

## DISEÑO Y EVALUACIÓN DE CONEXIONES ESTRUCTURALES DE BAMBÚ PARA CUBIERTAS MODULARES

Palencia, Nicolás<sup>a</sup>; Gómez, Daniel<sup>b</sup>; García, José Jaime<sup>c</sup>

<sup>a</sup> Ingeniero civil, estudiante de maestría, <sup>b</sup>Ingeniero civil, PhD, <sup>c</sup>Ingeniero mecánico, PhD.  
Universidad del Valle.

[brayan.palencia@correounivalle.edu.co](mailto:brayan.palencia@correounivalle.edu.co)

### RESUMEN

Las estructuras en bambú representan una alternativa innovadora y sostenible en la construcción. El bambú es un material que se destaca por su resistencia y ligereza, esto la hace atractiva en la industria de la construcción. Esta investigación se enfocó en proponer y evaluar experimentalmente, el rendimiento de tres tipos de conexiones estructurales utilizando latas de bambú. Estas conexiones se diseñaron para ser utilizadas en estructuras de cubiertas modulares, sometidas a carga axial monotónica. En este trabajo se caracterizó el rendimiento de las conexiones propuestas considerando los modos de falla, la capacidad de carga y la ductilidad. Los elementos que conforman las conexiones están fabricados con latas de bambú de la especie de *Angustifolia Kunth*. Los resultados preliminares mostraron que las conexiones propuestas resisten eficazmente el comportamiento frágil del bambú ante cargas axiales.

### ABSTRACT

*Bamboo structures represent an innovative and sustainable alternative in construction. Bamboo is a material that stands out for its strength and lightness which makes it attractive in the construction industry. This research focused on proposing and experimentally evaluating the performance of three types of structural connections using bamboo slats. These connections were designed to be used in modular roof structures subjected to monotonic axial loading. In this work, the performance of the proposed connections was characterized by considering failure modes, load capacity, and ductility. The elements that make up the connections are manufactured with bamboo slats of the *Angustifolia Kunth* species. Preliminary results showed that the proposed connections effectively resist the brittle behavior of bamboo under axial loads.*

Organiza:

## INTRODUCCIÓN

El interés en el bambú como material de construcción ha aumentado significativamente en los últimos años, motivado por su capacidad para mitigar la huella de carbono en comparación con métodos constructivos convencionales. Al igual que materiales como la madera, el bambú tiene la capacidad de capturar y almacenar CO<sub>2</sub> atmosférico durante su crecimiento, siendo aún más eficiente debido a su rápido ciclo de madurez, que puede tomar tan solo unos cinco años para alcanzar su pleno desarrollo (Göswein et al., 2022). Este aspecto lo convierte en una alternativa atractiva y sostenible para la construcción.

Las estructuras de bambú ofrecen una combinación única de resistencia y ligereza, características esenciales para aplicaciones estructurales en la industria de la construcción. Sin embargo, el diseño de conexiones estructurales para el bambú presenta desafíos particulares debido a la naturaleza hueca de sus tallos y la disposición unidireccional de sus fibras (Marchi et al., 2023). Tradicionalmente, las conexiones más utilizadas han sido las de clavijas, que incluyen métodos como el uso de pernos, tornillos y clavos para unir los culmos de bambú (Correal et al., 2021).

Recientemente, se ha investigado intensamente el uso de conexiones atornilladas en el bambú, desafiando la percepción de que este método conlleva un alto riesgo de grietas y fallos prematuros (Yang et al., 2023). A diferencia de las conexiones clavadas, donde el material puede fracturarse debido a tensiones tangenciales durante la inserción, los tornillos autoperforantes ofrecen una alternativa que minimiza el desplazamiento del material y reduce la posibilidad de daños (Cui et al., 2024).

Las conexiones atornilladas no solo tienen el potencial de reducir la necesidad de mortero de cemento, con su alta huella de carbono asociada, sino que también pueden mejorar la robustez estructural al distribuir eficazmente las cargas, cumpliendo con estándares de resistencia como los establecidos por la norma ISO 22156:2021 (Malkowska et al., 2022). Este enfoque no solo mejora la sostenibilidad de las estructuras de bambú, sino que también facilita su desmontaje y reutilización, un aspecto crucial en términos de economía circular y eficiencia de recursos en la construcción (Zhang et al., 2023).

La investigación actual se centra en el diseño y evaluación experimental de tres tipos de conexiones estructurales utilizando latas de bambú de la especie *Angustifolia Kunth*. Estas conexiones fueron diseñadas específicamente para aplicaciones en estructuras de cubiertas modulares, sometidas a cargas axiales monotónicas, y han sido evaluadas para caracterizar su rendimiento bajo diferentes condiciones de carga.

