



UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL Y GEOMÁTICA
PROGRAMA ACADÉMICO DE INGENIERÍA CIVIL

Diseño de viguetas de latas de bambú atornilladas
para soporte de entrepisos y cubiertas

JHONATAN HARVEY DUQUE QUINTERO
Estudiante pregrado

Santiago de Cali, 2025



Universidad del Valle
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil y Geomática
Programa Académico de Ingeniería Civil
Grupo de Investigación Biomecánica



Diseño de viguetas de latas de bambú atornilladas para soporte de entrepisos y cubiertas

JHONATAN HARVEY DUQUE QUINTERO

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Civil

JOSÉ JAIME GARCÍA ÁLVAREZ Ph.D.
Director

JHONATHAN ALEXANDER DUQUE OROBIO M.Eng.
Codirector

Santiago de Cali, 2025

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 Ingeniero Civil.

Dominika Malkowska Ph.D.

Jurado

Harold Cárdenas Ordóñez M.Eng.

Jurado

Santiago de Cali, 2025

"La constancia no está en empezar, sino en perseverar."

— Leonardo da Vinci

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por la vida, la constancia y la fortaleza para llegar hasta aquí; por ser guía en cada paso y recordarme que la perseverancia siempre abre camino.

A mis padres, por su esfuerzo incansable, por enseñarme el valor del trabajo y la honestidad, y por ser ejemplo de amor, entrega y resiliencia.

A mis hermanas, por su compañía, sus palabras de aliento y la confianza que siempre depositaron en mí, recordándome que no caminaba solo.

A mi pareja, por su paciencia, comprensión y apoyo inquebrantable; por acompañarme en los momentos difíciles, celebrar cada avance y recordarme siempre que no estaba solo en este camino.

A mi director, José Jaime, y a mi codirector, Jhonathan Alexander, por su guía, exigencia y acompañamiento, que hicieron posible que este trabajo alcanzara la rigurosidad y claridad necesarias. Su apoyo fue fundamental para convertir una idea en un proyecto real y sólido.

Y a mí mismo, por no ceder en los momentos de duda, por confiar incluso cuando parecía imposible y por recordar siempre que la disciplina vence al miedo.

Este logro es fruto de todas esas fuerzas unidas: fe, amor, guía y perseverancia.

CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS.....	5
CONTENIDO.....	6
LISTA DE TABLAS.....	8
LISTA DE FIGURAS.....	9
RESUMEN.....	11
1. INTRODUCCIÓN.....	12
1.1. Introducción general	12
1.2. Formulación del problema.....	13
2. MARCO TEÓRICO.....	15
2.1. Revisión de antecedentes	15
2.2. Estado del arte	16
3. OBJETIVOS	18
3.1. Objetivo General.....	18
3.2. Objetivos específicos	18
4. FASE I: PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO	19
4.1. Selección de los materiales.....	19
4.1.1. Bambú.....	19
4.1.2. Tornillería	21
4.2. Caracterización mecánica del material	28
4.2.1. Bambú (<i>Guadua angustifolia</i> Kunth)	28
4.2.2. Tornillería	32
4.3. Evaluación numérica del espaciamiento entre tornillos	34
4.4. Procedimiento constructivo	38

4.5.	Ensayos preliminares de flexión de viguetas	41
4.5.1.	Métodos	41
4.5.2.	Resultados.....	42
4.5.3.	Discusión	45
5.	FASE II: EVALUACIÓN MECÁNICA	46
5.1.	Programa experimental	46
5.2.	Prueba de flexión de muestras	46
5.3.	Resultados de los ensayos.....	47
6.	FASE III: RECOMENDACIONES DE DISEÑO.....	52
6.1.	Análisis estadístico de capacidad	52
6.2.	Propiedades de servicio e inercia efectiva	54
6.3.	Ensayo de carga en losa con viguetas.....	54
6.3.1.	Metodología.....	54
6.3.2.	Resultados.....	57
6.3.3.	Discusión	58
6.3.4.	Modelo computacional de losa	58
6.4.	Consideraciones de diseño y uso de viguetas según deflexión	60
	CONCLUSIONES.....	61
	REFERENCIAS	62
	ANEXOS.....	67
A.1.	Construcción de elementos para el montaje experimental	67
A.2.	Registro fotográfico de ensayos.....	69
A.3.	Registro fotográfico de ensayo en losa.	77

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Taxonomía de la guadua [28].	19
Tabla 2. Especificaciones de la tornillería.....	21
Tabla 3. Resultados preliminares conexiones.....	22
Tabla 4. Escala de juicio [31].....	25
Tabla 5. Resultados de importancia de criterios, según evaluación de 5 expertos.....	26
Tabla 6. Resultados alternativas de conexión, según evaluación de 5 expertos.....	27
Tabla 7. Resultados ensayos de flexión a 4 puntos, 41 especímenes.	29
Tabla 8. Constantes elasto-plásticas usadas en el modelo.....	36
Tabla 9. Cargas críticas en función del espaciamiento de tornillos.....	37
Tabla 10. Resultados carga máxima pruebas piloto.....	42
Tabla 11. Momento de inercia teórico y efectivo.	43
Tabla 12. Configuración geométrica y tipo de conexión de los especímenes ensayados.....	46
Tabla 13. Resumen de resultados experimentales y cálculo de inercias.....	47
Tabla 14. Esfuerzo a flexión y estadísticos de capacidad ($P_{m\acute{a}x}$) por alternativa.	52
Tabla 15. Propiedades de servicio e inercia efectiva por alternativa ($\delta_{m\acute{a}x}$ e I_{ef}).	54
Tabla 16. Comparación de deflexiones experimentales y numéricas (Prueba 3).....	59
Tabla 17. Separación admisible de viguetas en entrepisos.	60
Tabla 18. Separación admisible de viguetas en cubiertas.....	60

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Planos de carga; a) fuera del plano. b) en el plano.	17
Figura 2. Partes de la guadua.	20
Figura 3. Tornillos: (a) Drywall, (b) Drywall punta broca y (c) Cabeza plana punta broca.	21
Figura 4. Tipos de conexiones.	22
Figura 5. Lata para determinación de procedimientos previos.	22
Figura 6. Sujeción y marcado.	23
Figura 7. Avellanado.	23
Figura 8. Atornillado.	24
Figura 9. Tipos de conexiones para encuesta a expertos.	24
Figura 10. Estructura jerárquica encuesta.	25
Figura 11. Dimensiones de las probetas: (a) Dirección tangencial y (b) Dirección radial. (dimensiones en milímetros).....	28
Figura 12. Montaje experimental (dimensiones en mm).	28
Figura 13. Curvas carga - desplazamiento pruebas de flexión tangencial de 35 especímenes.	30
Figura 14. Distribución normal del MOE.	31
Figura 15. Distribución gamma del MOR.	31
Figura 16. Montaje experimental para ensayo de cortante pura en tornillos.	32
Figura 17. Carga máxima por ensayo tornillos drywall.	32
Figura 18. Carga máxima por ensayo tornillos cabeza plana.	33
Figura 19. Boxplot de carga máxima en cortante para los 2 tipos de tornillos.	33
Figura 20. Falla típica a cortante tornillos cabeza plana(a) y drywall (b).	34
Figura 21. Patrón de atornillado viguetas.	34
Figura 22. Patrón de atornillado 100, 125, 166.5 y 250 mm.	35
Figura 23. Modelo computacional viguetas 100, 125, 166.5 y 250 mm, respectivamente.	35
Figura 24. Condiciones de borde, viga simplemente apoyada.	36
Figura 25. Falla típica de pandeo lateral torsional.	37
Figura 26. Proceso de corte de excesos, extracción de entrenudos y cepillado de latas.	40

Figura 27. Montaje experimental.	41
Figura 28. Curva carga-deflexión VTP ₄ , VTD ₄ . y VTP ₈	42
Figura 29. Prueba espécimen VTP ₄	44
Figura 30. Prueba espécimen VTP ₈	44
Figura 31. Prueba espécimen VTD ₄	44
Figura 32. Variación del montaje experimental.	45
Figura 33. Falla típica presentada en los ensayos.	49
Figura 34. Curvas carga-deflexión – VTD ₄	50
Figura 35. Curvas carga-deflexión – VTP ₄	50
Figura 36. Curvas carga-deflexión – VTD ₈	51
Figura 37. Curvas carga-deflexión – VTP ₈	51
Figura 38. Distribución de $P_{\text{máx}}$ por alternativa.	53
Figura 39. Relación $P_{\text{máx}}-\delta_{\text{máx}}$ de cada probeta.	53
Figura 40. Detalle de losa (vista inferior).	55
Figura 41. Detalle de losa (vista superior).	55
<i>Figura 42. Ensayo experimental – Prueba 1.</i>	<i>56</i>
<i>Figura 43. Ensayo experimental – Prueba 2.</i>	<i>56</i>
<i>Figura 44. Ensayo experimental – Prueba 3.</i>	<i>56</i>
Figura 45. Deflexión por posición de carga (Prueba 1).	57
Figura 46. Deflexión por posición acumulada (Prueba 2).	57
Figura 47. Esquema deformada de las viguetas (Prueba 3).	57
Figura 48. Modelo computacional losa.	58
Figura 49. Deflexiones medidas en las posiciones de los sensores del ensayo experimental.	59
Figura 50. Deflexiones medidas en las posiciones de los sensores del ensayo experimental, modelo de prueba.	60

RESUMEN

El proyecto de investigación se desarrolló como respuesta a la necesidad de impulsar alternativas sostenibles en la construcción, frente al elevado impacto ambiental asociado al uso de materiales convencionales. En este escenario, el bambú, y en particular la especie *Guadua angustifolia* Kunth —abundante en Colombia y con propiedades físico-mecánicas destacadas— se reconoce como un recurso renovable idóneo. No obstante, una proporción significativa de este material se descarta por no cumplir con los requisitos dimensionales para elementos principales de la estructura, como vigas y columnas, lo que abre la posibilidad de su aprovechamiento en nuevos usos constructivos.

El objetivo fue diseñar viguetas conformadas por latas de bambú unidas con tornillos comerciales, evaluando su factibilidad como elementos estructurales para entrepisos y cubiertas. La investigación se desarrolló en tres fases: (I) definición del procedimiento constructivo, que incluyó selección y caracterización de materiales, validación de patrones de atornillado mediante análisis multicriterio y modelación numérica; (II) evaluación mecánica experimental, en la que se fabricaron 20 especímenes en cuatro configuraciones y se sometieron a ensayos de flexión a cuatro puntos conforme a la norma ASTM D198-15; y (III) formulación de recomendaciones de diseño basadas en los resultados obtenidos, complementadas con una prueba final en la que se evaluó una losa conformada por un grupo de viguetas bajo carga de personas.

Los ensayos mostraron que las viguetas con mayor número de latas alcanzaron capacidades resistentes superiores y que el uso de tornillos de cabeza plana incrementó la rigidez respecto a los de tipo drywall. En todas las tipologías, el momento de inercia efectivo superó al teórico, evidenciando buen trabajo conjunto entre las latas, aunque se identificaron fenómenos de inestabilidad lateral-torsional que limitaron la capacidad última y deflexiones que superaron los límites de servicio de la NSR-10.

En conclusión, la investigación demostró la viabilidad técnica de las viguetas de latas de bambú ensambladas con tornillos comerciales, aportando lineamientos constructivos y estableciendo una base para futuras investigaciones.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Introducción general

En un mundo donde el cambio climático se ha convertido en una crisis global, la búsqueda de alternativas de construcción sostenible es crucial. La construcción tradicional, con su alto consumo de energía y la generación significativa de desechos, contribuye de manera alarmante a los problemas ambientales actuales. En este contexto, es fundamental encontrar soluciones de menor impacto ambiental.

El bambú, conocido por su rápido crecimiento y sus notables propiedades físico-mecánicas, se presenta como una alternativa ecológica prometedora en construcción. En países como China, donde se encuentran numerosas especies de bambú y una larga tradición con este material [1] [2], se han realizado grandes avances tecnológicos para la transformación del bambú. Incluyendo el uso de elementos estructurales de bambú laminado, cuya manufactura requiere alta presión y temperatura [3], [4].

Aunque el bambú ofrece numerosos beneficios, el desperdicio en construcción continúa siendo un desafío [5]. A ello se suman las dificultades inherentes al trabajo con culmos, como sus irregularidades geométricas, la presencia de fisuras, la variabilidad en sus propiedades mecánicas y los retos logísticos asociados a su transporte y manipulación. En este contexto, han surgido técnicas que emplean latas de guadua obtenidas del material sobrante de culmos cortados, lo que ha permitido aprovechar dichos desechos de manera más eficiente.

Este proyecto de grado tiene como objetivo desarrollar una técnica para el diseño de viguetas de bambú ensambladas con tornillos comerciales, utilizando el patrón de atornillado basado en la técnica NLT. A través de esta investigación, se evaluará la viabilidad de esta técnica como una solución eficiente y ecológica para la construcción de entresijos y cubiertas. Al abordar la brecha existente en el uso de tornillos comerciales en viguetas de bambú, se examinará su rendimiento mecánico y se propondrán métodos constructivos. Los resultados mejorarán el aprovechamiento del bambú en la construcción y ofrecerán soluciones prácticas y sostenibles, generando beneficios tanto económicos como ambientales.

1.2. Formulación del problema

El mundo ha progresado, pero ha tenido como precio daños ambientales reflejados en el cambio climático, debido a emisiones de gases contaminantes. Es por esto que la ingeniería se ha involucrado en la construcción sostenible, basada en los tres pilares del desarrollo sostenible: ambiental, social y económico, originados en el Informe de Brundtland en 1987 [6]. La construcción tradicional enfrenta grandes desafíos para cumplirlos, debido al consumo energético y la contaminación generada en la producción de materiales convencionales [7]. Además, alrededor del 13% de materiales entregados *in situ* terminan como desecho [8].

Una opción común ha sido la madera; sin embargo, la FAO reportó que la superficie mundial de bosques disminuyó 0.99% entre 1990 y 2015, y la disponibilidad de madera 0.41% hasta 2011 [9]. Esto evidenció la necesidad de encontrar sustitutos. En este sentido, el bambú se presentó como candidato idóneo por su rápido crecimiento, sus propiedades físico-mecánicas y su abundancia [10], capaz de reemplazar materiales altamente contaminantes [11].

En la construcción con bambú, cerca del 31.2% se desperdicia por culmos defectuosos [5], a lo cual se suman problemas de transporte y manipulación. Las latas de guadua, en contraste, ofrecen regularidad geométrica, uniones normalizadas, menor costo de transporte y mayor aprovechamiento del material, lo que ha impulsado técnicas como el *pinboo*.

En Colombia, desde 2002, se han desarrollado trabajos en esta técnica, que forma tableros de latas unidas mediante pines cilíndricos. Originalmente, Jörg Stamm la aplicó en puentes, en alternativa al uso de alambre de Antonio Giraldo. Actualmente, los tableros de pinboo se emplean en pisos, revestimientos y muebles en Sudamérica, Indonesia y Asia-Pacífico, aunque su producción sigue siendo localizada y limitada por la alta demanda de mano de obra [12].

A pesar de que los pines de bambú han presentado buen funcionamiento mecánico [13], resulta necesario explorar conexiones alternativas, como los tornillos, que son fáciles de instalar y generan adherencia. Aunque implican un impacto ambiental propio, pueden

ampliar el uso del bambú en aplicaciones estructurales, lo que puede compensar la huella de carbono y traer beneficios técnicos, logísticos y económicos.

En este contexto, surgió la posibilidad de desarrollar viguetas de latas de bambú unidas con tornillos comerciales como variante del pinboo, evaluando procedimientos constructivos y ensayos mecánicos. Si bien la técnica del pinboo y sus variaciones han sido investigadas [14] [11] [15] [16], no se han realizado estudios sobre el uso de tornillos comerciales en viguetas para entresijos y cubiertas de bambú. Por lo tanto, es importante definir configuraciones adecuadas para estos componentes estructurales y presentar resultados experimentales para su implementación.

Considerando la importancia de fomentar el uso de técnicas constructivas alternativas con enfoque sostenible, se plantea la siguiente pregunta de investigación:

¿Cómo diseñar viguetas de bambú unidas con tornillos comerciales para su uso en entresijos y cubiertas?

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Revisión de antecedentes

La madera laminada con clavos (NLT, por sus siglas en inglés, *Nail Laminated Timber*), es una técnica constructiva que alcanzó su mayor auge entre los años 1990 y 2010 en Canadá y Estados Unidos [7]. La investigación sobre esta técnica se ha abordado desde diversos enfoques, incluyendo el uso de diferentes especies de madera y bambú, con el objetivo de evaluar el comportamiento mecánico, enfocado en la resistencia al corte, la deflexión y el desempeño de las uniones [7] [17] [18].

En la literatura no existe información sobre el uso de latas de bambú para el desarrollo de técnicas similares al NLT, objetivo de la presente investigación. No obstante, se han llevado a cabo estudios que emplean bambú laminado, ya sea de forma individual o en combinación con madera, con el propósito de aprovechar las propiedades de resistencia a la tracción de las fibras de bambú [19].

Modelos de elementos finitos también serán empleados en el presente proyecto con el propósito de optimizar el diseño experimental y reducir la cantidad de especímenes requeridos. Un antecedente relevante se encuentra en un estudio realizado en Alemania en 2001, donde se investigó una configuración de pisos en madera con el objetivo de derivar ecuaciones de diseño para la rigidez a flexión. En dicho trabajo, las simulaciones mediante elementos finitos permitieron disminuir costos asociados a la producción de muestras, validando posteriormente los resultados con solo seis prototipos reales [20].

El interés general en los estudios sobre técnicas de construcción con madera se centra en especies de rápido crecimiento [21] [7]; una característica que también comparte el bambú, el cual puede alcanzar la madurez en un plazo de 3 a 5 años [1]. En 2013, se desarrolló un piso de madera contralaminada, en el que las capas están dispuestas en direcciones opuestas. Este piso fue evaluado bajo carga de vibración y mediante un ensayo de flexión a cuatro puntos, demostrando ser una alternativa viable para la construcción [22].

Generalmente, se ha trabajado con madera contralaminada, en la que las capas individuales de tablas suelen estar unidas mediante adhesivos. No obstante, también existen métodos de fabricación que emplean clavos y tornillos, los cuales permiten conformar

elementos con mayor resistencia al cizallamiento entre capas. Estas técnicas, originalmente desarrolladas para madera, han servido como referencia para explorar alternativas en otros materiales de rápido crecimiento, como el bambú, abriendo la posibilidad de utilizarlos en aplicaciones estructurales para entrepisos [23].

2.2. Estado del arte

La técnica del Nail-Laminated Timber (NLT) se originó como un método de construcción eficiente que empleaba clavos para unir piezas de madera, generando elementos estructurales robustos. Aunque su popularidad decayó con la llegada de la madera laminada encolada, ha resurgido en los últimos años debido a sus ventajas específicas, como la rapidez de ensamblaje y su versatilidad para entrepisos y cubiertas [24]. Sin embargo, la investigación sobre este sistema es limitada, especialmente en el contexto de su aplicación a materiales alternativos como el bambú.

Estudios recientes han centrado su atención en la adaptación de esta técnica a nuevos materiales. En China, se han investigado combinaciones de bambú laminado y madera para conformar paneles similares, destacando cómo la fuerza en un segmento de laminación discontinua se transfiere a través de las conexiones laterales, lo que incrementa la capacidad de carga en flexión [7]. A nivel estructural, la madera de baja calidad ha demostrado ser un material que puede beneficiarse de este método, ya que su valor aumenta al ensamblarse en paneles [21], una situación similar a la del bambú, cuyos culmos de baja calidad presentan limitaciones como elementos estructurales individuales.

A pesar de estos avances, la adaptación del bambú presenta desafíos particulares. En estudios preliminares, el uso de clavos en el bambú ha sido descartado como técnica viable, ya que la penetración de los clavos genera fisuración longitudinal por la separación de fibras. En cambio, elementos como tornillos o varillas roscadas, que permiten una perforación previa, han mostrado mejores resultados al evitar estos problemas [25]. Malkowska destaca que las uniones clavadas generan fallas por tensiones tangenciales, mientras que las uniones atornilladas mitigan estos efectos cortando el material con la rosca en lugar de desplazarlo [26].

Diversos estudios han evaluado los modos de falla en estos elementos sometidos a cargas de flexión. En ensayos fuera del plano (ver Figura 1), se observó que las fallas por corte entre las capas internas son las más comunes. Mientras que, bajo cargas en el plano, el fallo ocurre por ruptura debida a flexión en la mitad inferior del panel, lo que sugiere diferencias críticas en el comportamiento estructural según el tipo de carga [4].

Wen & Xiao [4] concluyen que las muestras ensayadas bajo carga de flexión en el plano poseen mayor capacidad de carga y rigidez en comparación con aquellas ensayadas fuera del plano. Este comportamiento está directamente relacionado con la calidad de la conexión entre laminaciones; fuera del plano depende de la integridad de las conexiones, mientras que en el plano, la capacidad depende más de las propiedades individuales de las latas que conforman el conjunto.

A pesar del creciente interés en el uso de bambú laminado en este tipo de técnicas, aún se requieren más estudios que analicen su aplicabilidad a gran escala en estructuras. El estudio más reciente, realizado en 2023, complementó las pruebas experimentales con análisis numéricos y analíticos, abordando vacíos en investigaciones anteriores. Los resultados mostraron que el módulo de elasticidad promedio y la resistencia máxima a flexión del NLT fueron similares a los de las laminaciones individuales que lo conformaban, aunque con una variabilidad significativamente menor [24]. Además, tanto los métodos analíticos como los numéricos lograron predecir adecuadamente las propiedades de flexión, con errores de modelo inferiores al 7%. Esto sugiere que la técnica es viable para aplicaciones estructurales; sin embargo, es importante considerar el número de laminaciones y las condiciones de carga en futuros estudios [24].

