

Structural bamboo joints: performance criteria based on tests.

Uniones estructurales de bambú: criterios de su desempeño a partir de ensayos.

Autor:

Jaramillo Hurtado, Johe Luis
UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA, UTPL
Graduado de Ingeniería Civil
Loja – Ecuador



johejara@hotmail.com



<https://orcid.org/0000-0003-0004-0806>

Citación/como citar este artículo: Jaramillo Hurtado, Johe Luis. (2023). Uniones estructurales de bambú: criterios de su desempeño a partir de ensayos. MQRInvestigar, 7(2), 381-396.
<https://doi.org/10.56048/MQR20225.7.2.2023.381-396>

Fechas de recepción: 01-MAR-2023 aceptación: 13-ABR-2023 publicación: 15-JUN-2023



<https://orcid.org/0000-0003-0004-0806>
<http://mqrinvestigar.com/>



Resumen

Las primeras normas de construcción con bambú se publicaron a inicios del presente siglo, por lo que no pueden considerarse acabadas. Dentro de ellas, las conexiones, por su extrema complejidad, constituyen elementos poco definidos y son un reto para el diseño estructural. Esto, unido a las características físicas del bambú, es decir, su alta variabilidad, presencia de culmos huecos, de sección curva no uniforme en toda su longitud, no perfectamente rectos y de espesor relativamente pequeño, incrementan la dificultad para el cálculo y hace necesario utilizar diseños que logren resistencia y seguridad. Por ello se realizó una revisión integrativa de investigaciones publicadas, basadas en ensayos estructurales con diferentes tipos de estas uniones. El objetivo fue determinar los tipos de conexiones que ofrecen mejor desempeño estructural según los resultados de ensayos, identificar los principales elementos que contribuyen a su fallo y emitir consideraciones de diseño que permitan incrementar su resistencia y durabilidad. La búsqueda bibliográfica abarcó 287 documentos, utilizando pares de palabras clave. Se seleccionaron los 12 artículos originales que mostraron ensayos realizados con dichas conexiones. Los resultados indicaron la necesidad de utilizar conexiones reforzadas, sin perforaciones ni cortes en el culmo, a través del uso de abrazaderas, que permiten diseños flexibles y sencillos. Los estudios publicados a partir de la realización de ensayos en uniones de bambú son escasos, por lo que es imprescindible el desarrollo de investigaciones de este tipo que provean de herramientas prácticas y confiables a los profesionales que trabajan con estos sistemas.

Palabras claves: Conexiones con bambú, Resistencia, Diseño, Durabilidad, Ensayos.

Abstract

The first bamboo construction standards were published at the beginning of this century, so they cannot be considered finished. Within them, the connections, due to their extreme complexity, constitute poorly defined elements and are a challenge for structural design. This, together with the physical characteristics of bamboo, that is, its high variability, presence of hollow culms, non-uniform curved section along its entire length, not perfectly straight and relatively small in thickness, increase the difficulty of the calculation and make it necessary use designs that achieve strength and safety. For this reason, an integrative review of published research was carried out, based on structural tests with different types of these joints. The objective was to determine the types of connections that offer the best structural performance according to the test results, identify the main elements that contribute to their failure and issue design considerations that allow increasing their resistance and durability. The bibliographic search covered 287 documents, using pairs of keywords. The 12 original articles that showed tests carried out with these connections were selected. The results indicated the need to use reinforced connections, without drillings or cuts in the culm, but the use of clamps, which allow flexible and simple designs. The studies published from the performance of tests on bamboo joints are scarce, so it is essential to develop research of this type that provides practical and reliable tools to professionals who work with these systems.

Keywords: Bamboo connections, Strength, Design, Durability, Testing.

Introducción

La limitación de recursos naturales no renovables para producir materiales de construcción y la necesidad de preservar el medio ambiente para futuras generaciones con garantía para la supervivencia del planeta y de la especie humana, hacen imprescindible la búsqueda de alternativas para la construcción, sobre todo en el sector habitacional. En este sentido, el bambú se ha revelado como material idóneo (Aguilar et al., 2020). Los sistemas constructivos basados en el uso del bambú han demostrado amplias ventajas con relación a los convencionales, que utilizan el hormigón armado (Bello, 2021). Entre ellas está su rápido crecimiento y reposición natural, pudiendo alcanzar los 25 m en seis meses (Kaminski et al., 2016); alcanza su máxima resistencia entre los 4 a 6 años de sembrado (Aguilar et al., 2020); es ecológico, ya que protege los suelos y el aire, es orgánico, biodegradable y reciclable (Villegas et al., 2018); tiene buen comportamiento estructural y sismo resistente (Martínez-Forero, 2018); es económico (Morán-Ubidia, 2015), desde el punto de vista socio cultural favorece la recuperación de tradiciones constructivas, en cuanto a técnicas y oficios para la satisfacción de necesidades habitacionales que incluyen las de la población con bajos ingresos (Bello, 2021). Todo ello lo convierte en un material sustentable.