El presente estudio contribuye al campo emergente de la ingeniería de materiales sostenibles y estructurales, proporcionando nuevos conocimientos sobre el comportamiento mecánico de las conexiones con latas de bambú y explorando su potencial para aplicaciones estructurales avanzadas. A través de la combinación innovadora de latas de bambú y acero en las conexiones propuestas, se busca no solo mejorar la resistencia y la durabilidad, sino también establecer un precedente para futuras investigaciones en el diseño de estructuras ecoamigables.

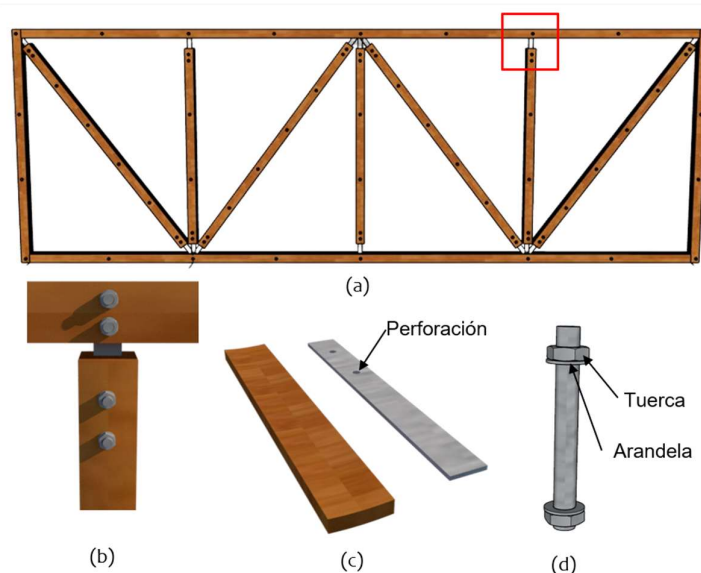
Organiza:

## METODOLOGÍA

### Conexiones propuestas

La Figura 1 muestra la propuesta de un prototipo de conexión para estructuras de cubierta modulares construidas en bambú. La conexión consiste en latas de bambú, platinas de refuerzo de acero, pernos, tuercas y arandelas. La implementación de este tipo de conexión se enfoca para la unión de un prototipo de cercha plana.

La conexión ofrece varias ventajas: primero, los materiales de acero utilizados son de calidad normalizada, lo que garantiza un alto nivel de fiabilidad. Segundo, la utilización del bambú proporciona una alta relación resistencia-peso a pesar de ser un material liviano, el bambú tiene una gran resistencia a la tracción y compresión (Lee et al., 2022). Tercero, los materiales utilizados son fácilmente accesibles, lo que facilita su adquisición y uso. Cuarto, el diseño modular facilita el ensamblaje y la instalación, haciendo que el proceso de construcción sea más eficiente. En conjunto, la combinación de bambú y acero asegura una conexión robusta, capaz de soportar cargas significativas en estructuras de cubiertas (Li et al., 2023).

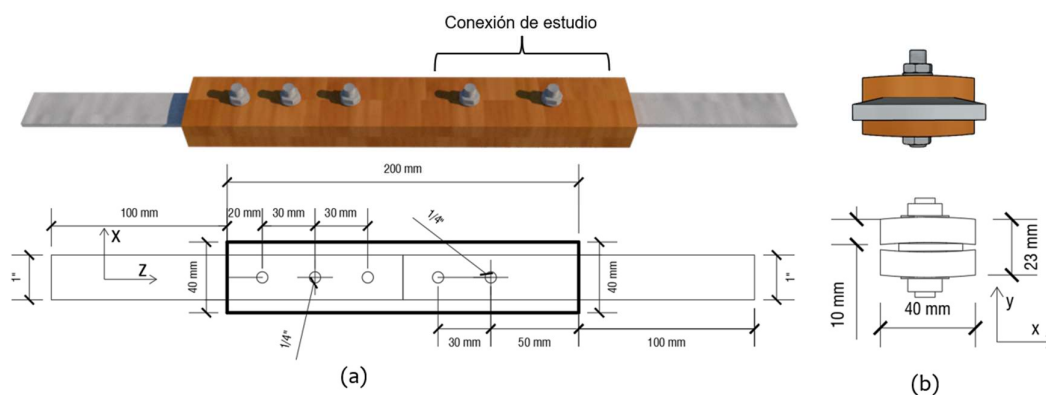


*Figura 1. (a) Propuesta de cercha plana. (b) Conexión entre dos elementos, (c) Lata de bambú y platina de acero y (d) Perno con tuerca y arandela.*

Esta investigación tiene como objetivo proponer y evaluar experimentalmente el comportamiento de los prototipos de conexiones bajo carga axial monotónica. En particular, el estudio examina el efecto de la distancia entre el borde de la lata de bambú y la posición de la perforación de la unión atornillada. Además, se analiza la variabilidad en el número de latas de bambú utilizadas. Para ello, se desarrollan y evalúan dos tipos, como se muestra en las **Figuras 2 y 3**, cada uno diseñado para investigar los aspectos mencionados.