Es fundamental investigar las conexiones y el comportamiento del bambú bajo cargas a flexión en el plano. Aunque se han realizado ensayos iniciales, las conexiones con tornillos necesitan un análisis más detallado para evaluar su eficiencia frente a las técnicas tradicionales de madera. Esta investigación busca abordar estos vacíos, combinando métodos

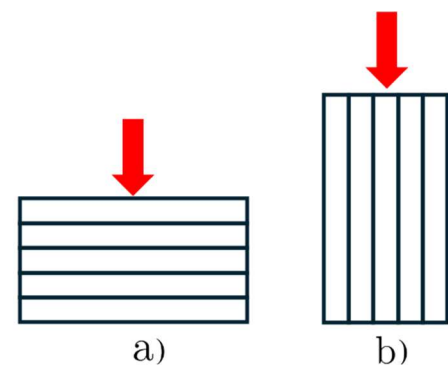


Figura 1. Planos de carga; a) fuera del plano. b) en el plano.

experimentales y analíticos, y ofreciendo una visión más completa sobre la viabilidad de las latas de bambú, sin procesos industriales de laminado, para futuras aplicaciones constructivas.

3. OBJETIVOS

3.1. Objetivo General

Diseñar viguetas de latas de bambú unidas con tornillos comerciales para su uso en entresijos y cubiertas.

3.2. Objetivos específicos

1. Establecer los procedimientos constructivos para la fabricación de viguetas de latas de bambú ensambladas con tornillos comerciales.
2. Evaluar el comportamiento mecánico a flexión de los diseños propuestos.
3. Presentar recomendaciones para el diseño y uso de las viguetas.

4. FASE I: PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO

En esta fase se desarrolló el proceso exploratorio orientado a establecer la viabilidad constructiva. Para ello, se definieron los materiales, se evaluaron distintas alternativas de conexión y se aplicaron criterios técnicos para seleccionar las configuraciones más adecuadas. Adicionalmente, se realizaron pruebas piloto de flexión con el fin de validar el montaje experimental y ajustar los parámetros necesarios antes de iniciar la evaluación mecánica definitiva.

4.1. Selección de los materiales

4.1.1. Bambú

La especie utilizada fue *Guadua angustifolia* Kunth, una de las más representativas de América junto con *Guadua amplexifolia* y *Guadua weber-baueri*. Pertenece a la familia Poaceae, subfamilia Bambusoideae, y al género *Guadua*, que reúne unas 30 especies. Es la guadua más abundante en Colombia y Ecuador, reconocida por su versatilidad y amplio uso en construcción [27]. Su clasificación taxonómica se presenta en la Tabla 1, conforme al Código Internacional de Nomenclatura Botánica [28].

Tabla 1. Taxonomía de la guadua [28].

División	Espermatofitas
Subdivisión	Angiospermas
Orden	Glumiflorales
Clase	Monocotiledónea
Familia	Poaceae-Gramínea
Subfamilia	Bambusoideae
Supertribu	Bambusodae
Tribu	Bambuseae
Subtribu	Guadinae
Género	<i>Guadua</i>
Especie	<i>Angustifolia Kunth</i>
Variedad	Bicolor
Forma	Castilla, Cebolla, Macana, Cotuda, Rayada
Nombre Científico	<i>Guadua angustifolia Kunth</i>

La guadua utilizada en la investigación provino del Eje Cafetero (Colombia), con edades entre 3 y 5 años. Los culmos fueron cortados, inmunizados y secados conforme a la norma ISO-22157 [29].

La guadua presenta características geométricas específicas y es un material anisotrópico, cuyas propiedades mecánicas varían según la dirección. Se divide en cinco partes principales (Figura 2) [30]:

- **Cepa:** segmento inicial desde el suelo hasta ~3 m de altura.
- **Basa:** segundo segmento, de 4 a 8 m, considerado el de mayor valor comercial.
- **Sobrebasa:** tercer segmento, usado como tacos u otros elementos de construcción.
- **Varillón:** último segmento comercial del culmo.
- **Copa:** parte final, con longitudes de hasta 3 m.

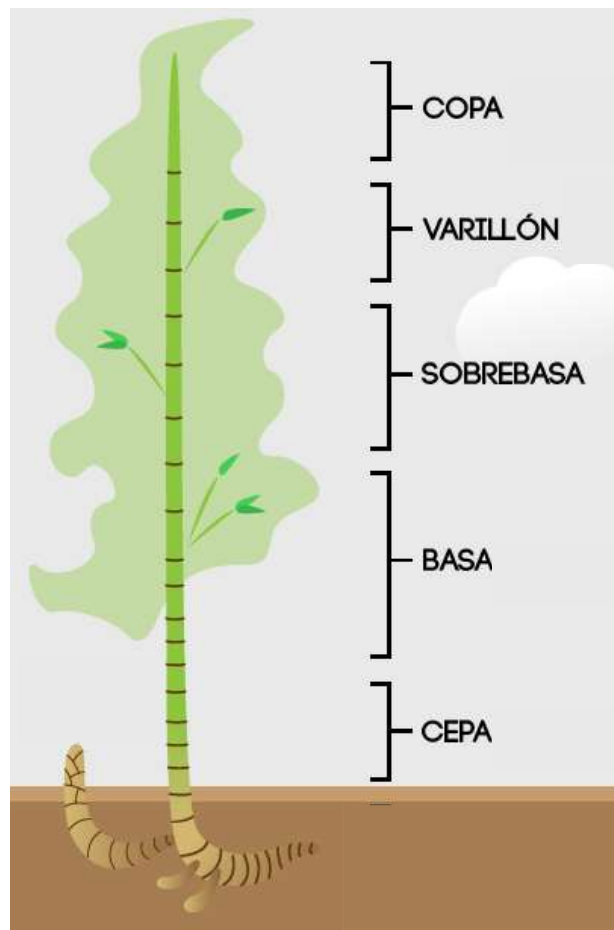


Figura 2. Partes de la guadua.

(Tomado de <https://guaduabambucolombia.co/guadua-inmunizada-2/>)

4.1.2. Tornillería

Se evaluaron tres tipos de tornillos (Figura 3 y Tabla 2). En la configuración propuesta, no aportan resistencia estructural individual significativa, pero aseguran la cohesión y estabilidad del conjunto. El desempeño global depende del comportamiento de las conexiones, en especial de su rigidez y ductilidad.

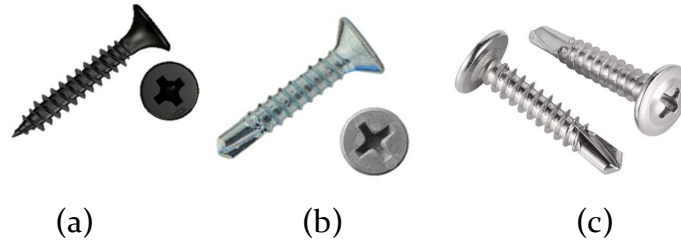


Figura 3. Tornillos: (a) Drywall, (b) Drywall punta broca y (c) Cabeza plana punta broca.

Tabla 2. Especificaciones de la tornillería.

		Tornillo a	Tornillo b	Tornillo c
Dimensiones	Dimensiones	8 x 3/4"	6 x 3/4"	8 x 3/4"
	Diámetro	4 mm		
	Longitud	19 mm		
Especificaciones	Material	Acero		
	Uso	Madera/aglomerado	Placas de yeso	Placas de yeso
	Tipo de tornillo	Autoperforante	Roscalata	Roscalata
	Tipo de cabeza	Trompeta		
Características		Punta Aguda, Pavonado, Rosca Ordinaria	Punta Broca, Zincado, Hilo Fino	Punta Broca, Zincado, Hilo Fino

A partir de esta tornillería se definieron cinco tipos de conexiones (Figura 4). Se evaluaron mediante pruebas cualitativas, uniendo pares de latas de guadua de 40 × 40 × 10 mm con tornillos sin pre-taladrado (Figura 5). Se realizaron cinco ensayos por cada tipo de conexión y se seleccionaron las dos más viables para la construcción de las viguetas.

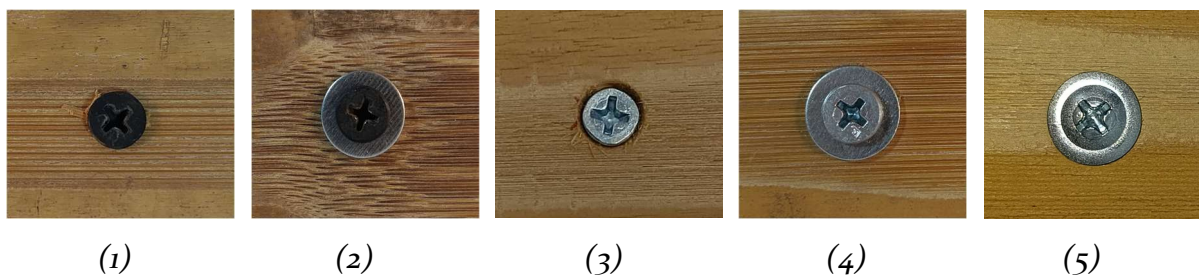


Figura 4. Tipos de conexiones.

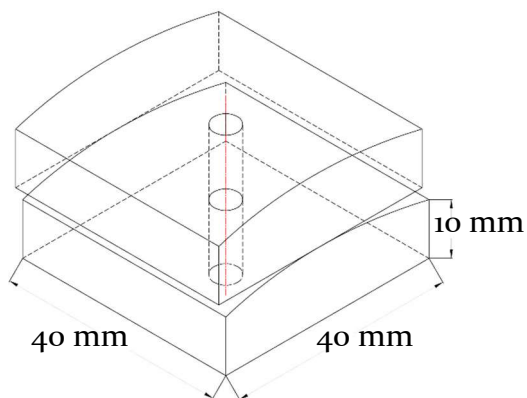


Figura 5. Lata para determinación de procedimientos previos.

Según las pruebas, la Tabla 3 indica cuándo es necesario perforar para proteger el bambú y asegurar la durabilidad de las conexiones.

Tabla 3. Resultados preliminares conexiones.

Conexión	Resultado	Recomendación
1. Tornillo Drywall	Desempeño insatisfactorio; la rosca giró libremente y se formó una grieta longitudinal.	Realizar perforación transversal y avellanar.
2. Tornillo Drywall + Arandela	Desempeño deficiente; la rosca giró libremente tras el ajuste generado por el atornillado.	Perforar transversalmente.
3. Tornillo Drywall Punta Broca	Desempeño satisfactorio; mantuvo las latas firmemente unidas, aunque se formaron grietas longitudinales.	Realizar avellanado previo.
4. Tornillo Drywall Punta Broca + Arandela	Buen desempeño; evitó fisuras por la cuña generada al usar la arandela.	No realizar perforación.
5. Tornillo cabeza plana punta broca (arandela integrada)	Comportamiento eficiente, comparable al de la conexión anterior.	No realizar perforación.

Pruebas complementarias de conexiones

Se realizaron cinco pruebas adicionales por cada tipo de conexión, aplicando las recomendaciones de la Tabla 3. El procedimiento constructivo se describe a continuación; las herramientas empleadas se detallan en secciones posteriores:

- a. **Extracción, cepillado y segmentación de latas de bambú:** Se extrajeron las latas de culmos seleccionados, se cepillaron sus caras interna y externa para regularizar las superficies sin afectar la capa externa de mayor densidad de fibras, garantizando un espesor mínimo de 10 mm, y se segmentaron en piezas de 40 × 40 × 10 mm.
- b. **Sujeción y marcado:** Cada par de latas se fijó a un marco rígido para evitar movimientos durante la perforación y se marcó el punto central de la superficie de la lata (Figura 6).
- c. **Perforación transversal¹ (conexiones 1 y 2):** Se realiza una perforación transversal pasante en las latas utilizando una broca de 2.4 mm (3/32").
- d. **Avellanado² (conexiones 1 y 3):** Se realizó un avellanado en la lata superior para alojar la cabeza del tornillo a ras de la capa externa del bambú, evitando que sobresaliera y generara efecto de cuña (Figura 7).
- e. **Atornillado:** Empleando un taladro se insertó el tornillo en la perforación, asegurando un ajuste firme. Se utilizó un torque controlado para evitar la fractura de las fibras internas del bambú y garantizar la integridad de la unión (Figura 8).



Figura 6. Sujeción y marcado.

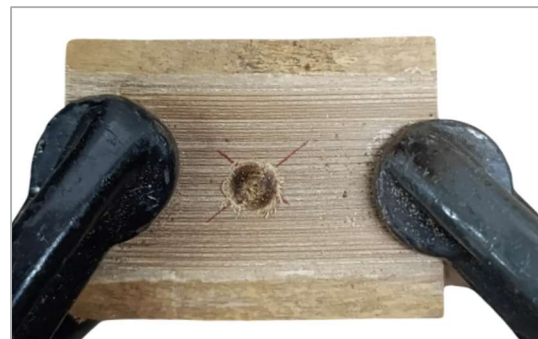


Figura 7. Avellanado.

¹ **Perforación transversal:** se refiere a la realización de un agujero mediante una broca, previamente a la instalación del tornillo.

² **Avellanado:** Se refiere al proceso de desgaste superficial controlado que tiene como fin "ocultar" la cabeza del tornillo.



Figura 8. Atornillado.

Las conexiones 1, 3 y 5 resultaron las más favorables, con fallas en solo el 20 % de las muestras. En cambio, las conexiones 2 y 4 fallaron en el 40 %, afectando la integridad del bambú y la unión tornillo–lata, por lo que fueron descartadas. En adelante, las conexiones 1, 3 y 5 se denominarán conexiones 1, 2 y 3, respectivamente, ver Figura 9.

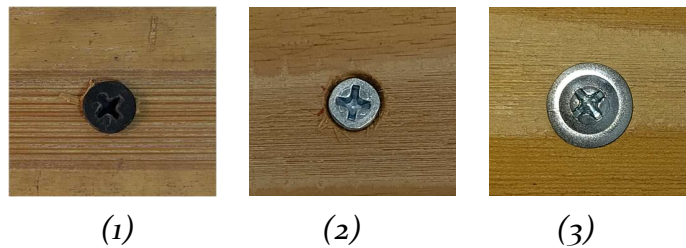


Figura 9. Tipos de conexiones para encuesta a expertos.

Análisis multicriterio para selección de conexiones

Para descartar una conexión adicional se aplicó una encuesta a cinco expertos, utilizando el Proceso Analítico Jerárquico (AHP) [31], que prioriza alternativas mediante comparaciones por pares. La metodología de *Saaty* (Tabla 4) permitió integrar juicios subjetivos y evaluar la consistencia de las decisiones, reduciendo la incertidumbre en la selección de las dos conexiones finales.

Se definieron cinco criterios: facilidad de instalación, integridad del bambú, superposición tornillo–lata, costo de tornillería y costo de instalación. Estos se relacionaron con tres alternativas de conexión (Figura 10), base para aplicar el AHP y obtener las prioridades resumidas en la Tabla 4.

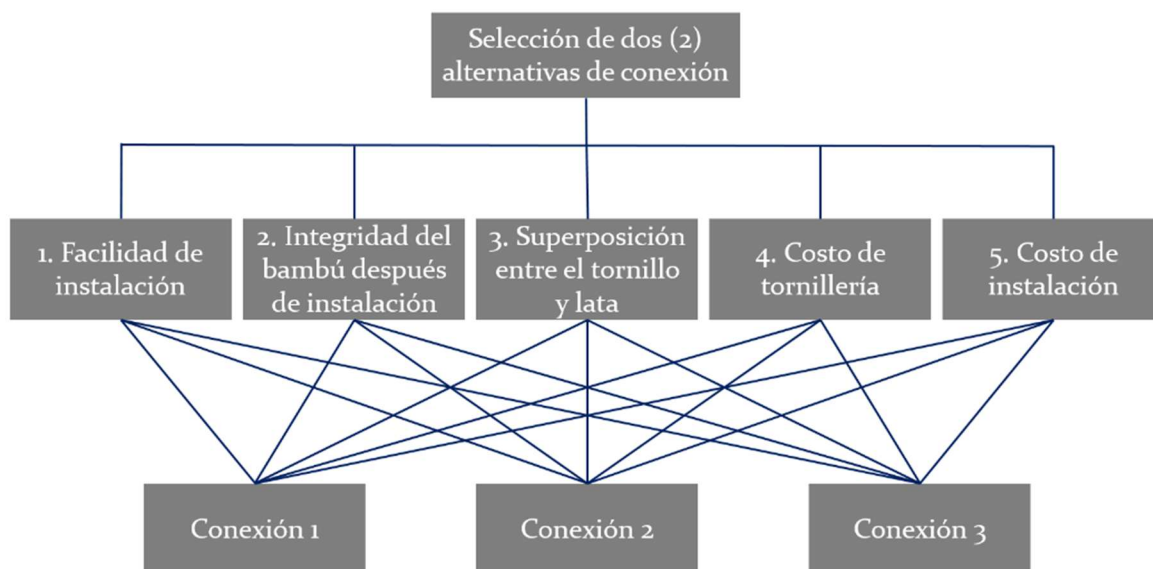


Figura 10. Estructura jerárquica encuesta.

Tabla 4. Escala de juicio [31].

Escala numérica	Escala verbal	Descripción
1	Igual importancia.	Los dos elementos contribuyen igualmente a la propiedad o criterio.
3	El elemento es moderadamente más importante respecto al otro.	El juicio y la experiencia previa favorecen a un elemento frente al otro.
5	El elemento es fuertemente más importante respecto al otro.	El juicio y la experiencia previa favorecen fuertemente a un elemento frente al otro.
7	La importancia del elemento es muy fuerte respecto al otro.	Un elemento domina fuertemente.
9	La importancia del elemento es extrema respecto al otro.	Un elemento domina al otro con el mayor orden de magnitud posible.
2, 4, 6, 8	Valores intermedios entre dos juicios adyacentes.	
Inversos 1/2, 1/3, 1/4, 1/5, 1/6, 1/7, 1/8, 1/9	Se utiliza cuando el segundo elemento es mayor en el criterio a comparar.	

- Índice de consistencia [31]:

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (1)$$

- Índice aleatorio (IA) [31]:

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
IA	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49	1.51	1.54

Donde n representa el tamaño de la matriz.

- Razón de consistencia (según Saaty) [31]:

$$CR = \frac{CI}{IA} \quad (2)$$

La razón de consistencia no superó en ningún caso el valor aceptable de 0.10, lo que indica que los expertos evaluaron de manera lógica y que la priorización de criterios y alternativas es sólida y puede aceptarse como base para la selección final.

Tabla 5. Resultados de importancia de criterios, según evaluación de 5 expertos.

Criterio		Importancia
C1	Facilidad de instalación	 17.75%
C2	Integridad del bambú después de instalación	 51.60%
C3	Superposición entre el tornillo y lata	 13.21%
C4	Costo de tornillería	 8.34%
C5	Costo de instalación	 9.10%

Los resultados de la Tabla 5 ubican los criterios en el siguiente orden de importancia: integridad del bambú (C2), facilidad de instalación (C1), superposición tornillo-lata (C3), costo de instalación (C5) y costo de tornillería (C4).

Tabla 6. Resultados alternativas de conexión, según evaluación de 5 expertos.

Alternativa		Viabilidad
A1		46.11%
A2		22.22%
A3		31.66%

Con base en estos resultados, se seleccionaron las conexiones A1 y A3, que superaron a la A2 en 23.89 % y 14.45 %, respectivamente (Tabla 6).

4.2. Caracterización mecánica del material

4.2.1. Bambú (*Guadua angustifolia* Kunth)

Para la caracterización mecánica de la Guadua se sometieron a flexión pura 41 probetas, en 35 de las cuales se aplicó la carga en dirección tangencial mientras que en las 6 restantes se aplicó en la dirección radial. Sus dimensiones nominales fueron de 260 mm de longitud, con secciones de 10 × 12 mm dispuestas según la orientación de la carga, como se muestra en la Figura 11.

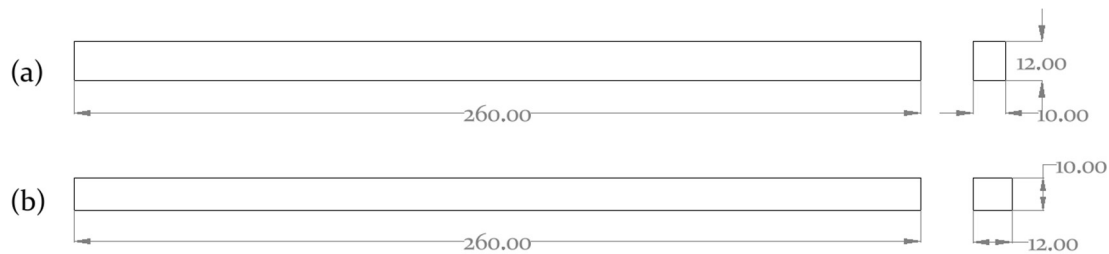


Figura 11. Dimensiones de las probetas: (a) Dirección tangencial y (b) Dirección radial. (dimensiones en milímetros)

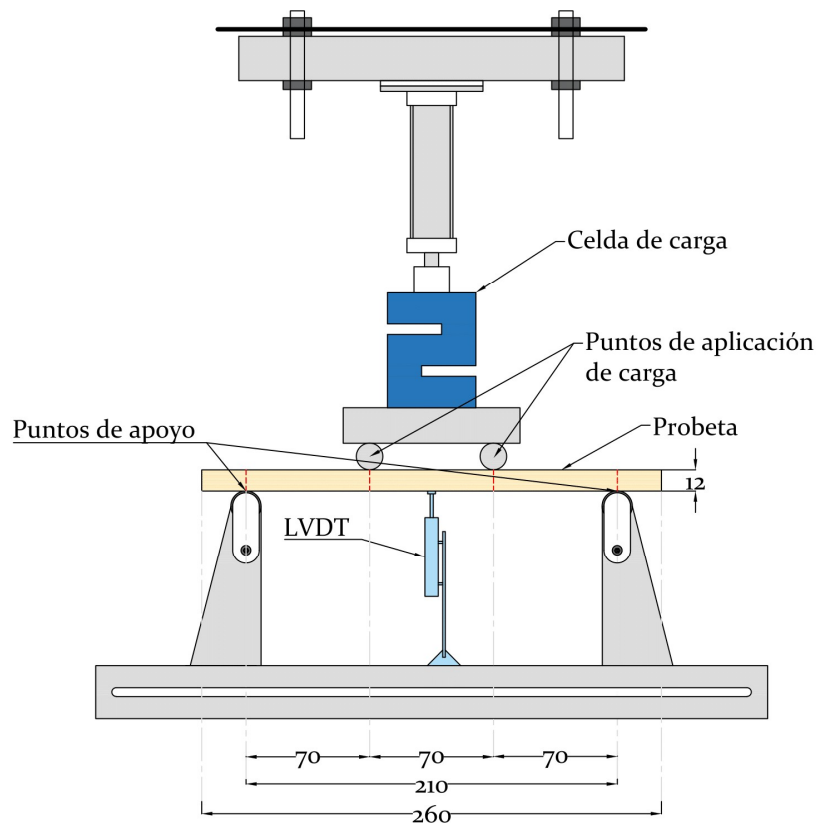


Figura 12. Montaje experimental (dimensiones en mm).