Sin embargo, la durabilidad es la principal desventaja de los sistemas constructivos basados en el uso del bambú, frente a los convencionales, que utilizan hormigón armado, pues es vulnerable a factores ambientales y biológicos, relacionados con su naturaleza química (Archila et al., 2018). La presencia de humedad, la incidencia directa del sol y el ataque de insectos y hongos, disminuyen sensiblemente la resistencia de las estructuras de bambú, por lo que requiere de tratamientos preventivos y constante mantenimiento. No obstante, con el diseño y el mantenimiento adecuados pueden durar más de cincuenta años (Morán-Ubidia, 2015).

A pesar de su buen desempeño estructural, el bambú no muestra un comportamiento similar al acero, pues resiste muy bien la compresión, flexión y tensiones paralelas a las fibras, como ocurre en las columnas, pero es más débil que la madera cuando se somete a esfuerzos perpendiculares, como en el caso de las vigas (Kaminski et al., 2016; Hong et al., 2019). Por esta razón y por el poco espesor de las paredes del culmo es que las uniones son el elemento más difícil de solucionar en el diseño de la estructura, constituyen sus puntos más débiles y poco confiables, por lo que aún son un problema por resolver (Kaminski et al., 2016; Hu et al., 2021).

Aunque el uso del bambú como material en edificaciones data de hace siglos, las primeras normas estructurales se comenzaron a publicar recientemente, a inicios del actual milenio (Trujillo, 2018). No todos los países donde el bambú es un recurso natural, cuentan con normas de este tipo, el cálculo es complejo y muchas no abarcan todos los aspectos del diseño estructural, siendo la norma colombiana la más completa, a pesar de presentar fallas y omisiones (Trujillo, 2018). Por eso, para lograr situar al bambú como material convencional de construcción, es necesario establecer estándares en los criterios de diseño y cálculo, plantear valores y rangos a cumplir para las propiedades mecánicas, establecer factores de

seguridad más predecibles y emitir guías oficiales que regulen los procesos adecuados de producción y preservación (Sánchez-Vivas et al., 2019). Esto incluye la necesidad de estandarizar las conexiones (Benitez et al., 2016). Esta tarea continua siendo difícil, pues el bambú tiene una sección altamente variable e irregular, a lo largo del culmo (no perfectamente cilíndrico, ni recto) con espesores relativamente reducidos y cavidad interna (Hong et al., 2019).

Los ensayos estructurales constituyen una herramienta eficaz para evaluar las prestaciones de las uniones, evitando la realización de cálculos complejos. Pero son costosos, se requiere de muchas pruebas para emitir conclusiones y en ocasiones falta el conocimiento para realizarlos (Trujillo, 2018). Por eso, atender a los hallazgos de las investigaciones basadas en ensayos, divulgarlos e incorporar sus aportes a la práctica constructiva, permitirá perfeccionar el conocimiento en este campo y prolongar la vida útil de estas estructuras para lograr gradualmente superar su principal desventaja con respecto a sistemas constructivos más duraderos (Sánchez-Vivas et al., 2019).

Por eso, se realizó una revisión bibliográfica con el objetivo de determinar los tipos de conexiones que ofrecen mejor desempeño, según los resultados de investigaciones publicadas y realizadas a través de ensayos; identificar los principales elementos que contribuyen a su fallo y emitir consideraciones de diseño que permitan incrementar su resistencia y durabilidad.

Material y métodos

Se realizó una revisión integrativa, mediante el empleo del método de Ganong, que se basa en la comparación de los resultados de investigaciones, a partir de cumplir con seis etapas (Ganong, 1987).

La primera etapa comenzó con el planteamiento de las preguntas que guiaron la búsqueda. En este caso fueron: ¿qué tipos de conexiones ofrecen mejor desempeño estructural, según los resultados de investigaciones publicadas y realizadas a través de ensayos?; ¿cuáles son los principales elementos que contribuyen a su fallo? y ¿qué elementos de su diseño pueden contribuir a incrementar su resistencia y durabilidad?

En segundo lugar, se plantearon los criterios de inclusión y de exclusión de los documentos que integraron la muestra analizada. La selección respondió a artículos originales y ponencias publicadas, basados en pruebas estructurales realizadas en conexiones de bambú en los últimos cinco años. Esta selección garantiza la actualidad, la fundamentación científica, la precisión y la confiabilidad de los datos que aporta. Constituye resultados de investigaciones experimentales y cuantitativas, avaladas por revisiones de rigor, que pertenecen a autores con experiencia y prestigio internacional en el estudio del comportamiento estructural del bambú. Fueron excluidas publicaciones duplicadas, reflexiones, cartas, tesis y otros artículos que no cumplieron los requisitos de selección.