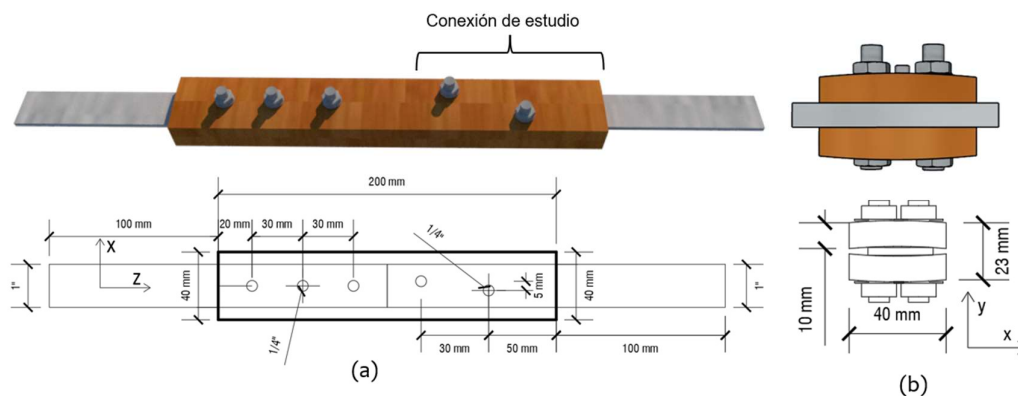
Organiza:

Los prototipos de conexiones están contruidos con latas de bambú de la especie *Angustifolia Kunth*. La conexión tipo A consisten en dos latas o listones de bambú, derivados de un culmo, con un espesor aproximado de 10 mm, ancho de 40 mm y una longitud de 200 mm. Además, incluyen platinas de acero A36 de 1 pulgada de ancho y de espesor de 3 mm colocadas entre las dos latas de forma paralela. Tanto las latas como la lámina de acero están perforadas por dos pernos hexagonales de acero grado 8 de 1/4 de pulgada, ubicados a 50 mm desde el borde de la lata y a 30 mm entre centros. Finalmente, estas conexiones están aseguradas en cada extremo mediante tuercas y arandelas.



**Figura 2. Conexión tipo A. (a) sección longitudinal (b) Sección transversal.**

Las conexiones tipo B consiste en latas de bambú y láminas de acero perforadas de manera no lineal entre los ejes de los pernos. En la Figura 3, se observa que los pernos están ubicados de forma alternada, con una separación de 5 mm entre centros en el eje (x) y de 30 mm en el eje (z). Además, cada conexión está asegurada en ambos extremos mediante tuercas y arandelas.



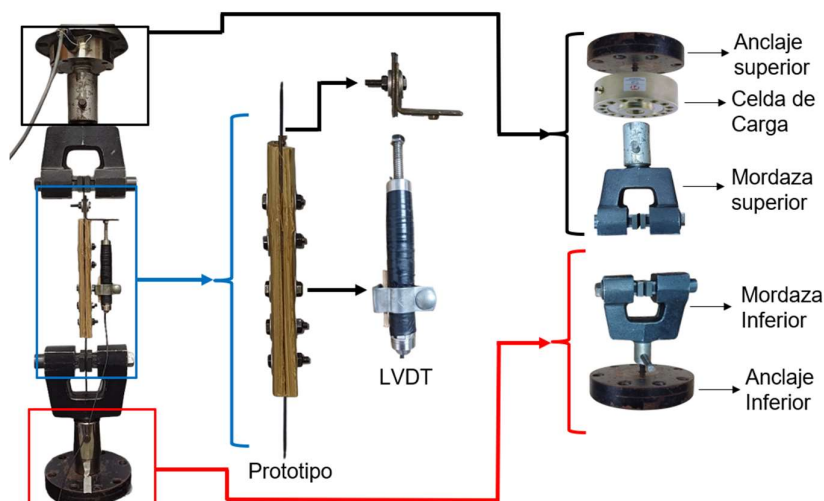
**Figura 3. Conexión tipo B. (a) sección longitudinal (b) Sección transversal.**

Organiza:

## Montaje para ensayos

Los ensayos a los prototipos de conexiones se llevaron a cabo en la máquina universal ubicada en la Escuela de Ingeniería Civil y Geomática de la Universidad del Valle. En la Figura 4 se muestra la preparación y el montaje de los prototipos ensayados a tracción. Para la sujeción de los prototipos, se instaló en la parte inferior de la máquina el anclaje de una mordaza gradual para asegurar el alineamiento de la muestra. De manera similar, en la parte superior donde se ejercerá la carga se colocó otra mordaza gradual de alineamiento. Para medir la capacidad de carga de los prototipos se utilizó una celda de carga de tracción y compresión de la marca PT Ltd., con una capacidad de 2.5 toneladas, la cual se ancló en la parte superior del travesaño de la máquina, sujetando la mordaza.

Para medir los desplazamientos de los prototipos de latas de bambú, tal como se observa en la Figura 4 se fijó un transformador diferencial variable lineal (LVDT) sobre el cuerpo de los prototipos. Además, se instaló una platina en L atornillada de forma perpendicular a la muestra para el contacto del indicador. Cabe mencionar que se evaluaron únicamente las conexiones en la parte superior del prototipo, mientras que en la parte inferior el número de tornillos siempre era superior al de la conexión ensayada. Esto garantizaba que la falla ocurriera en la zona de interés, es decir, la parte superior.



*Figura 4. Montaje experimental para ensayos de conexiones a tracción.*

Los ensayos se realizaron aplicando una carga a corto plazo a una velocidad constante de 0.06 mm/s. La máquina universal permitió controlar de manera precisa las velocidades de las pruebas, asegurando una aplicación uniforme de la carga. Además, se utilizó un sistema de adquisición inalámbrico para registrar detalladamente los datos de la prueba. Este sistema permitió monitorear en tiempo real la aplicación de la carga y el desplazamiento relativo de la conexión durante las pruebas.

Organiza:

## Carga máxima

La capacidad de carga máxima determinada durante las pruebas de las conexiones se denota como  $F_{max}$ , mientras que la carga última o de fallo se denota como  $F_u$ . El desplazamiento correspondiente a la carga última, conocido como  $v_u$ , se determina como el punto en la curva de carga-desplazamiento en el que la carga, después de alcanzar su pico, desciende hasta el 85% de  $F_{max}$ . Este proceso se ilustra claramente en la **Figura 5**.

Para los casos en que las conexiones fallan de forma frágil, el valor de  $v_u$  se define en el momento exacto de la falla. En estos escenarios, la carga última  $F_u$  coincide generalmente con la carga máxima  $F_{max}$  debido a la ausencia de una fase de degradación progresiva antes de la ruptura. Por lo tanto, en las conexiones con fallo frágil,  $F_u$  y  $F_{max}$  son equivalentes, reflejando una transición abrupta de la carga máxima a la falla sin una fase intermedia de reducción gradual de la carga.

## Determinación de la rigidez

La rigidez de la conexión, denotada como  $K_e$ , se determinó siguiendo la metodología establecida en el estudio de Harries et al. (2022). En dicho estudio, se menciona que la rigidez se calcula mediante la pendiente de la curva de carga-desplazamiento entre dos puntos específicos:  $F_1$ , correspondiente al 10% de la carga máxima  $0.1F_{max}$ , y  $F_2$ , correspondiente al 40% de la carga máxima  $0.4F_{max}$ . Este método se ilustra en la Figura 5, donde se describe detalladamente, y para obtener el resultado se utiliza la Ecuación 1.

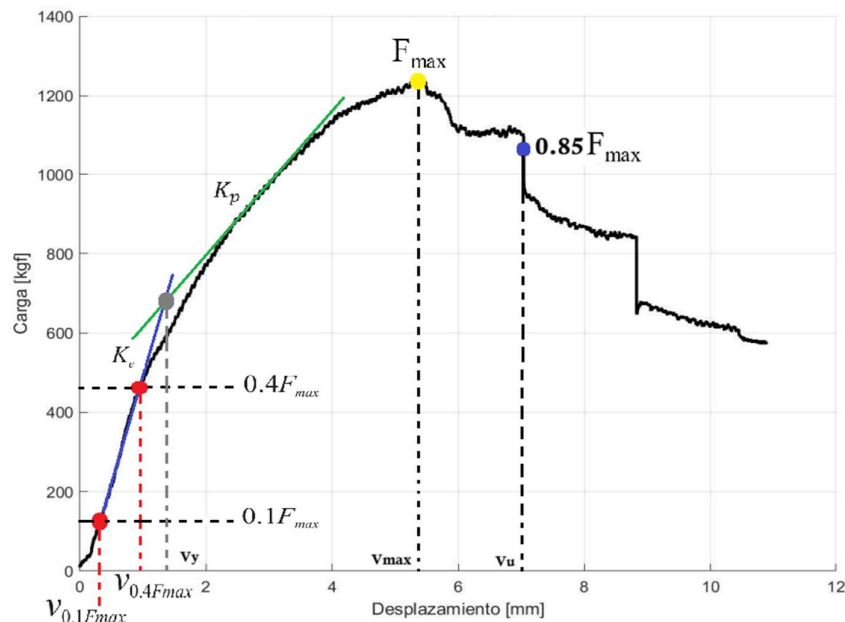
$$K_e = \frac{0.4F_{m\acute{a}x} - 0.1F_{m\acute{a}x}}{v_{0.4F_{m\acute{a}x}} - v_{0.1F_{m\acute{a}x}}} \quad (1)$$