Se utilizó una velocidad de carga de 3 mm/min, definida en ensayos preliminares, para garantizar que la carga máxima soportada ocurriera en un mínimo de 4 min, conforme a la norma ASTM D198-15 [32]. Se empleó una celda de carga *OP-312-10 3 klb S-Beam Load Cell* [33]. El montaje de experimental se presenta en la Figura 12. Con esta configuración se determinaron el módulo de elasticidad (**MOE**) y el módulo de rotura (**MOR**), mediante las ecuaciones (3) y (4):

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

$$MOR = \frac{P_{m\acute{a}x}l}{bd^2} \quad (4)$$

donde $P_{40\%}$ y $P_{10\%}$ corresponden al 40 % y 10 % de la carga máxima registrada; $P_{m\acute{a}x}$ es la carga máxima; l es la luz entre apoyos (210 mm); b y d son el ancho y la altura de la probeta (10 o 12 mm, según orientación de la prueba); y $\Delta_{40\%}$ y $\Delta_{10\%}$ son las deflexiones centrales al 40% y 10% de la carga máxima.

Las pruebas se realizaron con una humedad promedio de 15.25% (CV = 5.7 %), medida en las 41 probetas con un higrómetro compacto Extech MO50 [34], bajo una humedad relativa ambiental de ~67 %.

El análisis comparativo mostró que el MOE fue mayor en la dirección tangencial, mientras que el MOR resultó superior en la radial. Los coeficientes de variación fueron bajos, lo que refleja consistencia en los resultados; la diferencia en el MOE es significativa, mientras que en el MOR la mayor dispersión limita esa conclusión (Tabla 7).

Tabla 7. Resultados ensayos de flexión a 4 puntos, 41 especímenes.

Propiedad	Dirección	
	Tangencial (35 especímenes)	Radial (6 especímenes)
MOE	16.1 GPa (CV=11.9%)	13.2 GPa (CV=10.6%)
MOR	98.4 MPa (CV=12.1%)	110.3 MPa (CV=20.1%)

Además de la considerable rigidez, las probetas mostraron una respuesta dúctil (Figura 13), lo que evidencia un comportamiento predecible y consistente. Los valores reportados se calcularon con las dimensiones reales medidas en cada probeta, y no con las nominales (10×12 mm), para garantizar mayor precisión en la determinación de las propiedades mecánicas.

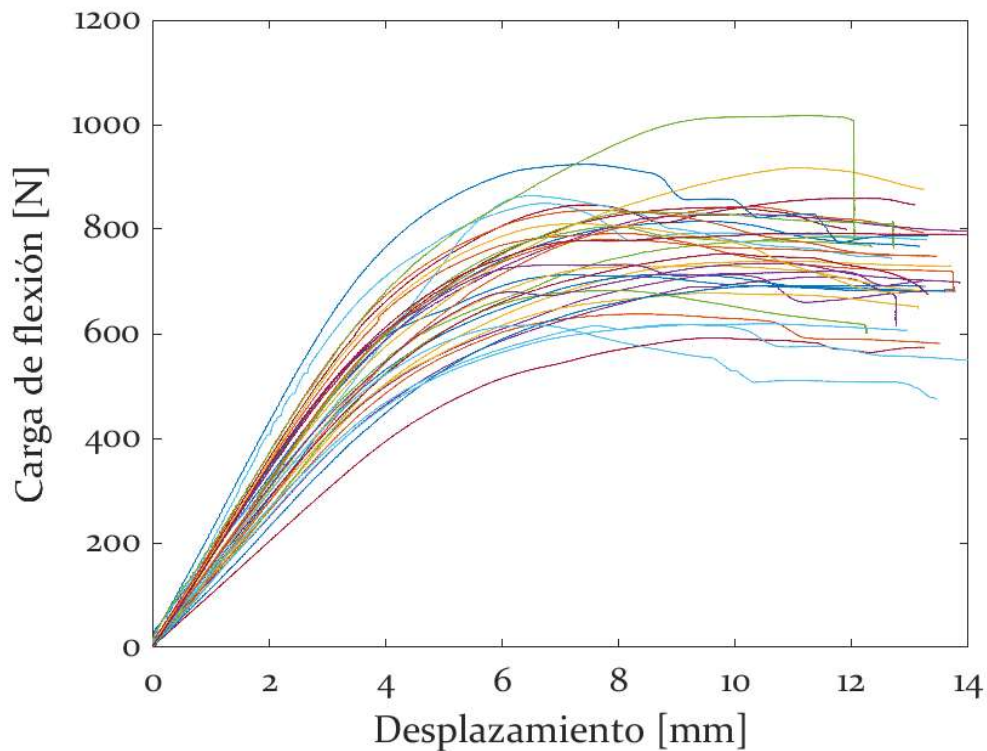


Figura 13. Curvas carga - desplazamiento pruebas de flexión tangencial de 35 especímenes.

El análisis estadístico determinó que el MOE sigue una distribución normal, verificada mediante las pruebas de Shapiro-Wilk [35] y Anderson-Darling [36] (Figura 14), mientras que el análisis estadístico del MOR validado con la prueba de Kolmogorov-Smirnov [37], indicó que una distribución Gamma ajusta bien los datos, como se muestra en la Figura 15. La identificación del modelo estadístico más apropiado para describir la variabilidad del material garantiza la validez de los análisis posteriores.

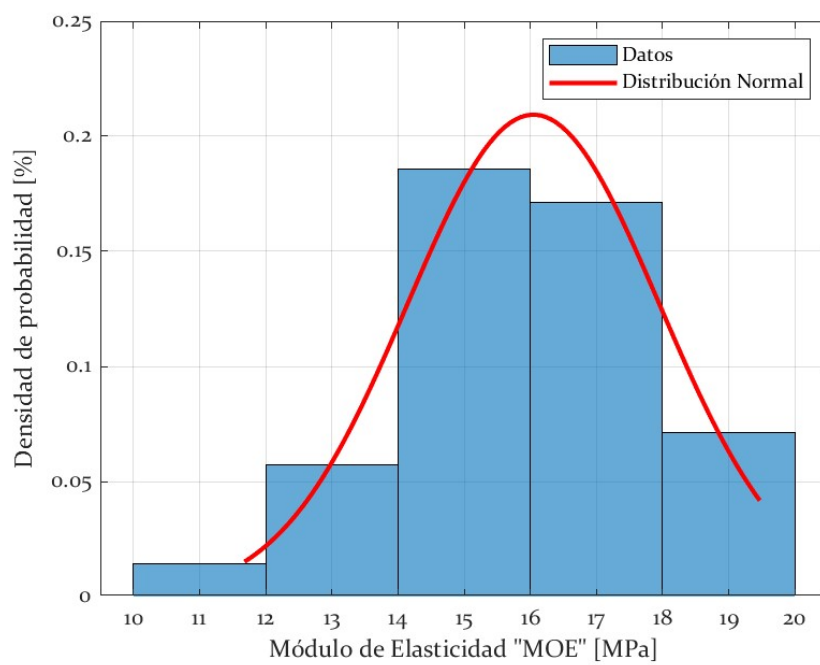


Figura 14. Distribución normal del MOE.

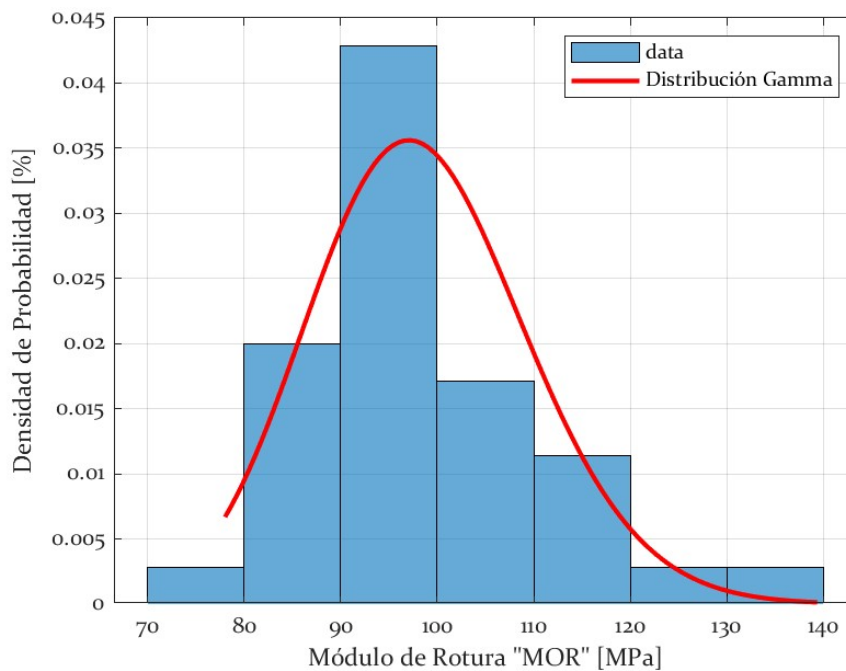


Figura 15. Distribución gamma del MOR.

4.2.2. Tornillería

A partir del análisis multicriterio AHP se seleccionaron dos tornillos marca Fixser: drywall $8 \times 3/4"$ punta aguda y otro de cabeza plana $8 \times 3/4"$ punta aguda. Ambos están fabricados en acero al carbono, con diámetro nominal de 4.2 mm (calibre #8), longitud de 19 mm ($3/4"$) y recubrimientos protectores: pavonado para el primero y zincado electrolítico para el segundo. Las pruebas de cortante se realizaron con el montaje mostrado en la Figura 16.

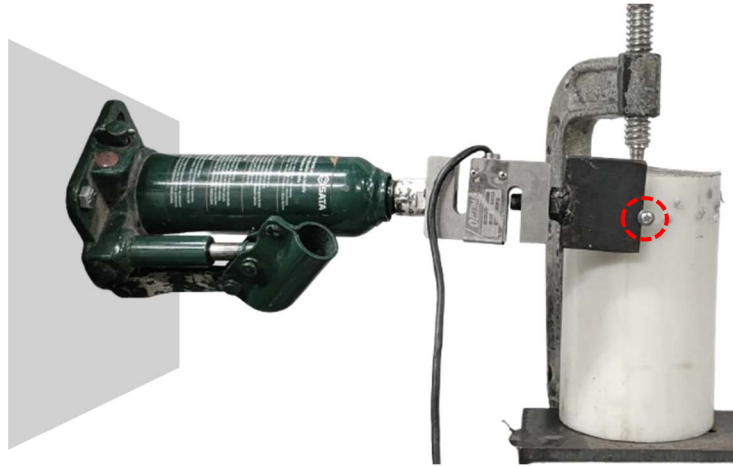


Figura 16. Montaje experimental para ensayo de cortante pura en tornillos.

- **Tornillos drywall $8 \times 3/4"$:** Se ensayaron 15 tornillos, obteniéndose una carga promedio de 1141 N (CV = 16.6 %) y una carga máxima absoluta de 1610 N (Figura 17). Con un diámetro de raíz $d = 3$ mm y un área de 7.07 mm^2 , la resistencia promedio al cortante fue de 161 MPa.

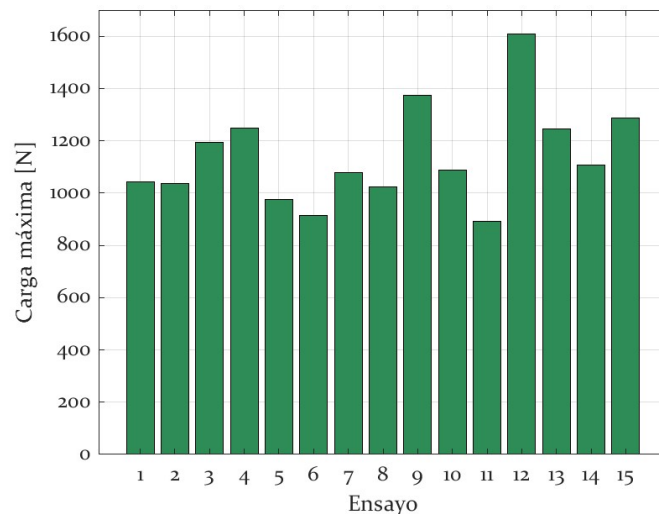


Figura 17. Carga máxima por ensayo tornillos drywall.

- **Tornillos cabeza plana 8 × 3/4"**: Se ensayaron 15 tornillos, obteniéndose una carga promedio de 1254 N (CV = 12.8 %) y una carga máxima absoluta de 1488 N (Figura 18). Con un diámetro de raíz $d = 3 \text{ mm}$ y un área de 7.07 mm^2 , la resistencia promedio al cortante fue de 177 MPa.

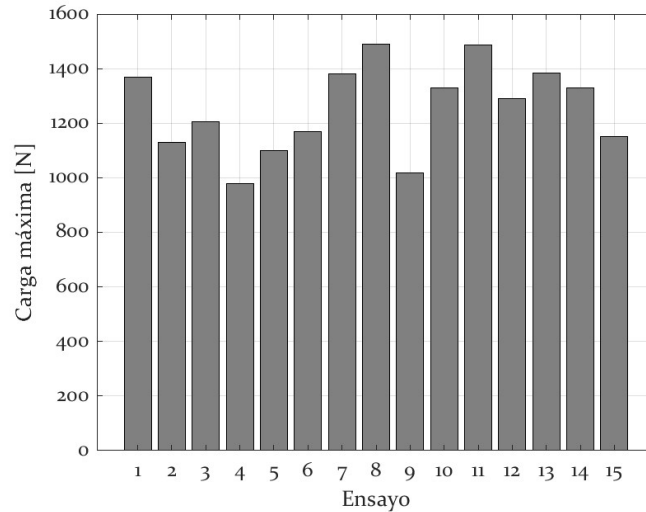


Figura 18. Carga máxima por ensayo tornillos cabeza plana.

Análisis comparativo y distribución estadística

Los ensayos de cortante pura evidenciaron que no existen diferencias estadísticamente significativas entre los dos tipos de tornillos (Figura 19). La falla típica se muestra en la Figura 20.

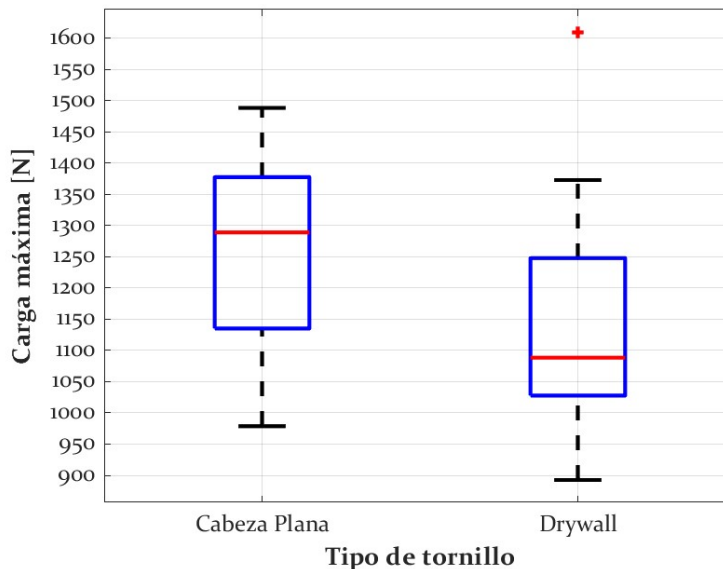


Figura 19. Boxplot de carga máxima en cortante para los 2 tipos de tornillos.



Figura 20. Falla típica a cortante tornillos cabeza plana(a) y drywall (b).

4.3. Evaluación numérica del espaciamiento entre tornillos

Se desarrollaron modelos computacionales en *Ansys* considerando el patrón de atornillado, basado en la técnica NLT, que consiste en unir pares de latas con tornillos en puntos equidistantes. El proceso inicia con un par de latas (**paso 1**), luego se añade una tercera lata fijada en los puntos medios (**paso 2**), y se repite sucesivamente hasta alcanzar el número requerido (paso 3), como se ilustra en la Figura 21.

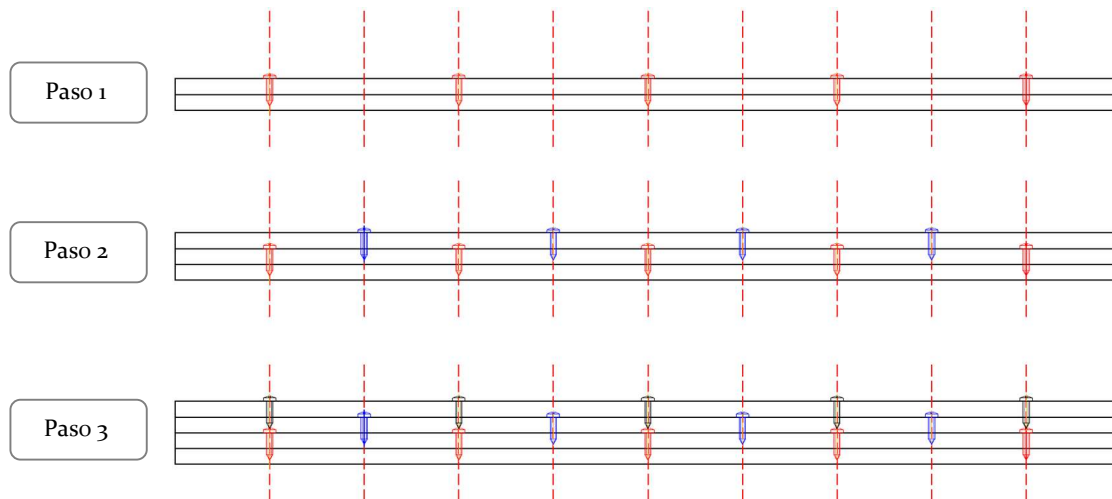


Figura 21. Patrón de atornillado viguetas.

Los modelos desarrollados, ver Figura 23, consistieron en viguetas compuestas por cuatro latas con una sección transversal de 10×40 mm y una longitud de 1100 mm. Se siguió el patrón de atornillado utilizando separaciones horizontales de **100**, **125**, **166.5** y **250 mm** entre tornillos, siguiendo el patrón de atornillado mostrado en la Figura 22. El objetivo fue determinar el espaciamiento óptimo que asegurara tanto la rigidez como la ductilidad en las

conexiones, considerando el pandeo lateral torsional como un factor clave en el análisis.

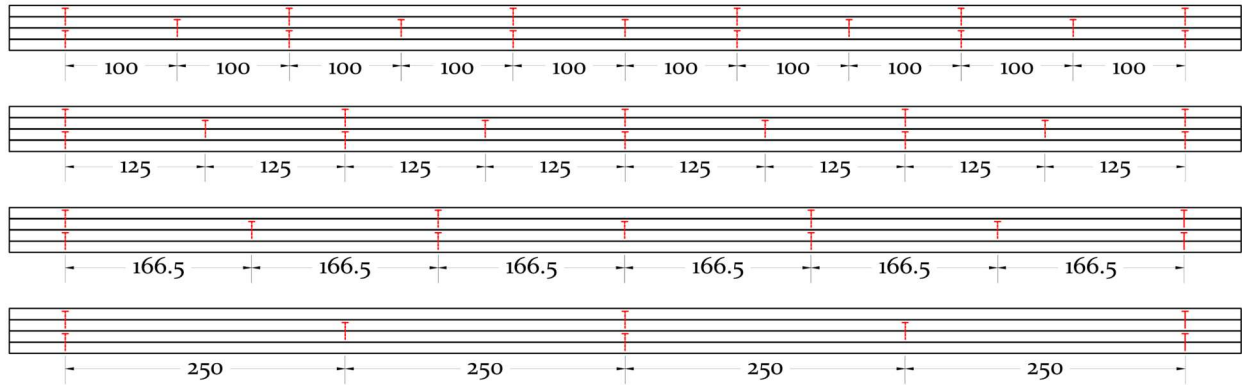


Figura 22. Patrón de atornillado 100, 125, 166.5 y 250 mm.

