lo que indica que una mayor densidad de perforaciones no incrementa necesariamente la resistencia del elemento, y en cambio, puede afectar negativamente la respuesta estructural.

En los ensayos a escala real, el número de latas fue el factor con mayor influencia en la carga máxima y en la rigidez, con diferencias altamente significativas ($p = 4.8 \times 10^{-7}$). El incremento de cuatro a ocho latas produjo aumentos entre 141 % y 182 % en la capacidad promedio, destacándose las vigas de ocho latas con pines de 12.7 mm como las de mejor desempeño resistente. No obstante, el momento de inercia efectivo determinado experimentalmente fue cercano a su respectivo valor teórico en cada configuración evaluada. Asimismo, la relación entre el momento de inercia efectivo y el teórico fue similar tanto en

los prototipos de cuatro latas como en los de ocho, lo que indica que el aumento en el número de latas incrementa principalmente la capacidad resistente. El modo de falla predominante fue el pandeo lateral–torsional aunque el comportamiento general se mantuvo estable.

Frente a los límites de servicio establecidos en la Tabla G.3.2-1 de la NSR-10, el sistema presenta un desempeño adecuado para luces de hasta 1.5 m bajo las condiciones evaluadas. Para luces mayores, las deflexiones superan los valores admisibles, por lo que su implementación requiere ajustes en el diseño estructural. El aumento de luz puede lograrse mediante estrategias que incrementen la rigidez, como el uso de un mayor número de latas, la incorporación de refuerzos o arrostramientos laterales y el incremento de la inercia mediante conectores de cortante. En general, el comportamiento observado evidencia que el sistema está gobernado por criterios de servicio más que por resistencia última, lo que lo hace apropiado para aplicaciones de pequeña escala y luces reducidas.

Como proyección futura, se propone evaluar el desempeño del sistema en configuraciones de losas de entrepiso, empleando estas vigas como viguetas estructurales, con el fin de analizar su comportamiento bajo condiciones reales de servicio y determinar su viabilidad en aplicaciones constructivas a mayor escala.

VII. REFERENCIAS

- [1] Aniñon, M. J.,C., Lessandro Estelito, O. G. (2024). Avances en técnicas de conexión para estructuras de bambú en bruto: una revisión. *Buildings*, 14(4), 1126. doi:<https://doi.org/10.3390/buildings14041126>.
- [2] Sánchez Vivas, L., Mullins, G., Cunningham, J., Mihelcic, J. (2019.). Propiedades mecánicas del bambú: una síntesis de investigación de los valores de resistencia y los factores que influyen en ellos.
- [3] Janssen, J. J. A. (2000). *Designing and Building with Bamboo*.
- [4] Lucila Aguilar arquitectos. (2019). *Manual para la construcción con Bambú*.
- [5] Chen, M., Ye, L., Li, H., Wang, G., Chen, Q., Fang, C., Dai, C., Fei, B. (2020). Resistencia a la flexión y ductilidad del bambú moso. *Construction and Building Materials*, 246, 118418
- [6] Costa, B. M. da, Sakurai, T. (2021). A participação comunitária em projetos de soluções baseadas na natureza na cidade de São Paulo: estudo das hortas urbanas, Horta da Dona Sebastiana, Agrofavela-Refazenda e Horta Popular Criando Esperança. *Revista LABVERDE*, 11(1), 171–195. <https://doi.org/10.11606/issn.21792275.labverde.2021.188679>
- [7] Chen, S., Wei, Y., Zhu, J., Lin, Y., Du, H. (2023). Experimental investigation of the shear performance of bamboo scrimber beams reinforced with bamboo pins. *Construction and Building Materials*, 365, 130044.
- [8] Mitch, D., Harries, K. A., Sharma, B. (2010). Characterization of splitting behavior of bamboo culms. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 22(11), 1195-1199.