Es importante destacar que, para obtener una estimación precisa de la rigidez, la diferencia entre las cargas en los puntos  $F_1$  y  $F_2$  debe ser significativa. En términos específicos, la relación de la diferencia de cargas  $F_2 - F_1$  debe ser al menos el 30% de la carga máxima ( $0.3F_{max}$ ) para asegurar una evaluación adecuada de la rigidez de la conexión. Este criterio garantiza que la pendiente calculada represente de manera fiable la rigidez estructural de la conexión bajo condiciones de carga dentro de los rangos elásticos.

Organiza:

### Determinación de la carga de fluencia

El límite elástico de la conexión, denotado como  $F_y$ , se calculó siguiendo el procedimiento descrito por Paraskeva et al. (2019). En este método,  $F_y$  se determina a partir de la intersección de dos líneas: la primera línea representa la rigidez inicial de la conexión con una pendiente  $K_e$ , mientras que la segunda línea representa la rigidez posterior al pico  $K_p$ , trazada de forma tangencial a la porción de la curva de carga-desplazamiento que sigue al límite elástico. Esta intersección marca el punto donde la conexión comienza a experimentar deformaciones plásticas significativas.



*Figura 5. Puntos importantes de carga y desplazamiento para determinar rigidez y ductilidad.*

Para determinar el valor de  $K_p$ , se empleó la Fórmula 2, especialmente adecuada para casos donde se observa degradación en la rigidez después de la fluencia.

$$K_p = \frac{K_e}{6} \quad (2)$$

Organiza:

## Ductilidad

La ductilidad de la conexión se define como la relación entre el desplazamiento último ( $v_u$ ) y el desplazamiento de fluencia ( $v_y$ ) como se describe en la Formula 3 (Pradhan et al., 2020). El desplazamiento último se determina considerando el 85% de la carga máxima después del fallo, lo cual refleja la capacidad de la conexión para deformarse considerablemente antes de llegar al punto de fallo.

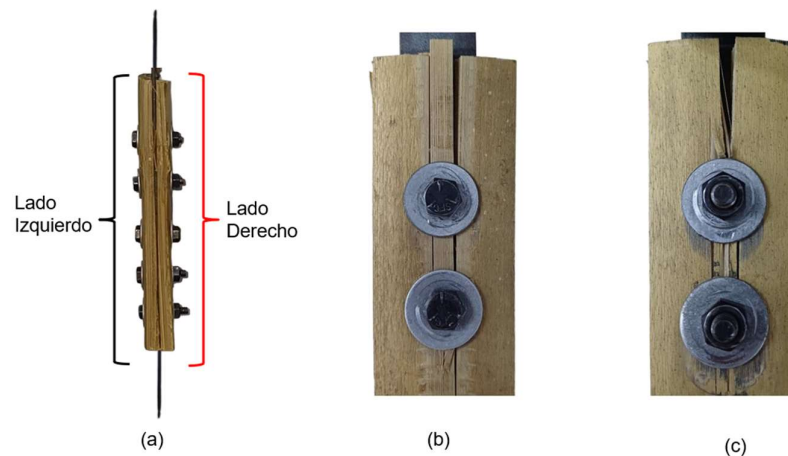
$$\mu = \frac{v_u}{v_y} \quad (3)$$

Es importante destacar que las conexiones en estructuras portantes deben exhibir una ductilidad mínima de 1.25 ( $\mu \geq 1.25$ ). En el caso de las conexiones resistentes a momentos, esta ductilidad debe ser de al menos 2.0 ( $\mu \geq 2.0$ ), mientras que para aquellas que forman parte del sistema principal de resistencia a fuerzas sísmicas, se requiere una ductilidad mínima de 2.5 ( $\mu \geq 2.5$ ) (Malkowska et al., 2023).