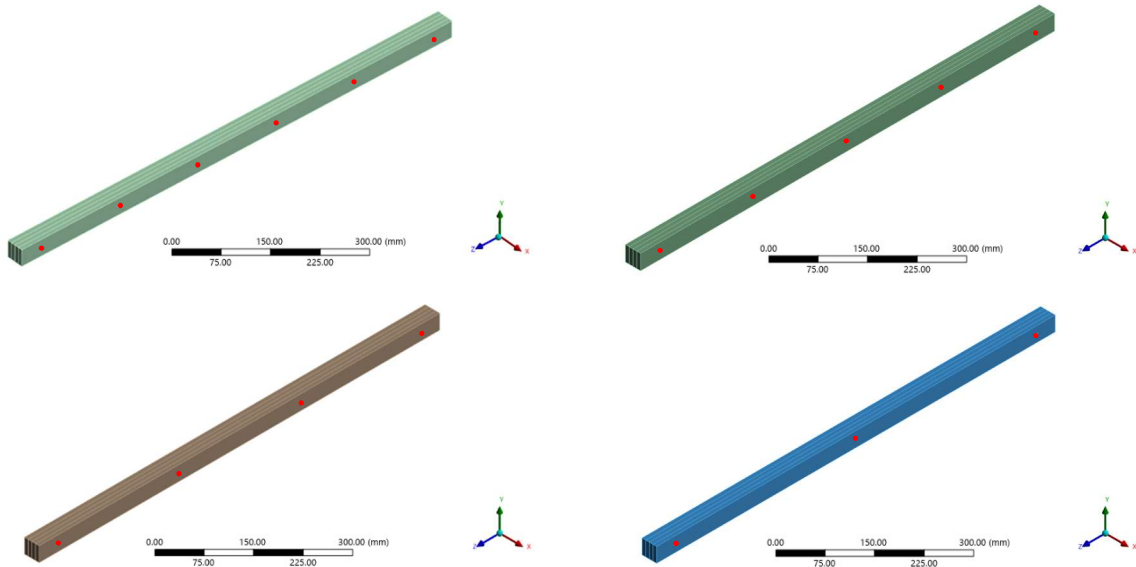


Figura 23. Modelo computacional viguetas 100, 125, 166.5 y 250 mm, respectivamente. (Puntos rojos señalan la ubicación de los tornillos exteriores)

El bambú se modeló como material ortótropo con propiedades de la literatura (Tabla 8) [38] y el módulo de elasticidad tangencial en Z obtenido experimentalmente (Tabla 7). Los tornillos se representaron como acero estructural (Tabla 8) y, para simplificar, como cilindros sólidos sin rosca. Se definieron contactos bambú–bambú con fricción 0.3 y bambú–acero tipo bonded [39], [40]. La malla se generó con elementos hexaédricos de 8 mm.

Tabla 8. Constantes elasto-plásticas usadas en el modelo.
(El eje Z coincide con el sentido longitudinal del elemento)

Bambú	
Young's Modulus X direction [MPa]	860
Young's Modulus Y direction [MPa]	860
Young's Modulus Z direction [MPa]	16 050
Poisson's Ratio XY	0.22
Poisson's Ratio YZ	0.01
Poisson's Ratio XZ	0.01
Shear Modulus XY [MPa]	352
Shear Modulus YZ [MPa]	581
Shear Modulus XZ [MPa]	581
Cilindro sólido (tornillo)	
Young's Modulus [GPa]	200
Poisson's Ratio	0.30
Yield Strength [MPa]	250

La carga crítica se determinó con el módulo de pandeo (Eigen Buckling) [39]. Se aplicaron condiciones de borde de viga simplemente apoyada (Figura 24).

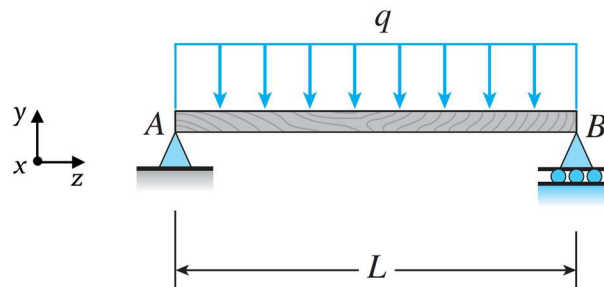


Figura 24. Condiciones de borde, viga simplemente apoyada
(Tomado de: <https://media.cheggcdn.com/media/024/024d1438-d102-4503-9b45-6f1bb8f5197c/php9l5ohd>)

La Tabla 9 muestra que la carga crítica disminuye al aumentar el espaciamiento, reduciéndose 48.8 % al pasar de 125 mm a 250 mm. Los mejores resultados se obtuvieron con 100 y 125 mm, cuya diferencia es mínima (0.16 %). En este caso, se adopta **125 mm** como espaciamiento óptimo, pues ofrece prácticamente la misma capacidad que 100 mm con un menor número de tornillos, facilitando la construcción y reduciendo el costo.

El modo de pandeo corresponde a un deslizamiento vertical entre latas, representativo de pandeo lateral torsional (Figura 25). Para espaciamientos de 100 y 125 mm, el esfuerzo crítico fue de ~ 36 MPa, equivalente al 37 % de la resistencia a rotura, lo que confirma que el modo crítico de falla es el pandeo. Dado que persiste riesgo de pandeo lateral torsional, se recomienda unir las viguetas a un entablado de losa que distribuya cargas y brinde soporte lateral en la zona de compresión.

Tabla 9. Cargas críticas en función del espaciamiento de tornillos.

Espaciamiento [mm]	Carga crítica [N]
100.0	2797.5
125.0	2802.1
166.5	2199.7
250.0	1433.4

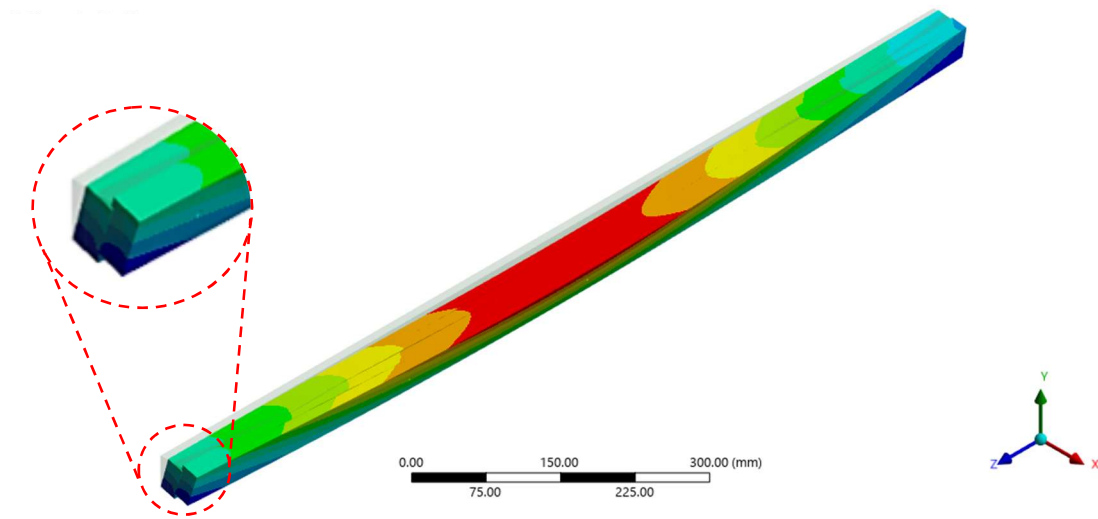


Figura 25. Falla típica de pandeo lateral torsional.

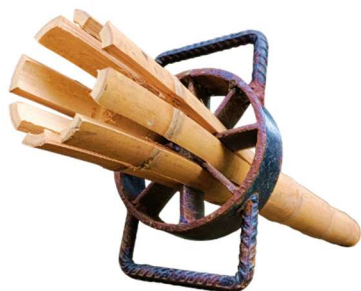
4.4. Procedimiento constructivo

El proceso constructivo de las probetas se desarrolló mediante una secuencia controlada para asegurar uniformidad dimensional, calidad superficial y precisión en las uniones:

- **Paso 1:** Se realizó la división longitudinal de la guadua, obteniendo latas a partir del culmo completo mediante el uso de la herramienta tradicionalmente conocida como “*estrella china*”. De manera complementaria, se empleó el machete, ver Figura 26(a), para realizar cortes iniciales y retirar excesos, facilitando un fraccionamiento simétrico y eficiente del material.
- **Paso 2:** Con la ayuda de la sierra de mesa, se procedió a eliminar los entrenudos presentes en la cara interna de las latas, asegurando una superficie continua y uniforme para facilitar el cepillado posterior y mejorar la adherencia en los puntos de unión, ver Figura 26(b).
- **Paso 3:** Se llevó a cabo el cepillado de ambas caras de las latas. La cara interna fue cepillada hasta alcanzar un espesor aproximado de 11 mm, mientras que la cara externa se redujo 1 mm hasta un espesor de 10 mm. Este proceso garantizó la uniformidad del espesor total de cada elemento y mitiga la pérdida de la capa externa de la guadua, la cual posee la mayor densidad de fibras, ver Figura 26(c).
- **Paso 4:** Las caras laterales de las latas fueron cortadas con sierra de mesa, con el fin de garantizar un ancho constante de 40 mm a lo largo de toda la pieza y obtener un acabado más uniforme, condición fundamental para lograr una correcta alineación y unión entre los elementos.
- **Paso 5:** En las probetas construidas con tornillería drywall, se realizó un avellanado con el fin de alojar adecuadamente la cabeza del tornillo y evitar sobresalientes que interfieran con la geometría o resistencia de las uniones.
- **Paso 6:** Posteriormente, se realizaron las perforaciones correspondientes para facilitar la inserción precisa de los tornillos, siguiendo el patrón de atornillado para todas las probetas.
- **Paso 7:** Las latas fueron ensambladas en pares mediante la aplicación de tornillería previamente definida, garantizando una unión rígida y homogénea entre los elementos.

Paso 1

Extracción de latas con la estrella china.



Paso 2

Remoción los entrenudos de la cara interna de las latas con la sierra de mesa.



Paso 3

Cepillado las caras interna y externa de las latas hasta alcanzar espesores aproximados de 11 y 10 mm, respectivamente.



Paso 4

Corte de las caras laterales con la sierra de mesa, para garantizar un ancho uniforme de 40 mm.



Paso 5

Avellanado en puntos de unión (solo para tornillo drywall).



Paso 6

Perforación para inserción de la tornillería.



Paso 7

Atornillado entre pares de latas.



Paso 8

Conformación de las probetas.



- **Paso 8:** Finalmente, se conformaron las probetas completas a partir del ensamblaje de los pares de latas, cumpliendo con el número de latas establecidas para cada probeta.



(a)



(b)



(c)

Figura 26. Proceso de corte de excesos, extracción de entrenudos y cepillado de latas.

4.5. Ensayos preliminares de flexión de viguetas

4.5.1. Métodos

Con el fin de evaluar el montaje y definir la configuración óptima del programa experimental, se realizaron ensayos piloto de flexión en cuatro puntos con una luz de 1500 mm. Los datos se adquirieron con el software SensorConnect y el nodo inalámbrico V-Link previamente empleado.

Se ejecutaron tres pruebas piloto con diferentes configuraciones: Vigueta Tornillo Cabeza Plana de 4 latas (VTP4), Vigueta Tornillo Drywall de 4 latas (VTD4) y Vigueta Tornillo Cabeza Plana de 8 latas (VTP8). Las siglas corresponden a: VT = vigueta, D o P = tipo de tornillo (Drywall o Cabeza Plana), y 4 u 8 = número de latas de la probeta.

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 LVDT⁴ y un sensor de desplazamiento por hilo⁴. La carga se aplicó en dos puntos separados 500 mm mediante un elemento específico⁵, con apoyos

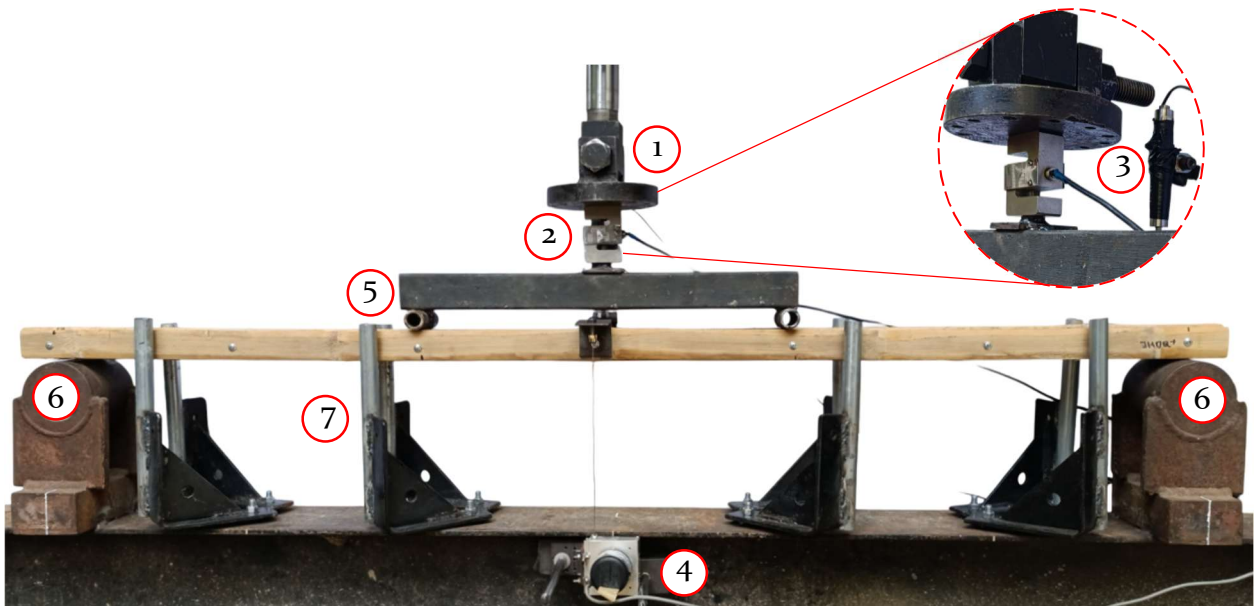


Figura 27. Montaje experimental.

^{1, 2, 3, 4, 5, 6 y 7} Observar numeración de la Figura 27.

inferiores⁶ soldados a un perfil metálico. Además, se instalaron ocho restricciones laterales⁷ en los tercios extremos de las probetas para reducir el pandeo lateral. Las piezas construidas para el montaje experimental se detallan en el Anexo 1.

4.5.2. Resultados

En los ensayos piloto, la vigueta VTP₄ alcanzó una carga máxima de 3299 N, un 23.5 % superior a la de VTD₄ (2671 N), mientras que la configuración VTP₈ llegó a 4337 N, es decir, un 31.5 % más que VTP₄ (Tabla 10).

Tabla 10. Resultados carga máxima pruebas piloto.

Espécimen	Carga Máxima [N]
VTP ₄	3299
VTD ₄	2671
VTP ₈	4338

Las curvas carga-deflexión (Figura 28) muestran pendientes iniciales consistentes en las probetas de cuatro latas, lo que confirma una rigidez reproducible y controlada por el tipo de tornillo. Se presentan las configuraciones VTP₄, VTD₄ y VTP₈.

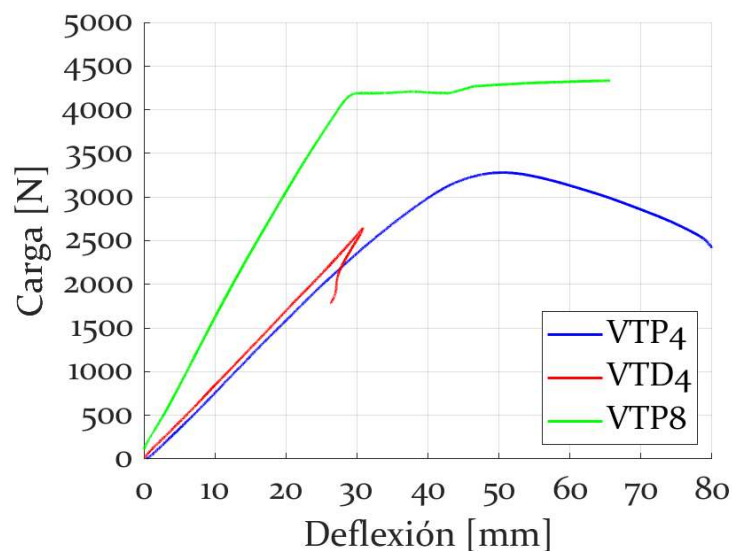


Figura 28. Curva carga-deflexión VTP₄, VTD₄ y VTP₈.

Momento de inercia teórico (I_{teo}) y efectivo (I_{ef})

El momento de inercia efectivo se calculó a partir de la primera etapa de las curvas carga-deflexión, al 40 % de la carga máxima, y se comparó con el valor teórico.

$$I_{ef} = \frac{P \cdot L_a}{48 \cdot E \cdot \delta_{m\acute{a}x}} (3L^2 - 4L_a^2) \quad (5)$$

$$I_{teo} = \frac{bh^3}{12} \quad (6)$$

Donde, P : carga en el rango elástico, L_a : distancia desde el apoyo al punto de aplicación de la carga, L : Longitud total del vano, E : Módulo de elasticidad del bambú (16050 MPa), y $\delta_{m\acute{a}x}$: deflexión máxima correspondiente a la carga.

El I_{ef} resultó superior al I_{teo} en todos los especímenes, con incrementos entre 38% y 48% (Tabla 11). Esto sugiere que la rigidez real supera la estimada analíticamente, debido a la acción compuesta de las latas unidas por tornillos, la fricción en las interfaces y el efecto de las restricciones laterales.

Tabla 11. Momento de inercia teórico y efectivo.

Especímen	I_{teo} [$\times 10^5 \text{ mm}^4$]	I_{ef} [$\times 10^5 \text{ mm}^4$]	I_{ef}/I_{teo}
VTP4	2.13	2.95	1.38
VTD4		3.15	1.48
VTP8	4.26	6.03	1.42

Los ensayos se detuvieron al evidenciarse pandeo lateral significativo y reducción de la capacidad de carga, sin que el material alcanzara su falla dentro de los niveles de esfuerzo aplicados. En la vigueta VTP4 (Figura 29) el pandeo se concentró en el tercio medio, comportamiento también observado en los especímenes VTD4 y VTP8 (Figuras 30 y 31).

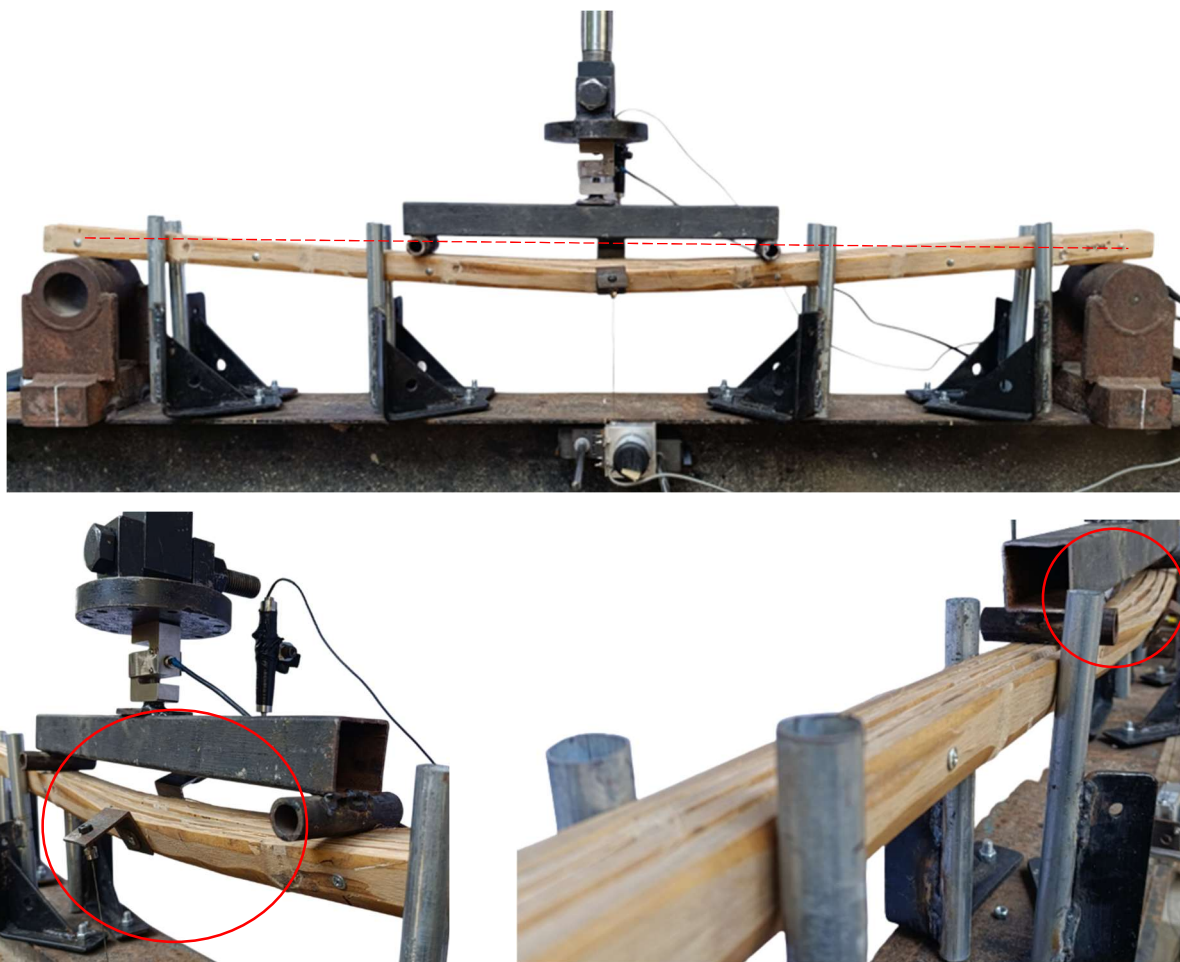


Figura 29. Prueba espécimen VTP4.