- [9] García, J. J., Rangel, C., Ghavami, K. (2012). Experiments with rings to determine the anisotropic elastic constants of bamboo. *Construction and building materials*, 31, 52-57.
- [10] Duque, J., López, L. F., García, J. J. (2024). Joints with bamboo slats for shear wall frames. *Construction and Building Materials*, 425, 135913.
- [11] J. Mena et al. Assessment of fire reaction and fire resistance of *Guadua angustifolia kunth* bamboo *Constr. Build. Mater.* (2012)
- [12] L. Molari et al. Mechanical characterization of five species of Italian bamboo Structures (2020).
- [13] C. Hong et al. Review of connections for engineered bamboo structures *J. Build. Eng.* (2020).
- [14] Haibey, S.; Shijagurumayum, C.; Thokchom, S. Review on the Use of Bamboo as a Construction Material. *SAMRIDDHI J. Phys. Sci. Eng. Technol.* 2022, 14, 47–51.
- [15] Rampal, T.; Goel, M.; Chawra, B.; Taneja, A.; Taneja, P. Potential Use of Bamboo as a Sustainable Material in Construction in India: A Survey of Literature. *Int. Soc. Study Vernac. Settl.* 2023, 10, 90–103.
- [16] Singh, K.; Garg, H.; Pabla, B.S. Evaluation of Mechanical Properties of Different Bamboo Species for Structural Applications. *Int. J. Innov. Technol. Explor. Eng.* 2019, 8, 2927–2935.
- [17] Ribeiro, R. A. S., Ribeiro, M. G. S., Miranda, I. P. (2017). Bending strength and nondestructive evaluation of structural bamboo. *Construction and Building Materials*, 146, 38-42.

- [18] Giraldo, J. A., & Ramírez, F. (2020). Efecto del contenido de humedad en la resistencia a tensión paralela a la fibra del bambú *Guadua angustifolia* Kunth. *Revista Ingeniería y Ciencia*, 16(31), 45-62.
- [19] Fernández Sánchez, A. (2022). Estudio del bambú y su uso en la construcción. Caracterización mecánica.
- [20] Maya Echeverry, J. M., Camargo García, J. C., Mosquera, O. M. (2017). Características de los culmos de guadua de acuerdo con el sitio y su estado de madurez. *Colombia forestal*, 20(2), 180-190.
- [21] Sapuyes, E., Osorio, J., Takeuchi, C., Duarte, M. y Erazo, W. (2018). Resistencia y elasticidad a la flexión de la guadua *angustifolia* kunth de Pitalito, Huila. *Revista de Investigación*, 11(1), 97-111. <https://doi.org/10.29097/2011-639X.182>
- [22] Lozano Peña, J. E. (2021). Determinación de los esfuerzos últimos de la *Guadua Angustifolia* en la región andina de Colombia correlacionada con variables de clima (Doctoral dissertation, Universitat Politècnica de València).
- [23] Luna, P., Lozano, J., & Takeuchi, C. (2014). Determinación experimental de valores característicos de resistencia para *Guadua angustifolia*. *Maderas. Ciencia y tecnología*, 16(1), 7792.
- https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-221X2014000100007.
- [24] Chen, S., Wei, Y., Zhu, J., Lin, Y., Du, H. (2023). Experimental investigation of the shear performance of bamboo scrimber beams reinforced with bamboo pins. *Construction and Building Materials*, 365, 130044.

- [25] Vélez, S. (2006). Símbolo y búsqueda de lo primitivo. En Actualidad y futuro de la arquitectura de bambú en Colombia (pp. 35–81).
- [26] Estudio Arquitectónico Malaka. (2020). *Partes y aprovechamiento de la guadua angustifolia Kunth* [Infografía].
- [27] Duque Quintero, J. H. (2025). Diseño de viguetas de latas de bambú atornilladas para soporte de entresijos y cubiertas [Tesis de pregrado, Universidad del Valle].
- [28] ASTM International. ASTM D198-15. Standard test methods of static tests of lumber in structural sizes. West Conshohocken (PA): ASTM International; 2015.
- [29] Saraz, J. A. O., Restrepo, J. M. V., & Velásquez, H. J. C. (2007). Determinación de la relación de poisson de la Guadua angustifolia Kunth a partir de procesamiento de imágenes y su relación con la estructura interna. *Revista Facultad Nacional de Agronomía-Medellín*, 60(2), 4067-4076.
- [30] López, L. F., & Correal, J. F. (2009). *Estudio exploratorio de los laminados de bambú Guadua angustifolia como material estructural*. Maderas. Ciencia y Tecnología, 11(3), 171–182. <https://doi.org/10.4067/S0718-221X2009000300001>
- [31] BenSaïda A. Shapiro-Wilk and Shapiro-Francia normality tests (MATLAB File Exchange). MathWorks; 2025 [citado 12 feb 2025]. Disponible en: <https://la.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/13964-shapiro-wilk-and-shapiro-francia-normality-tests>