## RESULTADOS Y DISCUSIONES

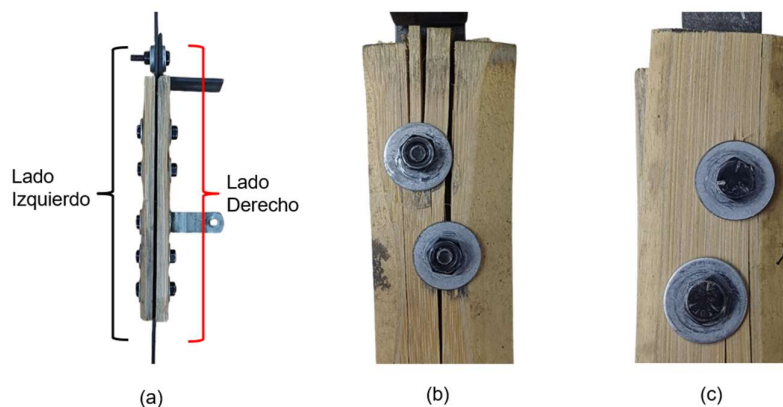
### Modos de fallo

Durante los ensayos realizados en las conexiones, se observó un modo de fallo tanto en la conexión tipo A y B caracterizado por la rotura de la lata de bambú debido a cizalladura. Este comportamiento reveló que la capacidad de la conexión estaba principalmente limitada por la resistencia del bambú a las fuerzas cortantes aplicadas. En la Figura 6 y en la Figura 7 se puede apreciar que en los orificios donde se ubicaron los pernos, se generó una concentración excesiva de esfuerzos que resultó en un corte por cizalladura a lo largo de las fibras de las latas de bambú.



**Figura 6. Modo de fallo de conexiones tipo A, (a) Prototipo ensayada, (b) Fallo lado derecho, (c) Fallo lado izquierdo.**

Organiza:



**Figura 7. Modo de fallo de conexiones tipo B, (a) Prototipo ensayada, (b) Fallo lado derecho, (c) Fallo lado izquierdo.**

### Gráficos carga – desplazamiento

En las Figura 8 y 9 se presentan los diagramas carga-desplazamiento de los ensayos a tracción realizados en las conexiones tipo A y B de latas de bambú. Durante la prueba de la conexión tipo A, se registró una carga máxima de 1226.34 *kgf*, alcanzada a 88 segundos después del inicio de la prueba. Durante este proceso, se observó un desplazamiento de 2.03 *mm*. Por otro lado, la conexión Tipo B, se registró una carga máxima de 1438 *kgf* en un tiempo de 120 segundos, acompañada de un desplazamiento de 3.05 *mm*.

En términos de diseño y aplicación práctica, los resultados indican que al alternar la ubicación de los pernos en la conexión permite alcanzar una carga máxima hasta un 16% mayor que la registrada en la conexión tipo A.

### Rigidez y ductilidad

#### Conexiones tipo A

Los valores de la rigidez elástica se determinaron según la metodología descrita anteriormente. Para las conexiones tipo A, se establecieron los valores correspondientes al 10% de la carga máxima  $0.1F_{max} = 122.63 \text{ kgf}$  y al 40% de la misma  $0.4 = 490.54 \text{ kgf}$ . Luego, se hallaron los desplazamientos asociados a estos valores, resultando en  $V_{0.1F_{max}} = 0.038 \text{ mm}$  y  $V_{0.4F_{max}} = 0.183 \text{ mm}$ . A partir de estos valores, se calculó la rigidez elástica  $K_e$ , obteniendo un valor de 2534.26 *kg/mm*. Además, se determinó el valor de  $K_p$  en 422.38 *kg/mm*.

Mediante la intersección de estas dos pendientes, se identificó el desplazamiento en el cual la conexión finaliza su comportamiento elástico, obteniendo una ductilidad de  $\mu = 109.22$ . En este estudio, las juntas no presentaron deslizamiento ni fricción

Organiza:

iniciales durante la prueba.

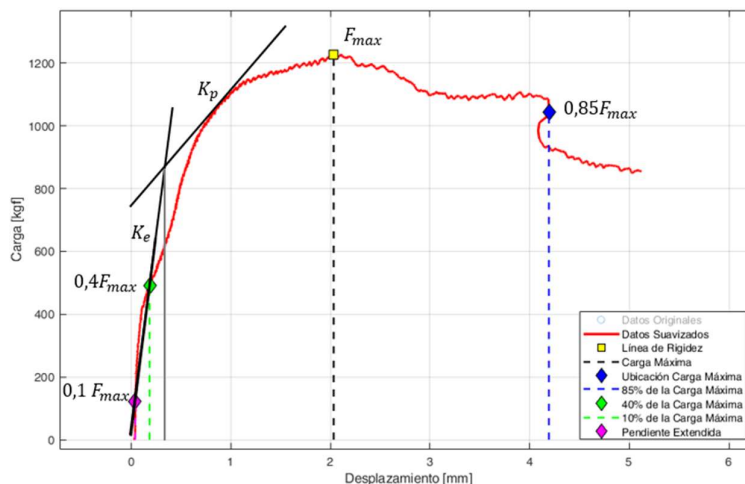


Figura 8. Diagrama de carga – desplazamiento de la conexión tipo A.