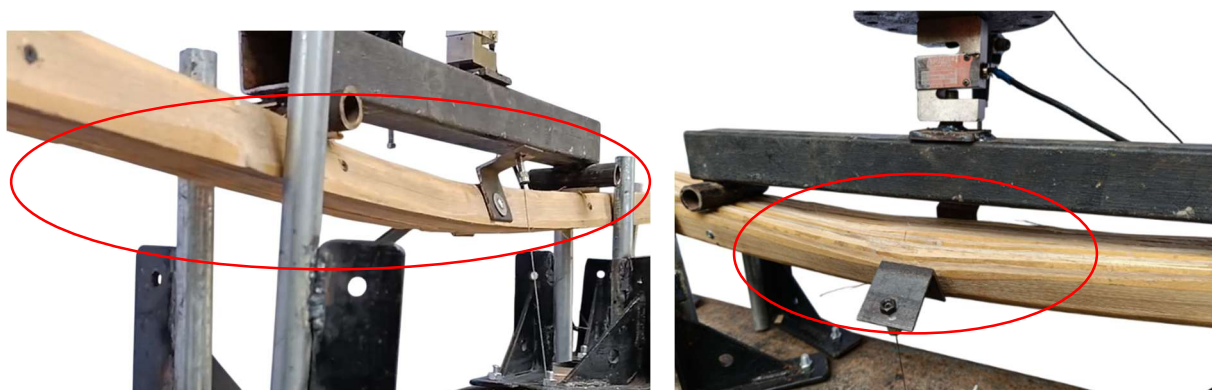


Figura 30. Prueba espécimen VTP8.

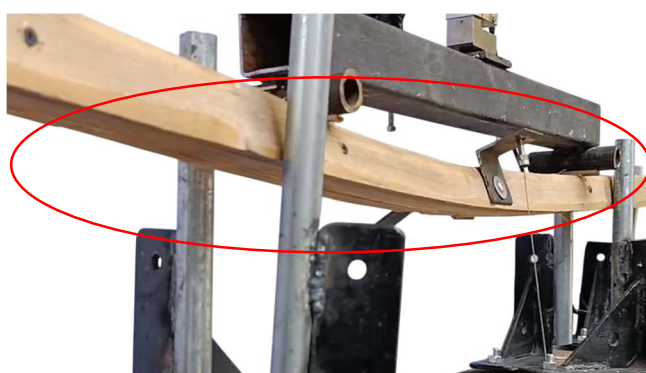


Figura 31. Prueba espécimen VTD4.

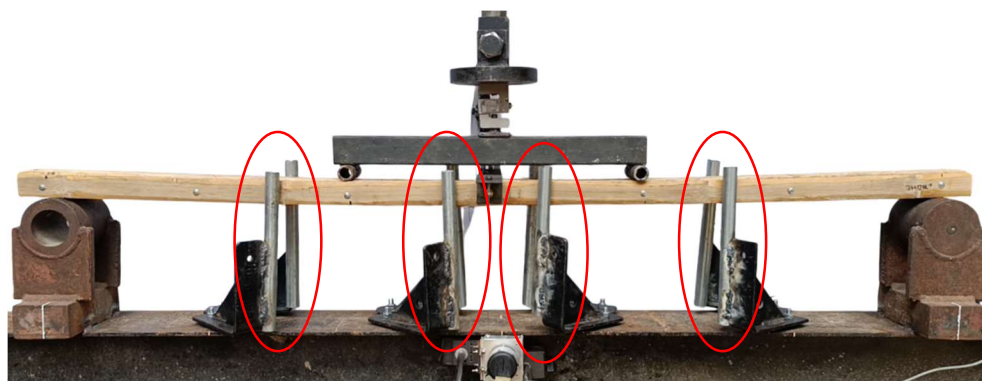


Figura 32. Variación del montaje experimental.

Dado que las probetas recuperaron su forma tras la descarga, se efectuó una cuarta prueba con el espécimen VTP8, concentrando las restricciones laterales en el tercio central y cerca de los puntos de carga (Figura 32). Se alcanzó una carga de 4426 N, con falla en la zona de compresión, lo que representó un aumento del 2.04 % respecto a la prueba anterior.

4.5.3. Discusión

El aumento en el número de latas mejoró la rigidez y resistencia de las viguetas; no obstante, el pandeo lateral-torsional limitó su desempeño antes de alcanzar la capacidad última en flexión. Este fenómeno se concentró en el tercio central, coincidente con el máximo momento flector, por lo que se recomienda incorporar arriostramientos laterales en esta zona.

Con las restricciones ajustadas en la cuarta prueba, la capacidad llegó a 4426 N, con falla por inestabilidad lateral en compresión más que por flexión pura. La reducción observada estuvo dominada por la interacción entre flexión e inestabilidad lateral.

Los ensayos preliminares permitieron validar el montaje, lo que constituyó la base para el programa experimental principal descrito en el Capítulo 5.

5. FASE II: EVALUACIÓN MECÁNICA

Con el procedimiento constructivo definido en la fase anterior, esta etapa se centró en la evaluación del desempeño estructural de las viguetas. Para ello se aplicó un programa experimental orientado a obtener resultados comparativos entre las diferentes configuraciones. Los ensayos permitieron identificar el efecto del tipo de tornillo y del número de latas en el comportamiento global, estableciendo la base para formular lineamientos de diseño.

5.1. Programa experimental

El programa experimental constituyó la fase principal de ensayos, orientada a evaluar el comportamiento estructural de las viguetas y determinar su capacidad a flexión en diferentes configuraciones. Se fabricaron 20 especímenes distribuidos en cuatro series, cuyas características se resumen en la Tabla 12.

Tabla 12. Configuración geométrica y tipo de conexión de los especímenes ensayados.

Especímen	Ancho (mm)	Alto (mm)	Largo (mm)	Cantidad de latas	Tipo de tornillo	Cantidad total de tornillos
VTD4	40	40	1600	4	Drywall	20
VTP4	40	40	1600	4	C. Plana	20
VTD8	80	40	1600	8	Drywall	46
VTP8	80	40	1600	8	C. Plana	46

Las probetas se construyeron según el procedimiento descrito en el apartado 4.4. Con una longitud total de 1.60 m, se dispuso una luz libre de 1.50 m entre apoyos. El patrón de atornillado fue uniforme: separación de 125 mm entre tornillos y 50 mm al borde.

5.2. Prueba de flexión de muestras

Se ensayaron las cuatro configuraciones de vigueta, siguiendo empleando el montaje descrito en 4.5. Las pruebas de flexión a cuatro puntos se realizaron con un LVDT en $L/2$ y celda de carga calibrada, registrando en tiempo real la relación $P-\delta$. Antes de cada ensayo se verificó la nivelación de apoyos y la integridad del montaje para asegurar uniformidad entre configuraciones.

5.3. Resultados de los ensayos

Los ensayos de flexión en cuatro puntos permitieron comparar el efecto del tipo de tornillo y del número de latas sobre el comportamiento estructural de las viguetas (Tabla 13, Figuras 34-37). El registro fotográfico completo de las pruebas se presenta en el Anexo 2.

Tabla 13. Resumen de resultados experimentales y cálculo de inercias.

Grupo	Espécimen	$P_{\text{máx}}$ [N]	$\delta_{\text{máx}}$ [mm]	I_{ef} [$\times 10^5 \text{ mm}^4$]	I_{teo} [$\times 10^5 \text{ mm}^4$]	$I_{\text{ef}}/I_{\text{teo}}$ [-]
VTD4	VTD4-1	2662.0	45.39	2.54	2.13	1.19
	VTD4-2	3154.5	58.76	2.29	2.13	1.08
	VTD4-3	3233.3	61.44	2.50	2.13	1.17
	VTD4-4	3254.9	51.98	2.68	2.13	1.26
	VTD4-5	3766.8	68.92	2.43	2.13	1.14
VTP4	VTP4-1	3792.0	59.84	3.50	2.13	1.64
	VTP4-2	3300.4	48.64	3.62	2.13	1.70
	VTP4-3	3499.4	52.12	3.54	2.13	1.66
	VTP4-4	3915.2	56.56	3.25	2.13	1.53
	VTP4-5	3380.3	56.07	3.27	2.13	1.54
VTD8	VTD8-1	6479.2	72.85	5.22	4.27	1.22
	VTD8-2	6735.6	52.28	5.47	4.27	1.28
	VTD8-3	7246.5	56.51	5.48	4.27	1.28
	VTD8-4	7112.7	59.87	5.82	4.27	1.36
	VTD8-5	6892.6	58.20	5.56	4.27	1.30
VTP8	VTP8-1	5512.4	45.45	4.92	4.27	1.15
	VTP8-2	6737.9	53.80	6.40	4.27	1.50
	VTP8-3	7121.3	62.24	3.64	4.27	0.85
	VTP8-4	6848.3	54.44	6.04	4.27	1.42
	VTP8-5	6409.9	51.68	5.65	4.27	1.32

Las viguetas de **VTD4** presentaron la menor capacidad promedio (3214 N), con variabilidad intermedia ($CV = 12.2 \%$) y deflexiones máximas entre 45 y 69 mm. La relación entre I_{ef}/I_{teo} osciló entre 1.08 y 1.26, confirmando un trabajo conjunto moderado. Predominaron fallas por pandeo lateral en el tercio central (Figura 33) y casos aislados de tracción en fibras inferiores

La configuración **VTP4** la capacidad aumentó a 3578 N (11.3 % superior a VTD4), con menor dispersión ($CV = 7.4 \%$). Las deflexiones fueron más controladas (49–60 mm) y el I_{ef}/I_{teo} se ubicó entre 1.53 y 1.70. Se observó un comportamiento más uniforme y estable, atribuible a un mejor acople de la conexión.

Al duplicar la sección a **8 latas**, las viguetas **VTD8**, ascendió la capacidad promedio a 6893 N, más del doble de la VTD4, con baja variabilidad ($CV = 4.4 \%$). Las deflexiones se mantuvieron en el rango de 52–73 mm y la relación I_{ef}/I_{teo} entre 1.22 y 1.36.

Finalmente, la configuración **VTP8** alcanzaron una capacidad promedio de 6526 N, con dispersión moderada ($CV = 9.5 \%$). Las deflexiones oscilaron entre 45 y 62 mm y el I_{ef}/I_{teo} varió de 0.85 a 1.50, con un espécimen por debajo de la unidad.

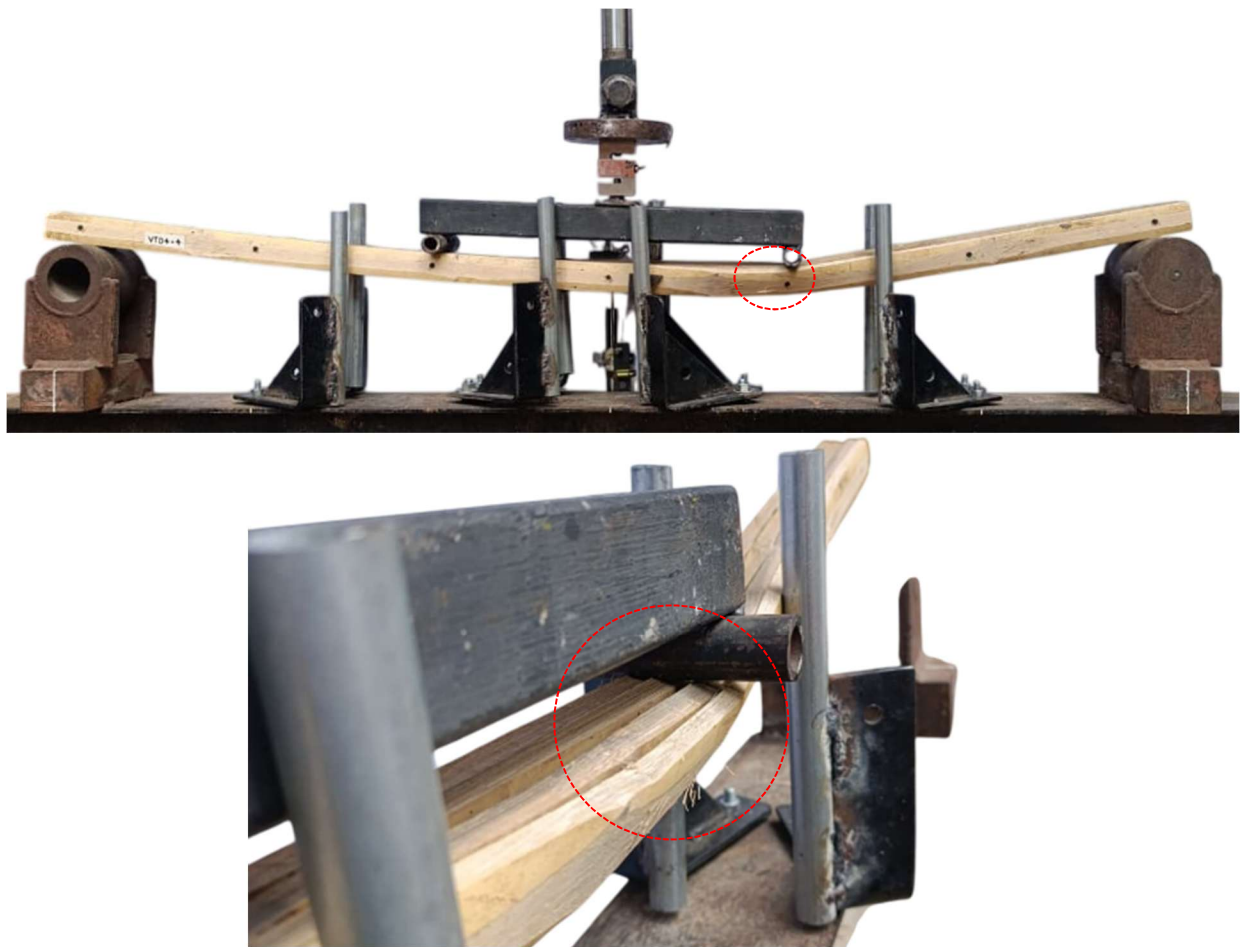


Figura 33. Falla típica presentada en los ensayos.

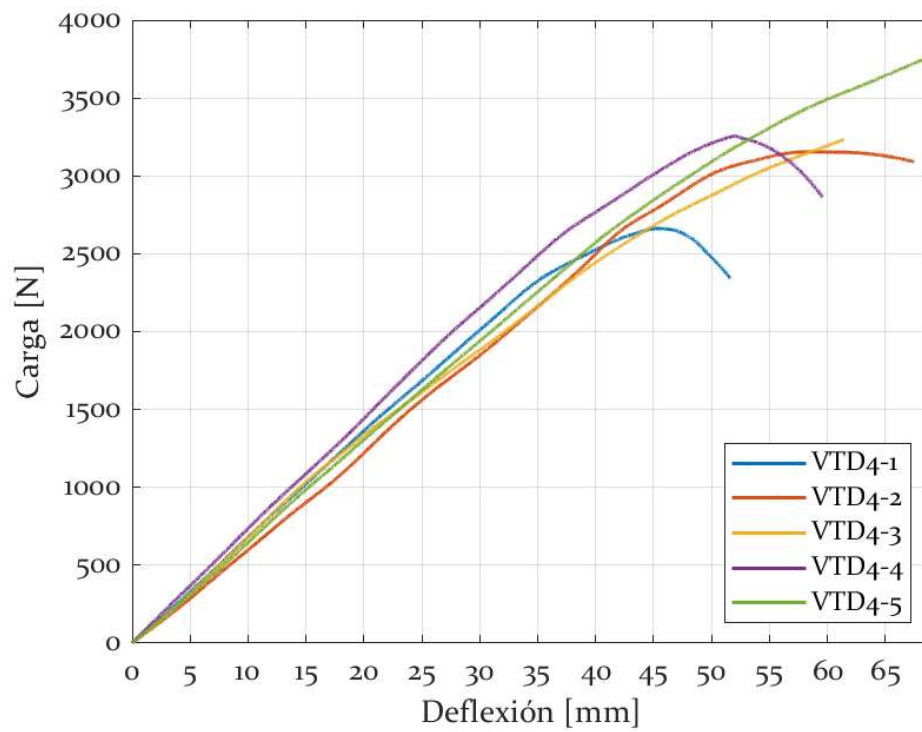


Figura 34. Curvas carga-deflexión - VTD4.

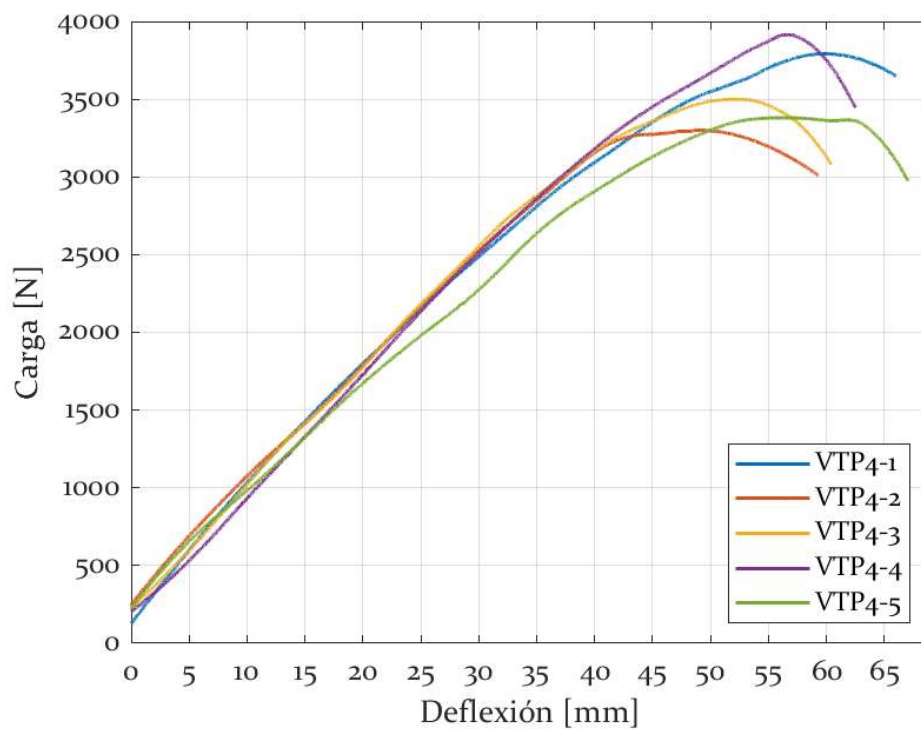


Figura 35. Curvas carga-deflexión - VTP4.

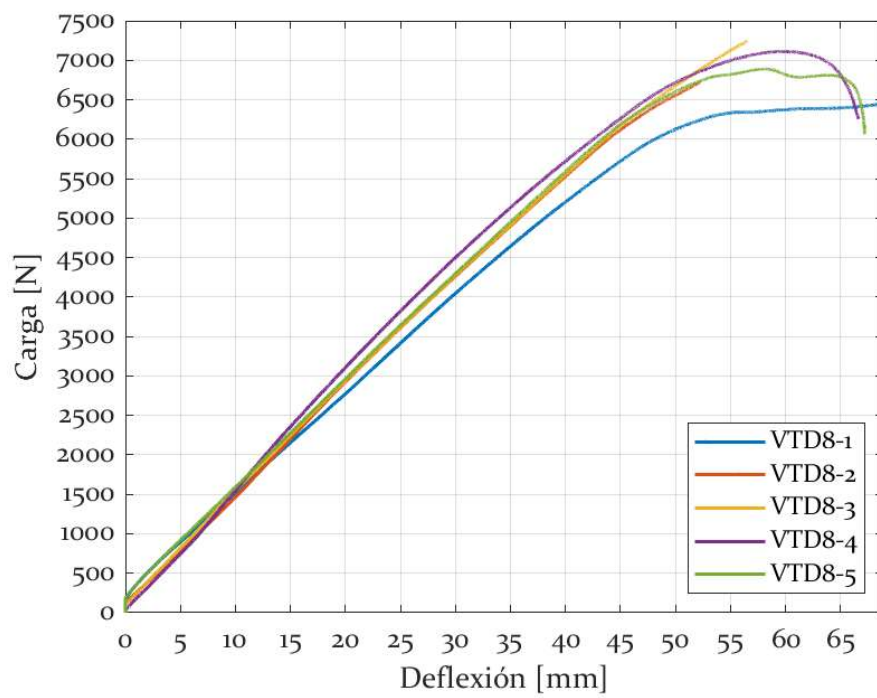


Figura 36. Curvas carga-deflexión - VTD8.

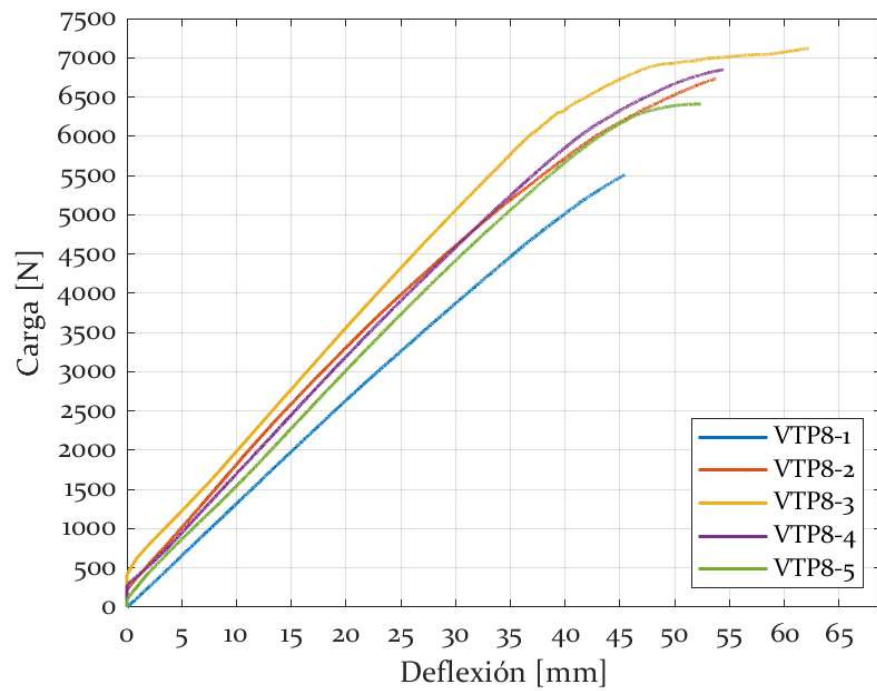


Figura 37. Curvas carga-deflexión - VTP8.