La búsqueda bibliográfica consideró 287 documentos, en español e inglés, obtenidos en bases de datos como Research Gate, Elsevier, Scielo, Scopus y Google Académico. La búsqueda se realizó con el empleo de pares de combinaciones de palabras clave.

La muestra (n) se conformó finalmente con 12 documentos escogidos para el análisis de sus resultados.

Como tercera etapa, fueron extraídos los datos de interés de los resultados de los estudios que integraron la muestra. Para ello se clasificaron las conexiones que fueron objeto de ensayos de laboratorio según las características de su diseño, atendiendo a dos grandes grupos o categorías: las que presentaron perforaciones en los culmos y las que no. Cada uno de estos grupos se clasificaron en conexiones con culmos huecos y las uniones en las cuales estos espacios se rellenaron con mortero. Se obtuvieron los resultados para la resistencia y tipos de fallo para cada una de estas categorías. Siguiendo esta organización, se identificaron y agruparon los principales resultados del comportamiento estructural de cada una de las conexiones probadas. Se elaboraron fichas, tablas de análisis y de comparación entre los datos. Estos sirvieron de base al análisis y síntesis de los resultados.

En cuarto lugar, se realizó el análisis de los principales resultados y se identificaron aspectos coincidentes y divergentes mostrados por las investigaciones.

En una quinta etapa se interpretaron los resultados para elaborar la discusión. En estas dos etapas, se organizaron resultados y criterios, sobre la base de la clasificación por categorías de diseño de las conexiones, expuesta con anterioridad y que se corresponde con los tópicos que aparecen en los Resultados y Discusión.

Finalmente se redactó el artículo de manera sintética, a partir de las principales evidencias encontradas, observando los principios éticos en cuanto a las citas y referencias a las investigaciones y resultados mostrados por los autores.

Resultados

La muestra

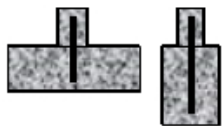
En la Tabla 1 se presentan los 12 documentos que integraron la muestra y los esquemas de los tipos de uniones que fueron objeto de ensayo, así como las especies de bambú utilizadas en estos estudios.

Tabla 1

Títulos, autores y años de los documentos que conformaron la muestra, clasificados según el tipo de unión, con la descripción y esquema de las conexiones utilizadas (n=12)

| Sin perforaciones del culmo | | | Con perforaciones en el culmo | | |
|---|-----|--|-------------------------------|--|---|
| Rellenas, con elemento adicional de refuerzo interior | con | Huecas, con aditamento exterior de refuerzo y sujeción | con | Huecas o rellenas, con refuerzo y sujeción | con aditamentos externos de refuerzo y sujeción |

• Venegas et al., 2019.



Uniones rellenas con mortero y refuerzo interior con barra roscada.

Prototipo con *Angustifolia Kunth*.

País: Colombia.

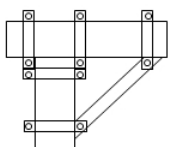
• Covillault y De Rycke, 2020.



Unión rellena con mortero y refuerzo interno de barra roscada. No especifica especie.

País: Francia.

• Morán et al., 2018.



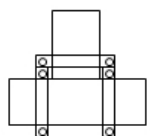
Unión viga-columna con transmisión de momento. Semi

abrazaderas metálicas a ambos lados, unidas entre sí con pernos.

Prototipo con *Angustifolia Kunth*.

País: Colombia.

• Villegas et al., 2018.



Unión columna-viga para carga transversal con semi anillos metálicos externos, unidos por pernos.

Prototipo con *Angustifolia Kunth*.

País: Colombia.

• García et al., 2017.

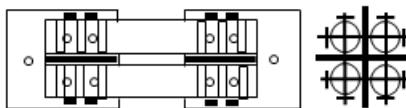


Unión entre semi abrazaderas unidas entre sí por pernos y el culmo.

Prototipo con *Angustifolia Kunth*.

País: Colombia.

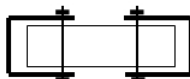
• Pradhan y Dimitrakopoulos, 2021.



Culmos múltiples, doble hilera de pernos con abrazaderas a ambos lados de estos y placa de acero central en forma de cruz, perforada para permitir unión. Se probaron uniones huecas y rellenas con mortero.

País: China

• Nie et al., 2022.

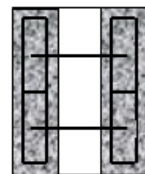


Pernos de diferentes diámetros, variando las distancias de los orificios finales, que perforan el culmo y con placas de abrazaderas que circundan sus extremos (en forma de “U”).

Prototipo con bambú Moso.