### Conexiones tipo B

Para las conexiones tipo B, se establecieron los valores correspondientes al 10% y al 40% de la carga máxima, similares a las conexiones tipo A. Los resultados fueron  $0,1 F_{max} = 143.80 \text{ kgf}$  y  $0,4 F_{max} = 575.21 \text{ kgf}$ . Los desplazamientos asociados a estos valores de carga fueron  $V_{0,1 F_{max}} = 0.081 \text{ mm}$  y  $V_{0,4 F_{max}} = 0.137 \text{ mm}$ .

A partir de estos valores, se calculó la rigidez elástica  $K_e$ , obteniendo un valor de  $7716.86 \text{ kg/mm}$ , y se determinó  $K_p = 1286.14 \text{ kg/mm}$ . Finalmente, se obtuvo una ductilidad en el prototipo de  $\mu = 50$ .

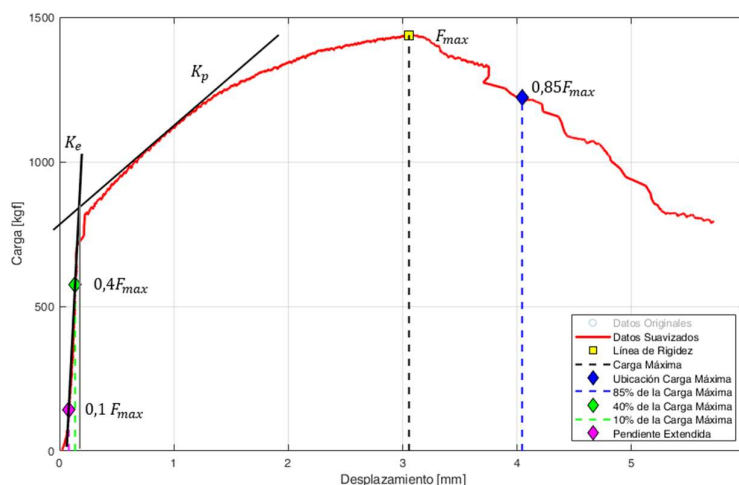


Figura 9. Diagrama de carga – desplazamiento de la conexión tipo A.

Organiza:

## CONCLUSIONES

La investigación demuestra que la conexión Tipo B, con tornillos dispuestos de manera no alineada, presenta una capacidad de carga superior en comparación con la conexión Tipo A. La disposición de los pernos en la conexión Tipo B permite alcanzar una carga máxima significativamente mayor, mejorando así la resistencia estructural de las uniones de bambú. Este diseño optimizado incrementa la capacidad de carga en un 16% en comparación con la conexión Tipo A, evidenciando su efectividad en aplicaciones donde se requiere una mayor capacidad de soporte de carga.

En términos de rigidez estructural, las conexiones Tipo B también mostraron un desempeño notablemente mejor. La rigidez elástica de las conexiones Tipo B fue considerablemente mayor, lo que sugiere una distribución más eficiente de las fuerzas aplicadas y una mejora en la estabilidad y resistencia de la conexión. Este aumento en la rigidez es esencial para garantizar la integridad estructural bajo condiciones de carga, ofreciendo una solución más robusta para las construcciones de bambú.

Aunque ambas conexiones exhibieron altos niveles de ductilidad, la conexión Tipo A mostró una mayor capacidad para deformarse plásticamente antes de fallar. Esta característica es particularmente beneficiosa en aplicaciones donde se requiere una mayor absorción de energía, como en situaciones de carga dinámica o impactos. La mayor ductilidad de la conexión Tipo A proporciona una ventaja en términos de capacidad de deformación, lo cual es crucial para prevenir fallos catastróficos y aumentar la seguridad estructural.

Los modos de fallo observados en los ensayos revelaron que la resistencia del bambú a las fuerzas cortantes es un factor limitante clave. La rotura de la lata de bambú por cizalladura fue el modo de fallo predominante en ambas conexiones, subrayando la necesidad de mejorar la resistencia del material o reconsiderar el diseño de la disposición de los pernos.