6. FASE III: RECOMENDACIONES DE DISEÑO

Los resultados de las fases previas permitieron comparar el desempeño de las diferentes configuraciones de viguetas de guadua ensambladas con tornillería comercial. A partir de este análisis se reconoce a la tipología **VTD8** como la de mayor capacidad, sin descartar la alternativa **VTP8**, que presentó menores deformaciones, aspecto que puede favorecer el diseño. Además, las probetas VTP8 ensayadas permanecieron en mejores condiciones, lo que motivó su uso en la construcción de la losa experimental. De este modo, se formulan lineamientos aplicables en proyectos reales, orientados a la verificación estructural y a la definición de prácticas constructivas.

6.1. Análisis estadístico de capacidad

La Tabla 14 resume la capacidad última de cada tipología. En promedio, las configuraciones de ocho latas duplicaron la resistencia de las de cuatro, confirmando el efecto directo del aumento de sección. Bajo un criterio conservador, la resistencia característica (P_k) mantuvo el mismo orden jerárquico, encabezado por VTD8 y seguida por VTP8, mientras que las variantes de cuatro latas quedaron claramente por debajo. La variabilidad se mantuvo baja (CV entre 4 % y 12 %), lo que respalda la consistencia de los resultados y la confiabilidad de P_k como valor de diseño, ver Figura 38. En cuanto al esfuerzo a flexión (σ), los valores oscilaron entre 52 y 65 MPa, sin diferencias significativas entre configuraciones, lo que indica que el aumento de sección mejora la capacidad global pero mantiene esfuerzos en el mismo rango. En conjunto, las configuraciones de ocho latas constituyen la alternativa más robusta desde el punto de vista resistente (Figura 39).

Tabla 14. Esfuerzo a flexión y estadísticos de capacidad ($P_{m\acute{a}x}$) por alternativa.

Alternativa	n	σ [MPa]	$P_{m\acute{a}x_prom}$ [N]	CV [%]	P_k [N]
VTD4	5	65	3214	12.21	2569
VTP4	5	52	3577	7.42	3141
VTD8	5	63	6893	4.41	6394
VTP8	5	61	6526	9.52	5504

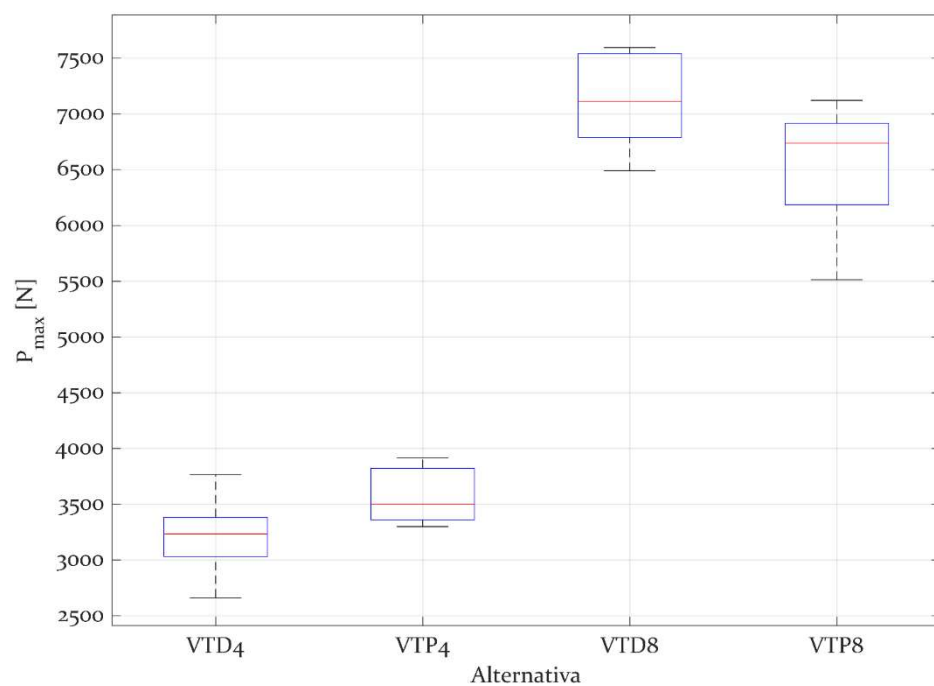


Figura 38. Distribución de $P_{\max}$ por alternativa.

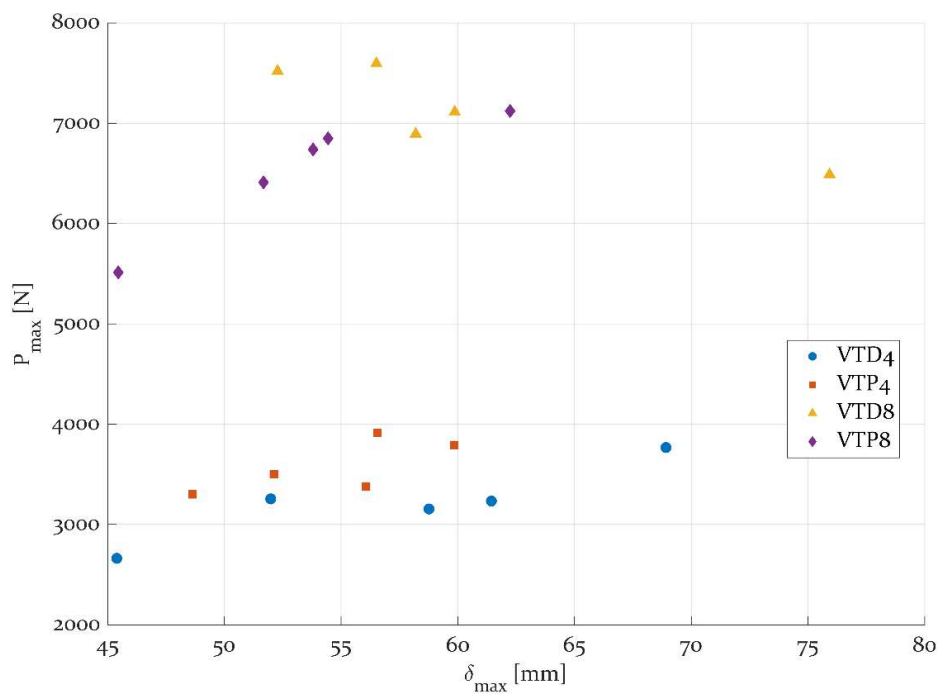


Figura 39. Relación $P_{\max}$ – $\delta_{\max}$ de cada probeta.

6.2. Propiedades de servicio e inercia efectiva

La Tabla 15 resume los parámetros de deformación y rigidez. Las deflexiones máximas estuvieron entre 53 y 60 mm, con variabilidad moderada (CV 8–16 %). En las configuraciones de 4 latas, el tipo de tornillo fue determinante: la variante con cabeza plana alcanzó un $I_{ef}/I_{teo} \approx 1.61$, frente a 1.17 con tornillo drywall. En las de 8 latas las diferencias fueron menores (1.25–1.29).

Tabla 15. Propiedades de servicio e inercia efectiva por alternativa ($\delta_{m\acute{a}x}$ e I_{ef}).

Alternativa	$\delta_{m\acute{a}x}$		I_{ef}	
	Promedio [mm]	CV [%]	Promedio [$\times 10^5$ mm ⁴]	I_{ef}/I_{teo}
VTD4	57.30	15.7	2.49	1.17
VTP4	54.65	7.9	3.44	1.61
VTD8	59.94	12.9	5.51	1.29
VTP8	53.52	11.2	5.33	1.25

6.3. Ensayo de carga en losa con viguetas

6.3.1. Metodología

Se construyó una losa de 1.60 × 1.22 m en tríplex, solo con fines experimentales, apoyada sobre tres viguetas **VTP8** (Figura 40). Se fijaron con cuatro abrazaderas a L/3 para garantizar el trabajo conjunto, se dejó un espacio para generar compresión entre los elementos y restringir desplazamientos laterales, ver Figura 40(c). Se instalaron cinco sensores de deflexión (precisión 0.01 mm): uno en el centro de cada viga y dos en los tercios extremos de la central. La losa se dividió en nueve posiciones de carga (1–9) (Figura 41) y se realizaron tres pruebas (ver Anexo 3):

- **Prueba 1 (carga puntual móvil):** una persona de 116 kg se ubicó sucesivamente en cada posición; en cada caso se bajaba para permitir la recuperación, registrando lecturas independientes (Figura 42).
- **Prueba 2 (carga acumulada progresiva):** nueve personas en promedio de 77 kg (697 kg en total) se añadieron en secuencia sobre distintas posiciones, garantizando la distribución más equilibrada de la carga, finalizando con el grupo concentrado en el centro de la losa para medir la deflexión máxima y la residual tras descarga, (Figura 43).

- **Prueba 3 (carga máxima):** quince personas en promedio 71 kg (1064 kg) se distribuyeron sobre la losa, registrando deflexión máxima y recuperación (Figura 44).

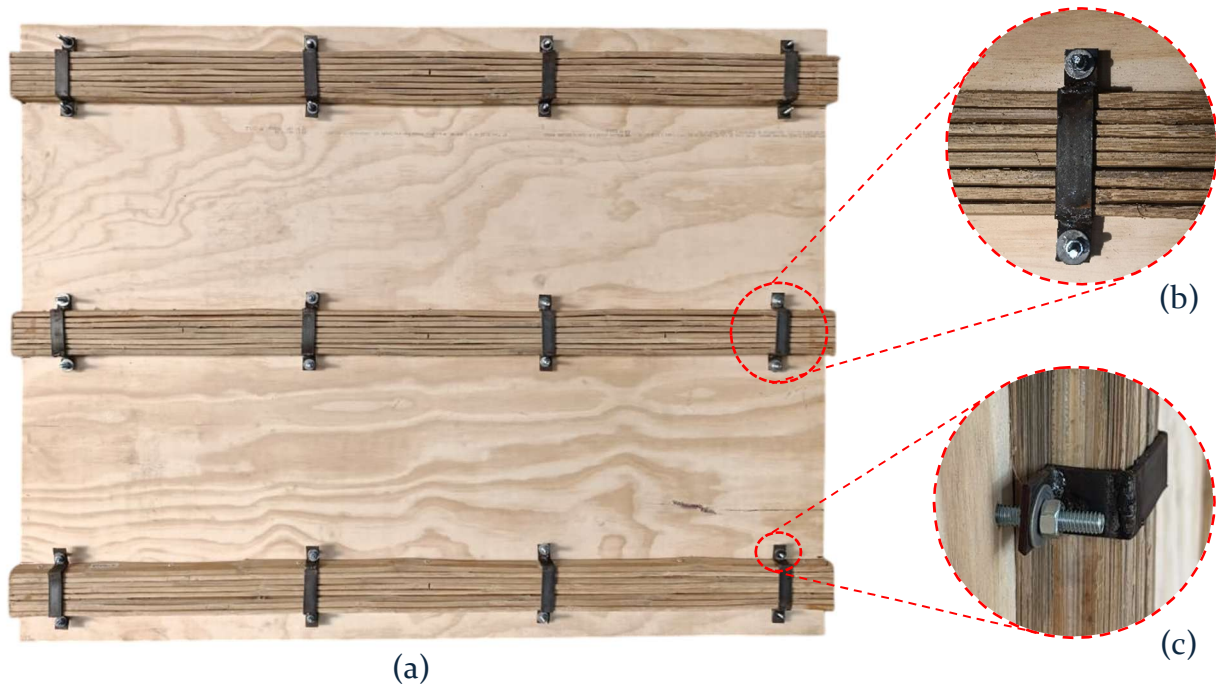


Figura 40. Detalle de losa (vista inferior).

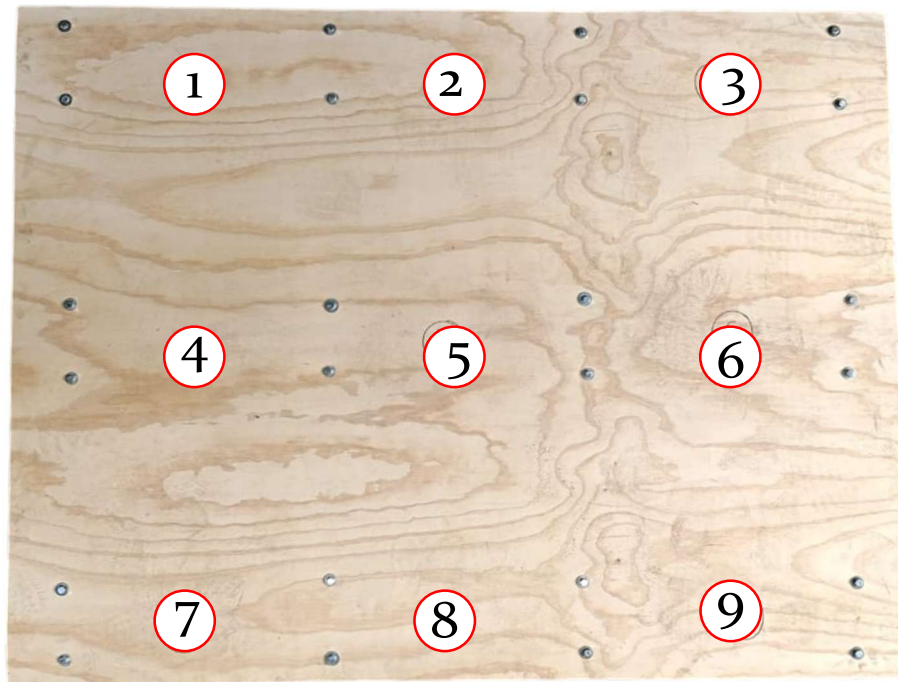


Figura 41. Detalle de losa (vista superior).



Figura 42. Ensayo experimental – Prueba 1.

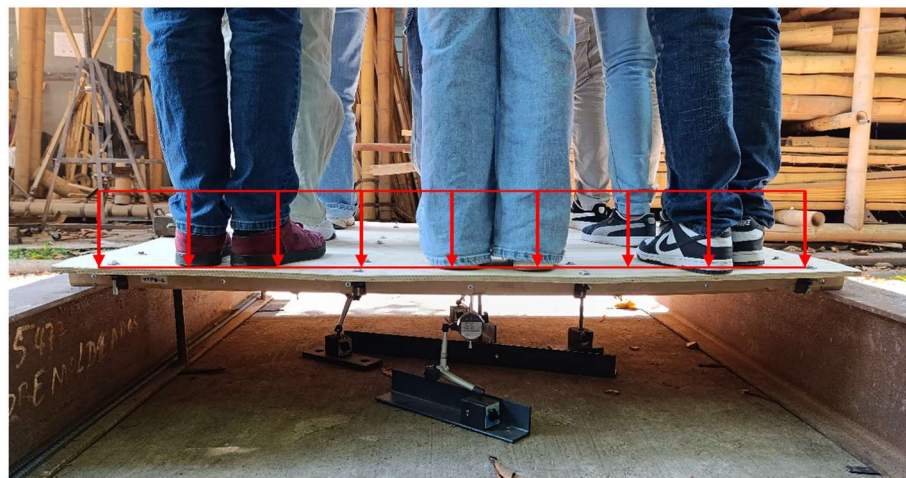


Figura 43. Ensayo experimental – Prueba 2.

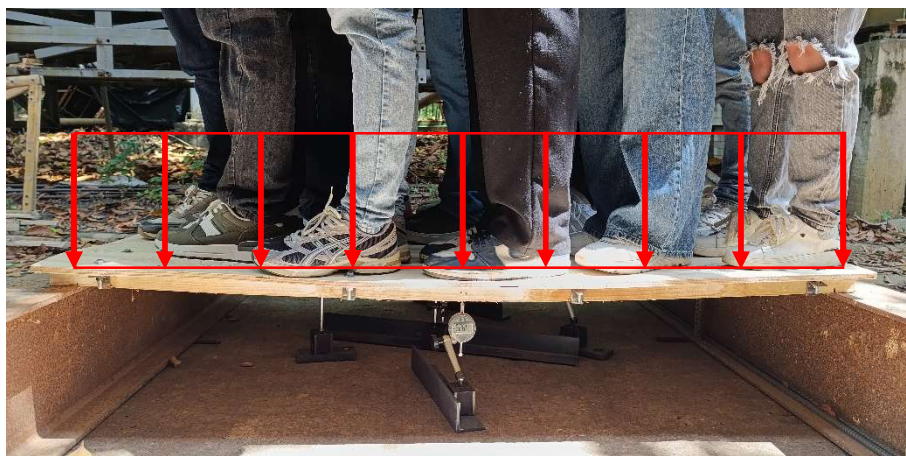


Figura 44. Ensayo experimental – Prueba 3.

6.3.2. Resultados

En la **Prueba 1** (116 kg) se registraron deflexiones independientes por posición, con mayor respuesta en las posiciones centrales de las viguetas, ver Figura 45. En la **Prueba 2** (697 kg acumulado) el incremento fue progresivo, alcanzando deflexiones máximas de 0.2–11.2 mm según la posición y el sensor. Posteriormente, al concentrar a todos los participantes en el centro de la losa se registró la máxima deformación global (≈ 19.5 mm en el sensor central), y al descender se midieron residuales entre 2–5 %, ver Figura 46. En la **Prueba 3** (1064 kg) las deflexiones fueron mayores con recuperación elástica predominante, ver Figura 47.

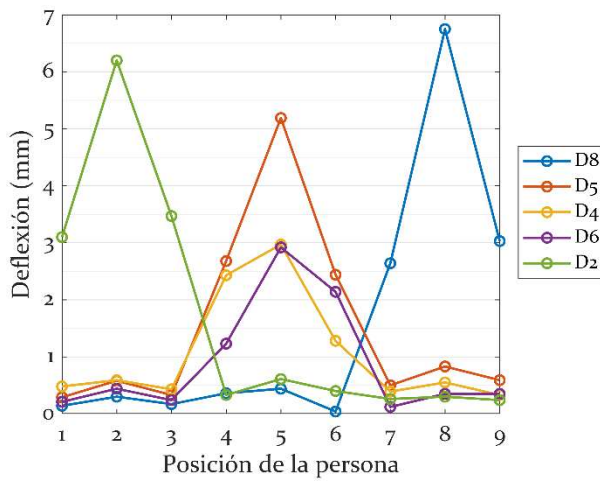


Figura 45. Deflexión por posición de carga (Prueba 1).

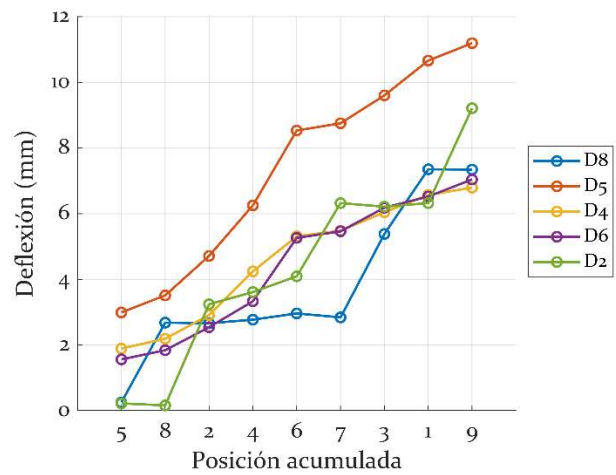


Figura 46. Deflexión por posición acumulada (Prueba 2).

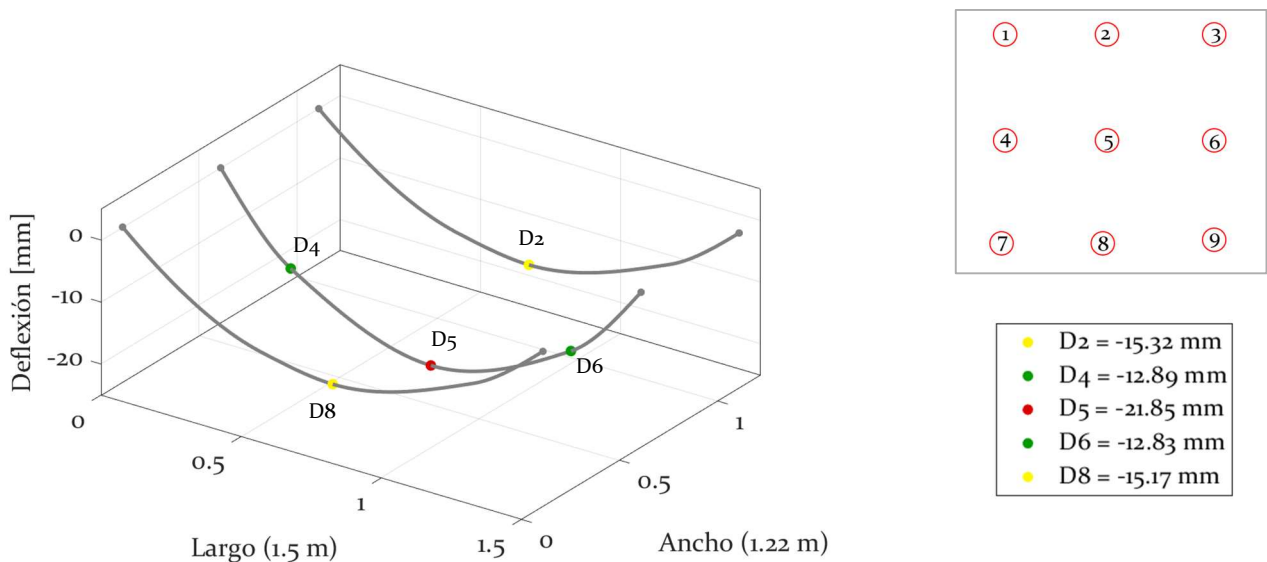


Figura 47. Esquema deformada de las viguetas (Prueba 3).