País: China.

• Wang et al., 2020.

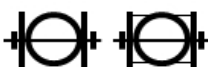


Pieza de bambú o de madera en el centro, perforada transversalmente por dos pasadores de acero de unión con dos piezas de hormigón armado, colocadas por ambos laterales.

No especifica especie.

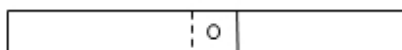
País: China.

• Masdar et al., 2019.



Unión con pernos que perforan el culmo y placas de madera, con y sin abrazaderas de madera a ambos lados. País: Indonesia.

• Kou et al., 2022.



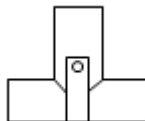
Comparación entre unión bambú-bambú y bambú-acero, en listones con perforaciones atornilladas. País: China.

• Martínez-Forero, 2018.

• Hu et al., 2021.



Unión con semi abrazaderas unidas entre sí con pernos. No especifica especie. País China.



Unión rellena con mortero, con corte en forma de boca de pez y platina de acero externa en forma de “U”, fija con perno que atraviesa de lado a lado el culmo. Prototipo con *Angustifolia* Kunth. País: Colombia.

Fuente: Elaborado por el autor

De los documentos que componen la muestra, seis (el 50%) corresponden a conexiones sin perforaciones en los culmos e igual número constituyen conexiones perforadas. De las del primer grupo, dos corresponden a uniones rellenas reforzadas con barras de acero en su interior, sin perforar el culmo (el 16,6%) y cuatro corresponden a uniones huecas, con abrazaderas, sin perforaciones en el culmo (el 33,4%). De las uniones del segundo grupo, cinco (el 41,7%) son conexiones huecas y solo una de las investigaciones estudió además el caso de uniones con rellenos de mortero (el 8,3%). Todas incluyen diferentes elementos y materiales, así como aditamentos externos para refuerzo y sujeción.

Con relación a los países de origen, una publicación corresponde a Francia (el 8,3%) una a Indonesia (el 8,3%) cinco a China (el 41,7%) e igual cantidad pertenece a Colombia (el 41,7%), lo que indica el desarrollo de ambos países en este tipo de investigaciones.

En los ensayos se aplicaron cargas estáticas paralelas y perpendiculares a las fibras para explorar las propiedades mecánicas de las conexiones, las capacidades de carga y los modos de falla de las diferentes configuraciones.

A continuación, se exponen los principales resultados obtenidos para cada uno de los dos grupos de uniones. La Tabla 2 muestra un resumen de los principales resultados, a nivel cualitativo, obtenidos al ensayar en condiciones de laboratorio los diferentes tipos uniones. Se expone el comportamiento en cuanto a la resistencia y las formas de fallo observadas.

Tabla 2

Resumen de los resultados por tipo de unión, según los ensayos practicados en las conexiones que conformaron la muestra

| Sin perforaciones del culmo | | | | Con perforaciones en el culmo | | | |
|--|---|-----|---|---|-----|--|-----|
| Rellenas, con elemento adicional de refuerzo interior | Huecas, con aditamento exterior de refuerzo y sujeción | con | y | Huecas, con aditamentos externos de refuerzo y sujeción | con | Rellenas, con aditamentos externos de sujeción | con |
| Resisten las cargas de diseño, con limitaciones. Afectaciones por cambios de | Resisten cargas de diseño, presentando rigidez y ductilidad aceptables. | | | No soportan grandes cargas, con baja ductilidad y rigidez. Los espacios entre la superficie del culmo y | | Mayor resistencia a compresión que las uniones huecas. | |

| | | | |
|--|---|--|---|
| volumen y humedad mortero. En fallos por cortante se pierde la adherencia mortero-culmo. Uniones “T” e “I” se comportan similar y resistencia aceptable. | Permiten la transmisión de cargas axiales, transversales y en algunos casos, momento. | los aditamentos propician tres tipos de fallos: por cortante del perno (ruptura total), fallo dúctil (aplastamiento de la perforación) y por punzonamiento (fractura y hundimiento del bambú a ambos lados del perno). | Fallo por cortante por los pernos, con separación de materiales al alcanzar la carga de diseño. Fallos en las zonas de los cortes realizados en el bambú. |
|--|---|--|---|

Fuente: Elaborado por el autor

A continuación, se detallan los resultados obtenidos para la resistencia y modos de fallo observados en los ensayos para cada tipo de conexión.

Uniones sin perforaciones en el culmo

- Rellenas, con elemento adicional de refuerzo interior

Estas uniones cumplieron las pruebas mecánicas, aunque con limitaciones (Covillault y De Rycke, 2020). Las uniones en forma de “T” y de “I” se comportaron de forma similar con resistencias aceptables (Venegas et al., 2019). Sin embargo, se produjeron afectaciones en el bambú debidas a cambios de volumen (expansión por humedad y compresión por secado de las fibras) por la humedad del mortero y la segregación del agua del mismo durante el fraguado. Se observaron fisuras por fraguado en el mortero y en la guadua. Cuando ocurre fallo por cortante, se pierde la adherencia y se debilita la unión.