- [32] MathWorks. adtest: Anderson-Darling test for normality (Statistics and Machine Learning Toolbox). 2025 [citado 12 feb 2025]. Disponible en: <https://la.mathworks.com/help/stats/adtest.html>
- [33] MathWorks. kstest: One-sample Kolmogorov-Smirnov test (Statistics and Machine Learning Toolbox). 2025 [citado 12 feb 2025]. Disponible en: <https://www.mathworks.com/help/stats/kstest.html>
- [34] Better Bamboo Buildings. (2025). *The story of Pinboo boards*. Recuperado de BetterBambooBuildings.com — relato histórico de la técnica Pinboo y su uso en paneles (entre otros elementos) que destacan por su carácter estético y estructural.
- [35] Gere, J. M., & Timoshenko, S. P. (1997). *Mechanics of materials* (4th ed.). PWS Publishing Company.

VIII. ANEXOS

A.1. Construcción de elementos para el montaje experimental

“Para la ejecución de los diferentes ensayos experimentales fue necesario construir elementos auxiliares que permitieran aplicar las cargas de manera controlada y reproducible.

En primer lugar, para la caracterización mecánica del material, se diseñó un dispositivo de aplicación de carga que permite distribuir el esfuerzo en dos puntos, con una separación aproximada de 70 mm entre ellos. Este elemento garantizó la correcta ejecución del ensayo de flexión a cuatro puntos en las probetas de bambú.” (Duque Quintero, 2025). El dispositivo se muestra en la Ilustración 38.



Ilustración 38 Dispositivo de aplicación de carga caracterización mecánica del bambú.

Luego, para las pruebas de flexión de los prototipos de espaciamento se construyó un dispositivo similar, con una separación entre los puntos de carga de 200 mm, de acuerdo con las dimensiones de las probetas. El dispositivo se muestra en la Ilustración 39.



Ilustración 39 Dispositivo de aplicación de carga prototipos de espaciamento.

“Posteriormente, para las pruebas de flexión de las viguetas definitivas, se construyó un dispositivo similar, ajustado a una separación entre puntos de carga de 500 mm, de acuerdo con las dimensiones de las probetas y la configuración establecida en el programa experimental.”(Duque Quintero, 2025). El dispositivo se muestra en la Ilustración 40.



Ilustración 40 Dispositivo de aplicación de carga prototipos finales.

“Adicionalmente, se realizaron adecuaciones en los apoyos, separados 1500 mm, mediante la fijación de piezas soldadas a un perfil metálico, con el fin de asegurar la estabilidad durante los ensayos. Sobre este mismo perfil se instalaron los arriostramientos laterales, ubicados cerca de los puntos de aplicación de carga, con el objetivo de evitar desplazamientos laterales y mitigar el riesgo de pandeo durante la aplicación de carga.” (Duque Quintero, 2025). Los apoyos y arriostramientos se muestran en la Ilustración 41.

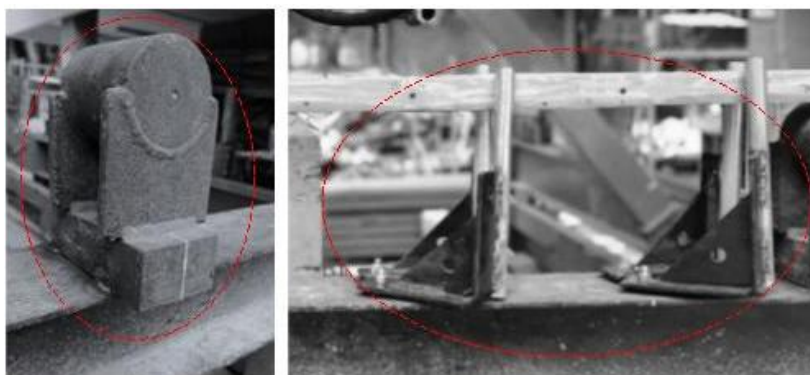


Ilustración 41 Apoyos y arriostramientos laterales, respectivamente.

A.2. Ensayos de determinación de espaciamiento

A continuación, se presentan las dos configuraciones de probetas utilizadas para determinar el espaciamiento, correspondientes a latas cepilladas en la Ilustración 42 y sin cepillar en la Ilustración 43.



Ilustración 42 Probeta de 70cm, con espaciamiento de 200 mm, con latas sin cepillar.



Ilustración 43 Probeta de 70cm, con espaciamiento de 150 mm, con latas cepilladas.