6.3.3. Discusión

Los ensayos en losa con viguetas VTP8 evidenciaron: (i) mayor participación del tramo central de las viguetas bajo cargas locales (Prueba 1); (ii) respuesta predominantemente lineal con recuperación casi total al descargar en el escenario acumulado y concentrado (Prueba 2); y (iii) incremento esperado de las flechas al aplicar la carga máxima (Prueba 3). La conexión losa–viguetas funcionó como arriostramiento, contribuyendo a la rigidez global.

Sin embargo, las deflexiones máximas registradas (≈ 19.5 mm en la Prueba 2) superaron ampliamente los límites de la NSR-10, que establecen $\ell/360 \approx 4.2$ mm y $\ell/300 \approx 5.0$ mm para entrepisos, así como $\ell/240 \approx 6.3$ mm para cubiertas sin cielo raso. Esto confirma que, en condiciones reales, el sistema de viguetas por sí solo no satisface los criterios de servicio.

En consecuencia, se requiere un arriostramiento lateral efectivo y una conexión rígida losa–viguetas que reduzca tanto el pandeo como las flechas. Para su implementación práctica, deberá verificarse la respuesta del sistema frente a la carga de diseño adoptada (cargas permanentes y variables definidas en la NSR-10), de modo que las deflexiones proyectadas cumplan con los límites normativos aplicables.

6.3.4. Modelo computacional de losa

Se desarrolló un modelo computacional en ANSYS para comparar los resultados experimentales. La guadua se caracterizó con las propiedades elasto–plásticas obtenidas (Tabla 8) y el tríplex con valores de referencia de Cai et al. [41]. Se definieron contactos friccionales entre latas y entre losa–viguetas, con un coeficiente de fricción estática de 0.3 para bambú–bambú y tríplex–bambú (Figura 48). El análisis se basó en la Prueba 3 (carga máxima de 1064 kg) como referencia para validar el modelo numérico (Figura 49).

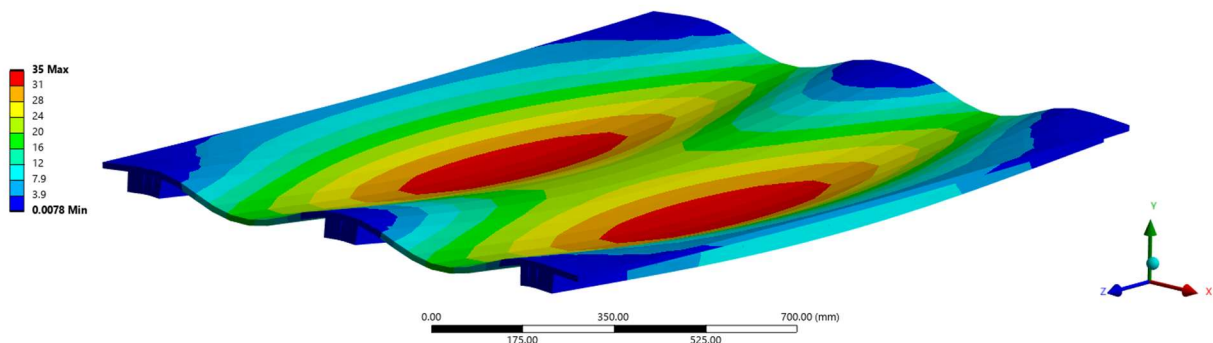


Figura 48. Modelo computacional losa.

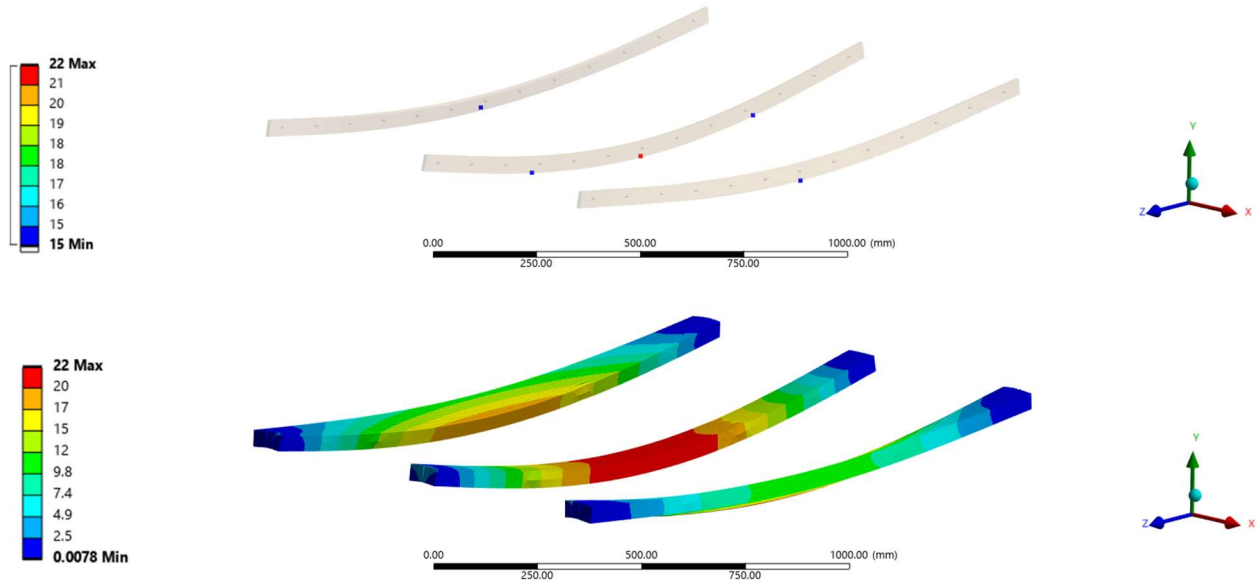


Figura 49. Deflexiones medidas en las posiciones de los sensores del ensayo experimental.

La comparación entre resultados experimentales y simulados (Tabla 16) mostró buena correspondencia en D2, D5 y D8 (errores <2 %) y discrepancias moderadas en D4 y D6 (1.6–1.8 mm). En ambos casos, la mayor $\delta_{\text{máx}}$ se registró en el sensor central D5. En conjunto, el modelo presentó un error promedio <10 %, validando su uso para analizar el efecto colaborante losa-viguetas.

Tabla 16. Comparación de deflexiones experimentales y numéricas (Prueba 3).

Sensor	Experimental (mm)	Modelo (mm)	Diferencia (%)
D2	-15.32	-15.10	1.4 %
D4	-12.89	-14.55	12.9 %
D5	-21.85	-21.62	1.1 %
D6	-12.83	-14.65	14.2 %
D8	-15.17	-15.10	0.5 %

Se verificó el modelo con un contacto rígido losa-viguetas, obteniéndose deformaciones menores a 14 mm, tal como era previsible (Figura 50).

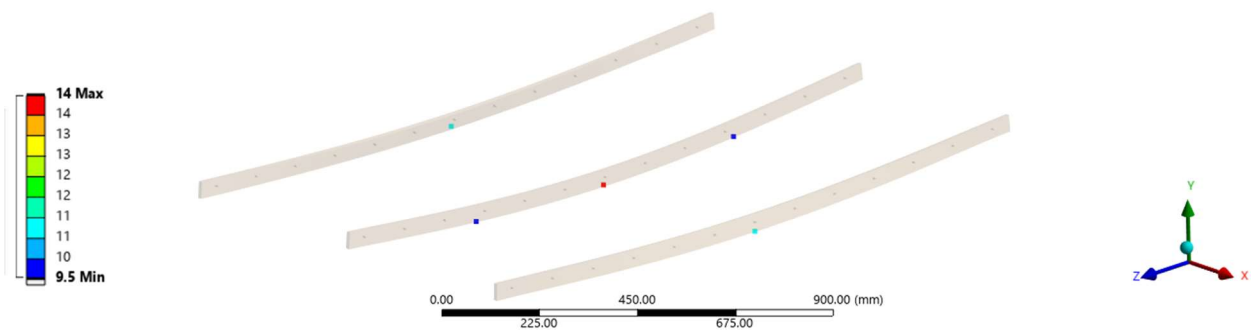


Figura 50. Deflexiones medidas en las posiciones de los sensores del ensayo experimental, modelo de prueba.

Los resultados de esta fase permitieron establecer lineamientos iniciales para el uso de viguetas VTD8 y VTP8 en losas ligeras, destacando su capacidad y rigidez.

6.4. Consideraciones de diseño y uso de viguetas según deflexión

Las viguetas presentaron deformaciones superiores a los límites de servicio establecidos en el Título G de la NSR-10 (Tabla G.3.2-1). Por ello, se determinaron los espaciamientos máximos admisibles que aseguran el cumplimiento de las deflexiones límite para entrepisos y cubiertas, considerando las cargas típicas de uso.

Los valores se obtuvieron a partir de la relación carga-deflexión experimental y de las deflexiones admisibles normativas, conformando una recomendación de diseño preliminar para optimizar el comportamiento en servicio.

Para cada longitud de vano (L) se indica la deflexión máxima permitida ($\delta_{\text{máx}}$) y el espaciamiento correspondiente (s) que garantiza el cumplimiento de la condición de servicio (ver Tablas 17 y 18).

Tabla 17. Separación admisible de viguetas en entrepisos.

L (mm)	$d_{\text{máx}}$ (mm)	s (mm)
1750	5.8	80
1500	5.0	160
1250	4.2	200
1000	3.3	370

Tabla 18. Separación admisible de viguetas en cubiertas.

L (mm)	$d_{\text{máx}}$ (mm)	s (mm)
1750	7.3	100
1500	6.3	200
1250	5.2	250
1000	4.2	460

CONCLUSIONES

Se estableció un procedimiento constructivo replicable para la fabricación de viguetas de guadua atornilladas, que integra la selección de materiales, el tipo de tornillería, el patrón de atornillado y los parámetros de ensamblaje, constituyendo una base metodológica aplicable en proyectos reales.

Los ensayos demostraron que incrementar el número de latas aumenta la capacidad resistente y que el uso de tornillos de cabeza plana mejora la rigidez y reduce la variabilidad frente a los tornillos tipo drywall.

El pandeo lateral-torsional se identificó como el modo de falla crítico en viguetas individuales; sin embargo, su efecto se reduce significativamente al trabajar en conjunto con la losa. Por ello, se recomienda incorporar arriostramientos laterales o conexiones rígidas losa-vigueta que garanticen estabilidad.

Las deflexiones registradas se encuentran dentro de los rangos admisibles para algunas aplicaciones de entresijos y cubiertas, siempre que se adopten espaciamientos adecuados según los límites de servicio establecidos en la NSR-10.

En conjunto, la investigación confirma la viabilidad técnica y el potencial sostenible de las viguetas de guadua ensambladas con tornillos comerciales, y plantea como línea de investigación futura el estudio integral del comportamiento conjunto vigueta–losa para su aplicación estructural definitiva.

REFERENCIAS

- [1] L. C. Dlamini, S. Fakudze, G. G. Makombe, S. Muse, and J. Zhu, “Bamboo as a valuable resource and its utilization in historical and modern-day China,” *Bioresources*, vol. 17, no. 1, pp. 1926–1938, Dec. 2021, doi: 10.15376/biores.17.1.dlamini.
- [2] Forero Castiblanco D. La Guadua (*Guadua angustifolia* Kunth). Bogotá: Corporación Universitaria Minuto de Dios; 2021.
- [3] Z. Qiu and H. Fan, “Laminated bamboo materials for plated building structures,” *Journal of Building Engineering*, vol. 61, Dec. 2022, doi: 10.1016/j.jobbe.2022.105239.
- [4] J. Wen and Y. Xiao, “The flexural behavior of cross laminated bamboo and timber (CLBT) and cross laminated timber (CLT) beams,” *Constr Build Mater*, vol. 408, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2023.133739.
- [5] Z. Riza Ahmad, R. Pujiarti, S. Sunarta, G. Mada, B. Teknologi Hasil Hutan, and F. Kehutanan, “PENGARUH PERBEDAAN JENIS DAN UMUR BAMBU TERHADAP KUALITASNYA SEBAGAI BAHAN MEUBEL DAN KERAJINAN.”
- [6] Comisión Mundial sobre Medio Ambiente y Desarrollo. Nuestro futuro común (Informe Brundtland). Naciones Unidas, Asamblea General; 1987.
- [7] T. Y. Li *et al.*, “Bending performance of nail-laminated bamboo-timber panels made with glulam and fast-grown plantation Chinese fir,” *Constr Build Mater*, vol. 384, Jun. 2023, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2023.131425.
- [8] BBC News. The big problem of building waste and how to tackle it. 2024 [citado 1 nov 2024]. Disponible en: <https://www.bbc.com/news/business-57899572>
- [9] “XII. REPORTS ON INTERNATIONAL ORGANIZATIONS AND BODIES 15. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO),” doi: 10.1093/yiel/yvzo57/5700416.
- [10] K. Karyadi, O. Prastika Putri, P. Bagus Susanto, and Nindyawati, “Strength and stiffness of segmented compression part beam made of sliced laminated bamboo due to transverse load on shear failure mode,” in *4th International Conference on Vocational Education and Training, ICOVET 2020*, Institute of Electrical and

- Electronics Engineers Inc., Sep. 2020, pp. 278–283. doi: 10.1109/ICOVET50258.2020.9230108.
- [11] J. Duque, L. F. López, and J. J. García, “Joints with bamboo slats for shear wall frames,” *Constr Build Mater*, vol. 425, Apr. 2024, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2024.135913.
 - [12] Better Bamboo Buildings. The story of Pinboo boards. 2024 [citado 2 nov 2024]. Disponible en: <https://www.betterbamboobuildings.com/home/the-story-of-pinboo>.
 - [13] S. Chen, Y. Wei, K. Zhao, F. Dong, and L. Huang, “Experimental investigation on the flexural behavior of laminated bamboo-timber I-beams,” *Journal of Building Engineering*, vol. 46, Apr. 2022, doi: 10.1016/j.jobe.2021.103651.
 - [14] A. Sil, “Critical Review Of Bamboo As A Structural Material For Civil Engineering Construction,” vol. 21, no. S2, pp. 833–850, 2024, [Online]. Available: www.migrationletters.com
 - [15] A. D. Catur, R. Sutanto, S. Salman, N. H. Sari, M. Wijana, and M. T. Prijaya, “Sifat tekan komposit sandwich dengan inti beton cellular diperkuat pin bambu sebagai bahan panel ringan,” *Dinamika Teknik Mesin*, vol. 13, no. 1, p. 23, Apr. 2023, doi: 10.29303/dtm.v13i1.591.
 - [16] H. Li, Y. Wei, Y. Lin, S. Chen, and J. Chen, “Out-of-plane characteristics of cross-laminated bamboo and timber beams under variable span three-point loading,” *Constr Build Mater*, vol. 411, Jan. 2024, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2023.134647.
 - [17] H. Hematabadi, M. Madhoushi, A. Khazaeian, and G. Ebrahimi, “Structural performance of hybrid Poplar-Beech cross-laminated-timber (CLT),” *Journal of Building Engineering*, vol. 44, Dec. 2021, doi: 10.1016/j.jobe.2021.102959.
 - [18] A. Taoum, H. Jiao, D. Holloway, and J. Shanks, “Behaviour of locally post-tensioned nail laminated high mass floor panels under serviceability loads,” *Australian Journal of Structural Engineering*, vol. 20, no. 2, pp. 115–123, Apr. 2019, doi: 10.1080/13287982.2019.1607447.
 - [19] H. Li, B. J. Wang, L. Wang, P. Wei, Y. Wei, and P. Wang, “Characterizing engineering performance of bamboo-wood composite cross-laminated timber made from bamboo

- mat-curtain panel and hem-fir lumber,” *Compos Struct*, vol. 266, Jun. 2021, doi: 10.1016/j.compstruct.2021.113785.
- [20] V. Krämer and H. J. Blass, “International Council For Research And Innovation In Building And Construction Working Commission W18-Timber Structures Load Carrying Capacity Of Nail-Laminated Timber Under Concentrated Loads Load Carrying Capacity of Nail-Laminated Timber under Concentrated Loads,” 2001.
- [21] M. Derikvand, H. Jiao, N. Kotlarewski, M. Lee, A. Chan, and G. Nolan, “Bending performance of nail-laminated timber constructed of fast-grown plantation eucalypt,” *European Journal of Wood and Wood Products*, vol. 77, no. 3, pp. 421–437, May 2019, doi: 10.1007/s00107-019-01408-9.
- [22] J. A. Tjondro and D. R. Widarda, *THE FLEXURAL STRENGTH AND BEHAVIOUR OF CROSS NAIL-LAMINATED TIMBER FLOOR*. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/361340177>
- [23] W. G. Davids *et al.*, “Structural performance of hybrid SPFs-LSL cross-laminated timber panels,” *Constr Build Mater*, vol. 149, pp. 156–163, Sep. 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.05.131.
- [24] Z. Li, W. Feng, M. He, F. Chen, and X. Sun, “Bending performance of nail laminated timber: Experimental, analytical and numerical analyses,” *Constr Build Mater*, vol. 389, Jul. 2023, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2023.131766.
- [25] González Pérez JA, Samudio Vanegas YAK. Conexiones en estructuras de guadua: una revisión de literatura. Bogotá: Universidad Católica de Colombia, Facultad de Ingeniería; 2020.
- [26] D. Malkowska, D. Trujillo, E. Toumpanaki, and J. Norman, “Study of screwed bamboo connection loaded parallel to fibre,” *Constr Build Mater*, vol. 398, Sep. 2023, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2023.132532.
- [27] A. María and S. Pinzón, “PROPUESTA DE LA TEORÍA DE LA FLUENCIA PARA EL DISEÑO DE CONEXIONES DE GUADUA ROLLIZA.”
- [28] N. J. . Turland *et al.*, *Código internacional de nomenclatura para algas, hongos y plantas (Código de Shenzhen) : adoptado por el decimonoveno Congreso Internacional*

- de Botánica, Shenzhen, China, julio de 2017. Stiftung Herbarium Greuter (Fundación Herbario Greuter), 2018.*
- [29] International Organization for Standardization (ISO). ISO 22157: Bamboo — Determination of physical and mechanical properties — Part 1: Requirements. Ginebra: ISO; 2004.
 - [30] “Cartilla Aprovechamiento y tratamiento de la guadua.” [Online]. Available: www.cvc.gov.co
 - [31] A. Mendoza, C. Solano¹, D. Palencia¹, and D. Garcia¹, “Aplicación del proceso de jerarquía analítica (AHP) para la toma de decisión con juicios de expertos Application of the Analytical Hierarchy Process (AHP) for decision-making with expert judgment,” 2019.
 - [32] ASTM International. *ASTM D198-15. Standard test methods of static tests of lumber in structural sizes*. West Conshohocken (PA): ASTM International; 2015.
 - [33] “Optima OP-312-10 10,000 lb S-Beam Load Cell - Scales Plus.” Accessed: Jan. 25, 2025. [Online]. Available: <https://www.scalesplus.com/optima-op-312-10-10000-lb-s-beam-load-cell-ntep/>
 - [34] Bioweb Colombia. Higrómetro compacto Extech MO50 con pines. 2025 [citado 25 ene 2025]. Disponible en: <https://colombia.bioweb.co/products/higrometro-compacto-extech-mo50-con-pines>
 - [35] 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>
 - [36] 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>
 - [37] 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>

- [38] J. J. García, C. Rangel, and K. Ghavami, “Experiments with rings to determine the anisotropic elastic constants of bamboo,” *Constr Build Mater*, vol. 31, pp. 52–57, Jun. 2012, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2011.12.089.
- [39] ANSYS. Buckling: Local buckling vs buckling, methods for solving. Solid Mechanics III – Methods of Solving Problems: Structural Instabilities [Internet]. 2024 [citado 25 ene 2025]. Disponible en: <https://www.ansys.com>
- [40] Comisión Asesora Permanente para el Régimen de Construcciones Sismo Resistentes. Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10. Bogotá: Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial; 2010.
- [41] Cai, Zhiyong, Ross, and Robert J, “Wood Handbook, Chapter 11: Mechanical Properties of Wood-Based Composite Materials,” 2010.

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 (apartado 4.2.1), ver Figura 51.



Figura A.1. Dispositivo de aplicación de carga caracterización mecánica del bambú.

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, ver Figura 52.



Figura A.2. Dispositivo de aplicación de prueba de flexión de muestras.

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, ver Figura A.3.