- Huecas, con aditamento exterior de refuerzo y sujeción

En estas uniones se emplearon culmos con diámetro exterior de 110 mm y de 10 mm de espesor o superiores, pernos de 9,5 mm de diámetro y 25 mm de longitud, abrazaderas (pares de semi anillos) de 3,0 mm de espesor o más y 25 mm de ancho.

Este tipo de unión soportó adecuadamente las cargas estáticas y permitió la transmisión de cargas axiales y transversales (Villegas et al., 2018) y en algunos casos, momento (Morán et al., 2018). Mostraron excelente desempeño en su resistencia a cargas de diseño, con rigidez y comportamiento dúctil aceptables (Villegas et al., 2018; Morán et al., 2018; Hu et al., 2021).

Los dos modos que produjeron la falla en este tipo de unión son: por deslizamiento longitudinal continuo, después que la carga vertical alcanzó el pico de diseño y por atascamiento del aro de acero en la piel de bambú después de un período de deslizamiento (Hu et al., 2021).

Para el caso de la unión propuesta por Morán, et al., la resistencia y ductilidad de la conexión fue 373% y 595% respectivamente superior que otros tipos de conexiones, mientras que la rigidez fue mayor en un 6% (Morán et al., 2018). Se obtuvieron dispersiones en la rigidez de las muestras debido a las amplias diferencias en las holguras de los orificios de las abrazaderas, aspecto que debe controlarse. Funcionó como unión semi rígida, no articulada.

Uniones con perforaciones en el culmo

- Huecas, con aditamentos externos de refuerzo y sujeción

La presencia de pernos que perforan al bambú produjo tres tipos de fallos (Nie et al., 2022): por cortante del perno (ruptura total), fallo dúctil (por aplastamiento o deformación del orificio bajo tensión continua) y fallo por punzonamiento (se fractura y se hunde la superficie exterior del bambú a ambos lados del perno).

Estas fallas se produjeron a causa de los espacios que quedan en la superficie externa del bambú, entre los elementos que conforman la unión (culmo, perno y placas). A mayor espacio, aumentó el riesgo de fallo (Nie et al., 2022). Estas condiciones propiciaron momentos de flexión adicionales por esfuerzos cortantes del perno, que falló al usar diámetros pequeños (M8 y M10). Con diámetros grandes del perno y espacios pequeños entre este y la placa, el perno pudo asumir los momentos de flexión adicionales. Las cargas grandes produjeron aplastamiento hacia abajo del orificio, grietas y el perno sufrió flexión ligera. Ante cargas muy grandes, a pesar de emplearse un perno de diámetro superior y existir pequeños espacios entre los elementos de la unión, el perno no fue capaz de asumir la carga. En este caso, el bambú fue quien la soportó, pero la pared exterior se comprimió por el empuje del perno y aparecieron hundimientos y grietas a ambos lados de este. Esto ocurrió fundamentalmente en uniones cortas donde el orificio final del perno se encontraba muy cercano al punto de unión (Nie et al., 2022).

La aplicación de cargas casi estáticas repetitivas redujo la rigidez, en un 2,45 % hasta un 23,26 % por pérdida de fricción (Masdar et al., 2019). La incorporación de abrazaderas de madera para cubrir los espacios entre la superficie exterior redondeada del culmo y las placas laterales, incrementó la resistencia de la conexión en un 40%, en comparación a las uniones sin estos elementos.

Otro estudio comparó el comportamiento entre la unión mediante pasadores internos de madera-hormigón armado y bambú-hormigón armado. Ambas muestras tuvieron un comportamiento similar en los modos de fallo y en el desplazamiento (Wang et al., 2020). La falla fue moderada, dado que las probetas mostraron grandes deformaciones plásticas antes de fallar y el hormigón también presentó grietas, lo que indicó el aporte uniforme de los materiales de la unión. La rigidez al corte fue un 19% y la capacidad máxima, un 31% mayor en las conexiones bambú-hormigón que las de las conexiones madera-hormigón y la capacidad de corte aumentó con el aumento del diámetro del pasador y con la resistencia del hormigón. El rendimiento de transferencia de carga del pasador fue excelente. Los agujeros de la madera se deformaron y los del bambú no.