Finalmente, las conexiones atornilladas ofrecen ventajas significativas en términos de sostenibilidad y eficiencia. Al reducir la necesidad de mortero de cemento, que tiene una alta huella de carbono, y facilitar el desmontaje y la reutilización de las estructuras, estas conexiones contribuyen a prácticas de construcción más ecoamigables.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores, miembros del Grupo RISK y Grupo Biomecánica, agradecen al proyecto “Desarrollo de un sistema de impresión 3D de materiales no convencionales sostenibles para el avance de la infraestructura rural del departamento del Cauca” de la Universidad del Valle, financiado a través de la convocatoria 6 del bienio 2021-2022 del Sistema General de Regalías (SGR) (BPIN 2020000100625).

Organiza:

## BIBLIOGRAFÍA

Correal, J. F., Prada, E., Suárez, A., y Moreno, D. (2021, 10). Bearing capacity of bolted-mortar infill connections in bamboo and yield model formulation. *Construction and Building Materials*, 305 , 124597. doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2021.124597

Cui, W., Wei, Y., y Ji, N. (2024, 1). Global trends of waste-to-energy (wte) technologies in carbon neutral perspective: Bibliometric analysis. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 270 , 115913. doi: 10.1016/J.ECOENV.2023.115913

Göswein, V., Arehart, J., Phan-Huy, C., Pomponi, F., y Habert, G. (2022). Barriers and opportunities of fast-growing biobased material use in buildings. *Buildings and Cities*, 3 , 745-755. doi: 10.5334/BC.254

Lee, G. Z., Looi, D. T., Choo, C. S., y Tsang, H. H. (2022, 1). A reconnaissance study on tensile strength of bamboo based on global database. *Materials Today: Proceedings*, 64 , 1109-1115. doi: 10.1016/J.MATPR.2022.06.047

Li, H., Wei, Y., Yan, L., Semple, K. E., y Dai, C. (2023, 8). Structural behavior of steel dowel-reinforced cross-laminated bamboo and timber beams. *Composite Structures*, 318 , 117111. doi: 10.1016/J.COMPSTRUCT.2023.117111

Malkowska, D., Norman, J., y Trujillo, D. (2022, 8). Theoretical and experimental study on laterally loaded nailed bamboo connection. *Construction and Building Materials*, 342 , 127971. doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2022.127971

Malkowska, D., Trujillo, D., Toumpanaki, E., y Norman, J. (2023, 9). Study of screwed bamboo connection loaded parallel to fibre. *Construction and Building Materials*, 398 . doi: 10.1016/j.conbuildmat.2023.132532

Marchi, M., Marchettini, N., Neri, E., Esposito, G., Niccolucci, V., Pulselli, F. M., . . . Pulselli, R. M. (2023, 9). Carbon footprint offset of a managed bamboo plantation in temperate regions. *Sustainable Production and Consumption*, 40 , 220-235. doi: 10.1016/J.SPC.2023.05.025

Paraskeva, T., Pradhan, N. P., Stoura, C. D., y Dimitrakopoulos, E. G. (2019, 3). Monotonic loading testing and characterization of new multi-full-culm bamboo to steel connections. *Construction and Building Materials*, 201 , 473-483. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.12.198

Pradhan, N. P., Paraskeva, T. S., y Dimitrakopoulos, E. G. (2020, 1). Quasi-static re-verses cyclic testing of multi-culm bamboo members with steel connectors. *Journal of Building Engineering*, 27 . doi: 10.1016/j.jobbe.2019.100983

Organiza:



Yang, D., Li, H., Hong, C., y Lorenzo, R. (2023, 10). Performance of single-bolted laminated flattened-bamboo connection with steel plate under compression parallel to grain – an experimental and numerical study. *Construction and Building Materials*, 401 , 132774. doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2023.132774

Zhang, M., Huang, Y., Fan, H., Pu, Y., Yu, Z., Zhao, S., . . . Parke, G. (2023, 8). A method to calculate the load-carrying capacity of bolted steel-bamboo scrimber- steel connections. *Journal of Building Engineering*, 72 , 106743. doi: 10.1016/J.JOBE.2023.106743

Organiza:



Tel/Fax: [+54] 11 5252.8838 | Whatsapp: [+54 9] 11 3180.3746 | Hipólito Yrigoyen 1144 Piso 1° - Of. 2 | Buenos Aires  
Horario de atención: de lunes a viernes de 13:00 a 18:00 hs. | Mail: [info@jornadasaie.org.ar](mailto:info@jornadasaie.org.ar) - [www.jornadasaie.org.ar](http://www.jornadasaie.org.ar)