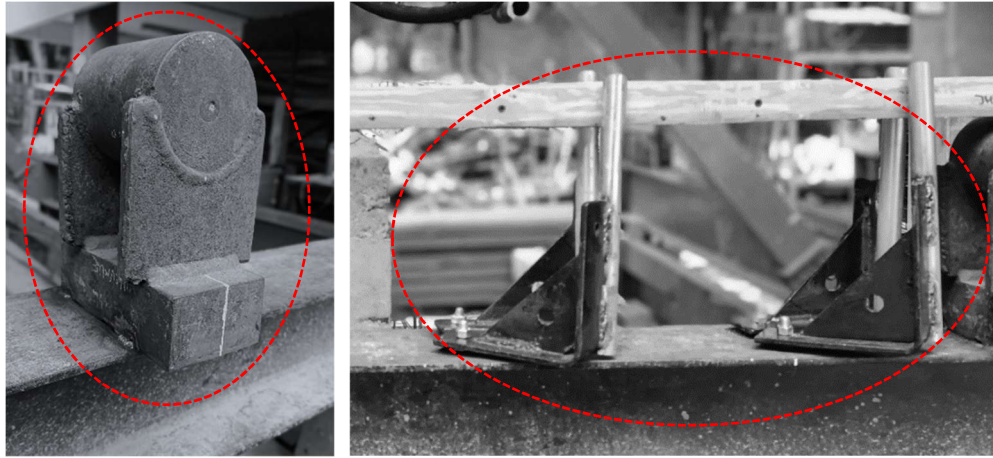
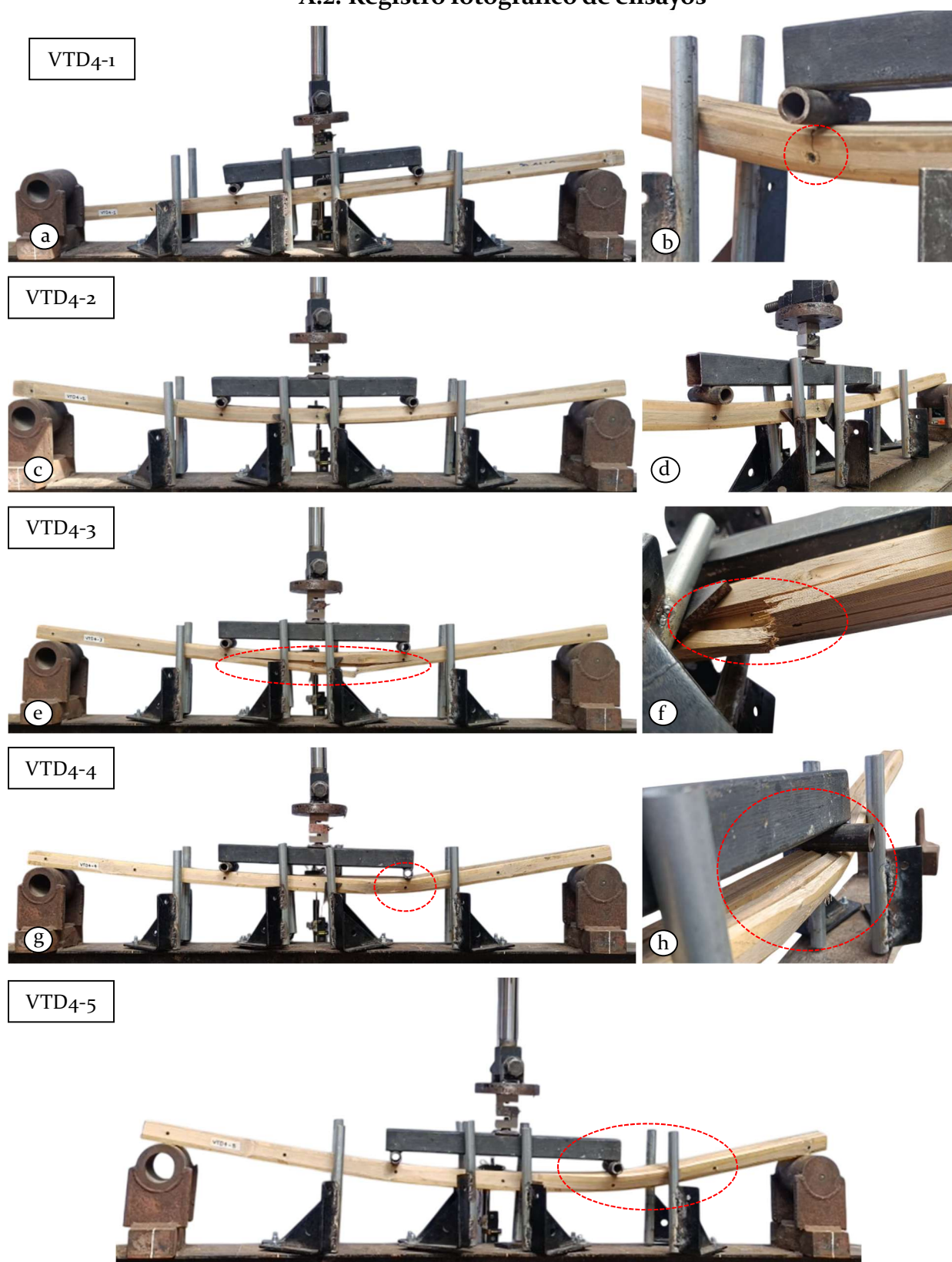


Figura A.3. Apoyos y arriostramientos laterales, respectivamente.

A.2. Registro fotográfico de ensayos



(i)

Figura A.4. Registro fotográfico ensayos probetas – VTD₄.

El registro fotográfico (Figura 58) presenta los cinco especímenes ensayados, en los cuales se evidencian deformaciones concentradas en el tercio medio y manifestaciones de pandeo lateral. Estas imágenes confirman la ductilidad mencionada en el análisis, reflejada en deflexiones elevadas de hasta ~69 mm, así como diferencias en la magnitud del daño entre probetas, coherentes con la variabilidad reportada en los resultados experimentales. En detalle:

- **VTD4-1:** debido al pandeo, se desplazó del apoyo (a). Aunque mostró un comportamiento inicialmente normal, fue la de menor capacidad. Previamente se habían observado daños en la zona de compresión (b).
- **VTD4-2:** presentó un desempeño estable; la falla se originó por pandeo lateral (c y d). Para evitar el desprendimiento de la probeta fuera del montaje, la prueba se detuvo, registrando una reducción de capacidad de carga inferior al 5 %.
- **VTD4-3:** falló por tracción en las fibras inferiores, con un desgarro localizado en la zona de máximo momento flector (e y f).
- **VTD4-4:** mostró un comportamiento regular hasta alcanzar el descenso en su curva carga-deflexión; el pandeo se concentró en la zona de mayor momento, cerca al apoyo derecho (g y h).
- **VTD4-5:** alcanzó la mayor capacidad de carga; sin embargo, la prueba fue suspendida por riesgo de desprendimiento (i).

Las letras señaladas corresponden a la identificación mostrada en la Figura A.4.

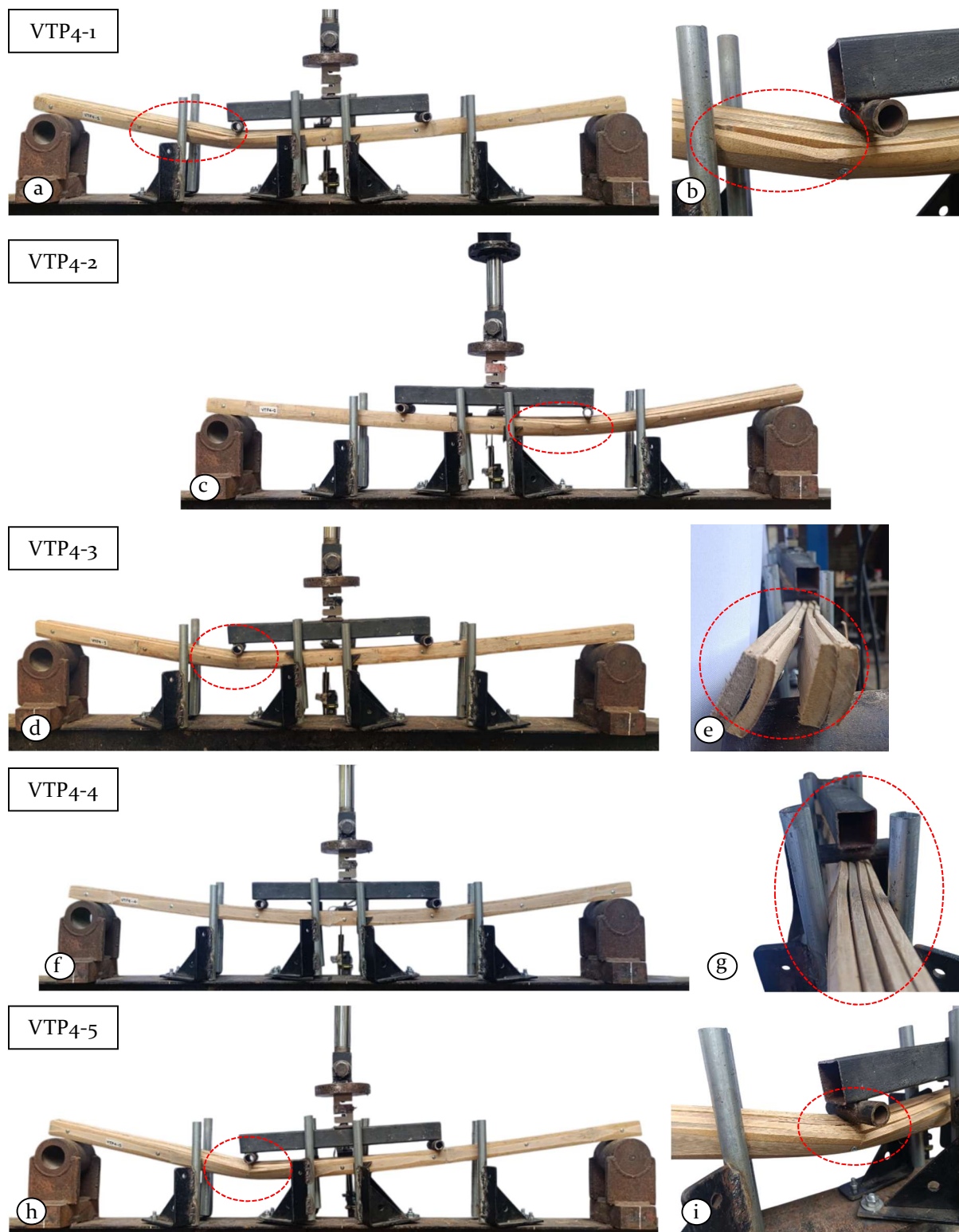


Figura A.5. Registro fotográfico ensayos probetas – VTP₄.

Los especímenes de esta serie mostraron un comportamiento más uniforme en comparación con la configuración con tornillo drywall. Se observaron deformaciones más controladas, sin desprendimientos ni fallas abruptas. El registro fotográfico confirma lo descrito en los resultados: **mayor rigidez y menor variabilidad** entre pruebas, atribuibles al mejor trabajo conjunto de las latas unidas con tornillo cabeza plana.

- **VTP₄₋₁**: alcanzó la segunda mayor capacidad. La falla se presentó por inestabilidad lateral localizada en el tercio izquierdo (a y b).
- **VTP₄₋₂**: registró la menor capacidad, con un pandeo concentrado en las proximidades del apoyo derecho (c).
- **VTP₄₋₃**: falló de manera similar a la probeta 1, con la tercera mejor capacidad, concentrando la inestabilidad en el apoyo izquierdo (d). Adicionalmente, se evidenció separación en bloques de dos latas (e).
- **VTP₄₋₄**: alcanzó la mayor capacidad, con un comportamiento muy estable. La prueba debió suspenderse por riesgo de expulsión del espécimen debido al posible riesgo de que la probeta saliera despedida (f y g).
- **VTP₄₋₅**: presentó un desempeño similar al de la probeta 1 (h e i).

Las letras señaladas corresponden a la identificación mostrada en la Figura A.5.

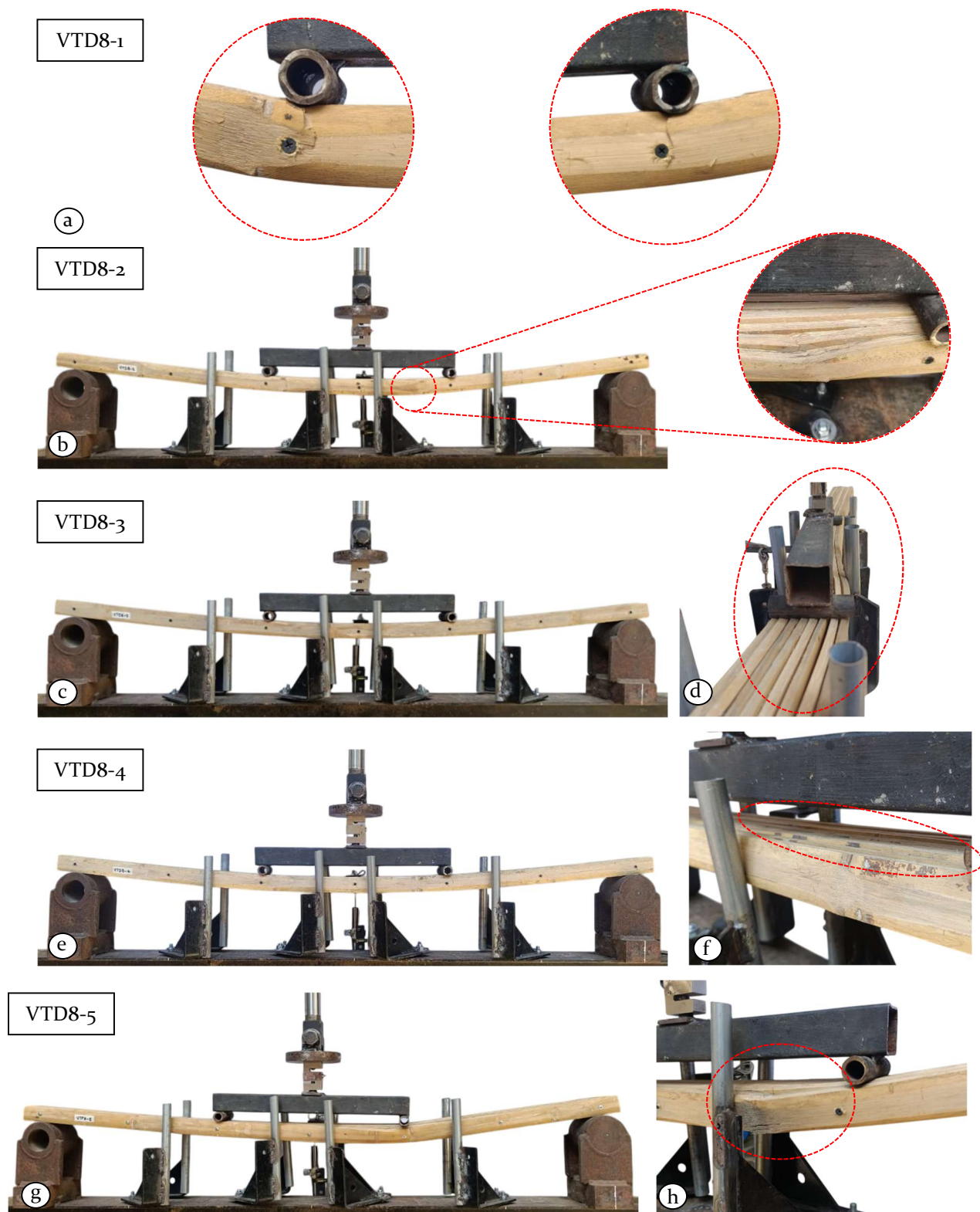


Figura A.6. Registro fotográfico ensayos probetas – VTD8.

Las imágenes evidencian viguetas de mayor tamaño, con deformaciones concentradas principalmente en la zona central. En varias probetas se aprecia un pandeo lateral acentuado, lo que coincide con la variabilidad registrada en las deflexiones (52 a 73 mm). Aunque la resistencia fue más del doble respecto a la configuración VTD₄, el control de la inestabilidad lateral se torna más complejo al incrementar el número de latas.

En el análisis individual:

- **VTD8-1:** presentó un comportamiento inicial normal; sin embargo, la prueba fue suspendida por riesgo de daño a los equipos, donde se identificaron fallas por compresión en ambos extremos (a). Este espécimen reportó la menor capacidad de carga.
- **VTD8-2:** no mostró fallas críticas, aunque se evidenció una fisura localizada en la zona de mayor momento, próxima al apoyo izquierdo, acompañada de una separación irregular entre latas (b).
- **VTD8-3:** alcanzó la mayor capacidad entre las cinco; la prueba fue detenida antes del descenso de la carga. Se observa una marcada curvatura en el tercio medio (c, d).
- **VTD8-4:** registró la segunda mayor capacidad. En este caso, se evidenció un deslizamiento entre latas concentrado en el tercio central (e, f).
- **VTD8-5:** presentó un pandeo lateral-torsional evidente en la zona central, con deformaciones pronunciadas (g, h).

Las letras señaladas corresponden a la identificación mostrada en la Figura A.6.

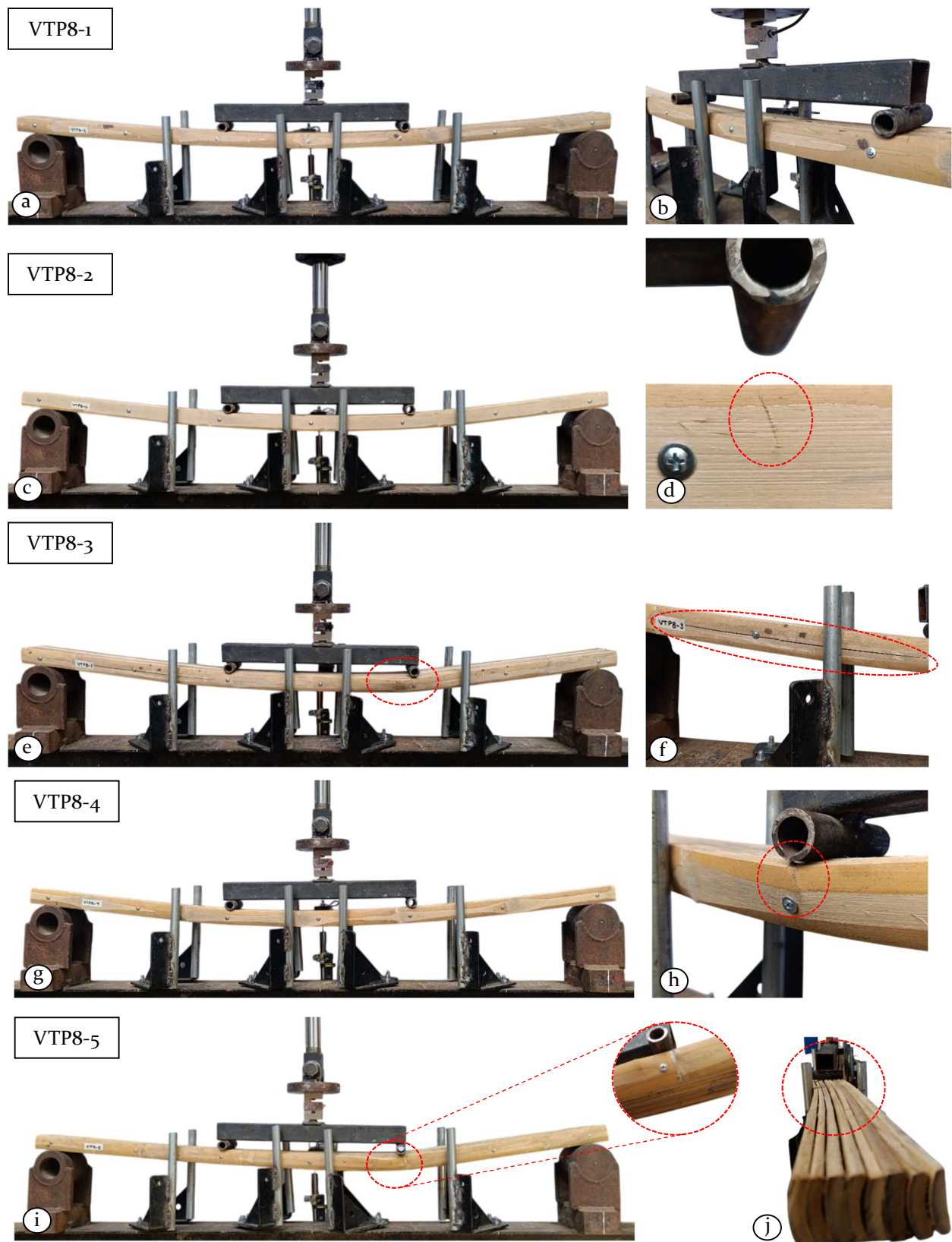


Figura A.7. Registro fotográfico ensayos probetas – VTP8.

El registro fotográfico evidencia un desempeño más favorable que el de las viguetas VTD8, con deformaciones distribuidas de manera más homogénea. No obstante, se identifican casos puntuales de **inestabilidad lateral** y de **deformaciones excesivas**, tal como se reporta en los resultados numéricos, incluyendo un espécimen cuyo momento de inercia efectivo resultó inferior al valor teórico.

- **VTP8-1:** presentó la menor capacidad de carga registrada(a, b).
- **VTP8-2:** mostró un comportamiento similar a la probeta 1, con una **falla localizada en la zona de compresión** (c, d).
- **VTP8-3:** alcanzó la mayor capacidad de carga, aunque presentó una grieta longitudinal en la zona de ensamblaje (tornillos) (e, f).
- **VTP8-4:** tuvo una concentración de la falla en la **zona de compresión del apoyo izquierdo** (g, h), resultando en la segunda mayor capacidad de carga.
- **VTP8-5:** falló por **pandeo lateral-torsional**, acompañado de un **deslizamiento entre las latas** (i) y de una **curvatura característica del pandeo** (j).

Las letras señaladas corresponden a la identificación mostrada en la Figura A.7.

A.3. Registro fotográfico de ensayo en losa.



Figura A.8. Prueba 1 (carga puntual móvil).



Figura A.9. Prueba 2 (carga acumulada progresiva).



Figura A.10. Prueba 3 (carga máxima).