En cuanto a las uniones atornilladas bambú-bambú, fallaron por rotación del tornillo y el bambú perdió su capacidad de sujeción. Las conexiones entre bambú-acero fallaron por deformación (de la plancha cuando se usan de 0,8 mm y del área de roscado cuando las planchas tienen de 1,5 a 3 mm de espesor). Se demostró la correlación que existe entre el diámetro del tornillo y el espesor de la placa de acero que forma parte de la conexión para soportar mayores esfuerzos (Kou et al., 2022). El tipo de tornillo que se utilice no influye ni en el fallo de la unión, ni en su comportamiento más o menos dúctil (Kou et al., 2022).

- Rellenas, con aditamentos externos de refuerzo y sujeción

Cuando además de emplearse elementos como culmos múltiples, abrazaderas, pernos perforantes y placas, las uniones se rellenaron con mortero, se observó incremento en la resistencia a compresión, pero en cortante se produjo separación de los materiales y fallo de pernos en algunos casos, al alcanzar la carga de diseño (Pradhan y Dimitrakopoulos, 2021). Cuando se emplean uniones en corte tipo boca de pez y abrazaderas con pernos, la unión rellena falló por el corte realizado en el bambú (Martínez-Forero, 2018).

Discusión

De manera general, independientemente del tipo de unión a emplear, es necesario observar ciertos elementos y recomendaciones de diseño para maximizar su rendimiento estructural. La variabilidad de las dimensiones de la sección a lo largo del culmo, apunta a trabajar desde posiciones conservadoras, con la aplicación de factores de seguridad sustanciales y apropiados (Sánchez-Vivas, et al. 2019). Se deberá atender a la uniformidad y calidad de los extremos de los culmos que recibirán los elementos de unión (Martínez-Forero, 2018). Los nudos se comportan como diafragmas internos del culmo que lo rigidizan y ayudan a evitar el pandeo de las paredes y el aplastamiento por la acción de cargas puntuales (Kaminski et al., 2016). Por esto se recomienda, que el primer nudo se ubique lo más próximo posible a la unión, a menos de 6 cm (Morán-Ubidia, 2015). Además, se debe utilizar bambú de no menos de 4 años y su contenido de humedad debe estar entre el 8% y el 12%; la superficie de la unión debe ser plana y de diámetro circular, lo más constante posible a lo largo del culmo (Hu et al., 2021).

En concordancia con lo anterior, se recomienda considerar valores de sobrecarga en los cálculos para lograr que el fallo “avise” (Pradhan y Dimitrakopoulos, 2021). Esto, en términos de diseño, significa utilizar uniones reforzadas que son las que ofrecen mayor seguridad y por tanto pueden favorecer una mayor vida útil para la estructura. (Bello, 2021). Además, utilizar culmos con grandes diámetros y espesores (Kaminski et al., 2016). De igual forma, evitar luces grandes, reducir las cargas y utilizar culmos múltiples, sobre todo para las vigas (Pradhan y Dimitrakopoulos, 2021).

El empleo de morteros para rellenar las uniones, contengan o no perforaciones, presentó varios inconvenientes. Se incrementó con ellas, el peso de la estructura (Benitez et al., 2016). Esto entra en contradicción con la esencia de ligereza, que caracteriza y otorga ventajas a los sistemas constructivos a base de bambú. El mortero fresco incorporó humedad al culmo, produjo modificaciones en sus diámetros y como consecuencia, redujo su resistencia (Venegas et al., 2019). Además, con ello se incrementan las dificultades en obra y el tiempo de ejecución debido al fraguado; se hace difícil el desmontaje, sin que las piezas y materiales puedan ser reutilizados (Martínez-Forero, 2018; Hu et al., 2021). Por ser elementos fijos, endurecidos y recubiertos por bambú, son uniones que no permiten mantenimientos constantes, ni sencillos.

Aunque estas uniones cumplieron las pruebas mecánicas, mostraron baja capacidad de carga, por lo que los refuerzos interiores de acero, no fueron suficientes (Benitez et al., 2016). El incremento de la rigidez, debido al relleno y a los anclajes con barras longitudinales interiores, fue leve (Lamus et al., 2014). Este comportamiento mejoró ligeramente al emplear pernos transversales al culmo, pero las perforaciones que se practican en él, no favorecieron resultados superiores. Los pernos longitudinales tampoco produjeron incrementos adicionales de la resistencia para las uniones diseñadas con pernos transversales al culmo. Más bien disminuyeron su capacidad, pues la unión se hizo menos dúctil en el fallo (Lamus et al., 2014).

La aparición de grietas en el culmo y en el mortero a causa del fraguado, indicó que la compatibilidad entre ambos materiales no es buena (Venegas et al., 2019).

Por otra parte, las uniones con perforaciones que utilizaron varias hileras de pernos y de abrazaderas a ambos lados de los mismos, disminuyeron el riesgo de fallo, soportaron bien el pandeo y ofrecieron una mayor seguridad al evitar grietas longitudinales (Pradhan y Dimitrakopoulos, 2021). Sin embargo, la aplicación de perforaciones y cortes con diferentes ángulos y formas en el culmo, redujeron la capacidad natural de carga del bambú y estas uniones se convirtieron en puntos de vulnerabilidad al fallo (Martínez-Forero, 2018; Hu et al., 2021).

Por eso, entre todos los tipos de uniones analizadas, las que mostraron un mejor desempeño fueron las huecas, sin perforaciones en el culmo y con aditamentos externos de refuerzo y sujeción, que mostraron amplias ventajas con respecto a las conexiones referidas en párrafos anteriores (las rellenas, con o sin perforaciones y las huecas perforadas). Su funcionamiento aprovecha e incrementa al máximo las propiedades mecánicas del bambú (ya que preservan su integridad) al producir una tensión concéntrica en la superficie exterior del culmo, creada por las abrazaderas que lo ajustan, lo refuerzan y evitan la aparición de grietas longitudinales (García et al., 2017; Morán et al., 2018; Hu et al., 2021).

Son uniones más ligeras que las rellenas, no requieren de cortes complejos que las debiliten y su comportamiento superó sustancialmente la rigidez, resistencia y ductilidad (Villegas et al., 2018; Morán et al., 2018; Hu et al., 2021).

Su buen desempeño depende, en gran medida, del máximo ajuste de estas al culmo. La eliminación o reducción de los espacios dentro de la unión contribuye a ampliar el área de contacto del perno y a un mejor ajuste del culmo y como consecuencia, se incrementa la rigidez, se retrasan las deformaciones y se protege la caña contra fisuras y fracturas (Masdar et al., 2019; Nie et al., 2022). Con este fin, deben incorporarse aditamentos que se adapten a la curvatura de los culmos, como abrazaderas de madera, de metal o arandelas curvas (Benitez et al., 2016; Masdar et al., 2019). Con este mismo fin se ha empleado a veces la resina epóxica como relleno de estos espacios para producir un mejor ajuste. Sin embargo, esto no es aconsejable desde el punto de vista ecológico, ni ha mostrado comportamientos estructurales competitivos, ya que al endurecerse y someterse a cargas altas han aparecido grietas (Awaludin y Andriani, 2014).

En este tipo de uniones, las imperfecciones superficiales del bambú favorecieron su capacidad de carga y seguridad estructural, pues aumentan la fricción y obstruyen el movimiento de las abrazaderas (Hu et al., 2021). La fricción del deslizamiento se puede controlar apretando los pernos hasta lograr su ajuste máximo (Hu et al., 2021; García et al., 2017). Este se obtiene al producir contacto total entre las orejas de las abrazaderas, lo que constituye, además, un elemento de protección al culmo. El número de abrazaderas a colocar estará en dependencia del grado de carga a que se someterá la conexión (Hu et al., 2021).

El comportamiento elástico de las estructuras de bambú, depende en gran medida del tipo de material utilizado en las uniones, además del diseño de la conexión (Masdar et al., 2019). En un estudio comparativo del comportamiento de las uniones, se encontró que el uso de abrazaderas de metal redujo el peso de la estructura y proporcionó mayor rigidez y comportamiento dúctil de la conexión (Benitez et al., 2016).

Sin embargo, la ductilidad es un tema que plantea aún contradicciones. Algunos ensayos mostraron bajos niveles (Hu et al., 2021). Mientras que otros plantearon que el comportamiento dúctil fue 595% superior que el de las conexiones de los tipos anteriormente analizados (Morán et al., 2018). Por su parte, otros autores plantean que el comportamiento dúctil se presenta al no perforar los culmos, ya que evita la concentración de esfuerzos alrededor de los agujeros de los pernos, lo que provoca fallos por hendiduras y grietas (García et al., 2017).

Las orejas de las abrazaderas son las que contienen las perforaciones y permiten realizar ajustes en cualquier momento que se requiera (no solo durante la construcción, sino para realizar el mantenimiento necesario) o para conectar diferentes elementos, bajo una amplia gama de posibilidades (Hu et al., 2021). Los pernos que unen las abrazaderas, permiten también conectar dos culmos diferentes y funcionan como pivotes que pueden girar para lograr múltiples ángulos entre los culmos y adaptarse incluso al montaje de estructuras espaciales (Martínez-Forero, 2018; Hu et al., 2021).

Adicionalmente, el costo relativamente reducido de estas uniones les otorgan otra ventaja importante (Morán et al., 2018).

Limitaciones, relevancia del estudio y necesidad de desarrollar líneas de investigación

La muestra analizada fue reducida, debido a que no se encontraron muchas investigaciones realizadas mediante ensayos practicados a las uniones estructurales de bambú. Los resultados mostrados por estos estudios no siempre utilizaron o midieron las mismas variables, lo que hizo difícil y limitado realizar comparaciones más precisas.

No obstante, los datos aportados permitieron plantear conclusiones certeras en cuanto a la comparación entre tipos de conexiones, su desempeño, limitaciones y recomendaciones de diseño. Por todo ello, las uniones que mostraron mejor desempeño, pueden constituir el punto de partida para la elaboración de catálogos de diseño y ejecución de conexiones, pues facilitan la creación piezas de manera estandarizada y disponer de variedad de tamaños de abrazaderas y platinas para adaptarse a las diferentes formas y exigencias de los elementos estructurales (García et al., 2017; Martínez-Forero, 2018). Este tipo de uniones y las

consideraciones para su diseño, referidas con anterioridad, facilitan el trabajo de proyecto y a pie de obra de ingenieros y arquitectos. Sin embargo para lograr generalizar su empleo, se requiere profundizar y ampliar en los estudios y pruebas de diferentes prototipos de uniones, pues lograr la estandarización de las piezas se dificulta, debido a la forma circular e irregular de los culmos (Lao, 2021).

Conclusiones

Las conexiones que presentan mejor desempeño estructural son las huecas, que emplean abrazaderas exteriores, sin producir perforaciones, ni cortes especiales en el culmo, pues mantienen su integridad y potencian las ventajas estructurales, constructivas y económicas del uso de este material. Constituyen una reinterpretación moderna y eficiente de los sistemas de amarre empleados en las construcciones de bambú originales.

Su fallo se debe principalmente a los espacios que quedan entre los componentes de la unión, por lo que es necesario producir un máximo ajuste de las abrazaderas e incorporar aditamentos para tomar dichos espacios. Se requiere utilizar culmos de calidad y dimensiones adecuadas, así como para los diámetros de los pernos y los espesores de las abrazaderas.

El diseño de las uniones debe considerar los elementos de seguridad suficientes durante su funcionamiento. En este sentido, se plantea el uso de culmos múltiples en los elementos estructurales, sobre todo en vigas. Se deberán emplear varias hileras de abrazaderas, conexiones largas y uniones atornilladas entre abrazaderas de elementos consecutivos, para tomar un mayor esfuerzo y lograr una mejor transmisión de las cargas. Estos aspectos contribuyen a incrementar la resistencia y durabilidad de estas estructuras.

Los estudios publicados a partir de la realización de ensayos en uniones de bambú son escasos, por lo que es imprescindible el desarrollo de investigaciones de este tipo que provean de herramientas prácticas y confiables a los profesionales de la construcción y a la comunidad.

Referencias bibliográficas

- Aguilar, R., Haurie, L. y Lacasta, A. (2020). Uniones versátiles aplicadas en la construcción con bambú. En *"III Jornada de doctorado del Programa de Tecnología de la Arquitectura, la Edificación y el Urbanismo, Libro de Actas"*, Lacasta, A. (ed.), 27–29. GICITED-Universidad Politécnica de Catalunya, España.
- Archila, H., Kaminski, S., Trujillo, D., Zea, E. y Harries, K. (2018). Bamboo reinforced concrete: a critical review. *Materials and Structures*, 51(102), 1–18.
<https://doi.org/10.1617/s11527-018-1228-6>
- Awaludin, A. y Andriani, V. (2014). Bolted bamboo joints reinforced with fibers. *Procedia Engineering*, 95(SCESCM), 15–21. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.12.160>
- Bello, J. (2021). Ventajas y desventajas del sistema constructivo con bambú frente al sistema de hormigón armado en viviendas de interés social. *Polo Del Conocimiento*, 6(9), 1987–2011. <https://doi.org/10.23857/pc.v6i9.3152>
- Benitez, C., Morán, R., Silva, H. y García, J. (13-15 de abril de 2016). *Design of Steel Connectors for Structural Bamboo Members*. Tercer Congreso Internacional sobre tecnologías avanzadas de mecatrónica, diseño y manufactura. Universidad del Valle, Cali, Colombia.
- Covillault, P. y De Rycke, K. (24-28 August 2020). *Architectural Connectors for Bamboo Structures*. International Conference on Spatial Structures. IASS Surrey 7th, Guilford, United Kingdom.
- Ganong, L. (1987). Integrative reviews of nursing research. *Res Nur Health*, 10(1), 1–11.
<https://doi.org/10.1002/nur.4770100103>
- García, J., Benitez, C., Villegas, L. y Morán, R. (2017). Thin Steel Rings as a Feasible Alternative to Connect Bamboo Culms. En *"17th International Conference on Non-Conventional Materials and Technologies, NOCMAT for the XXI Century"*, Ghavami, K., Herrera, P. (eds.), 661–670. Materials Research Forum LLC, Millersville PA, USA.
- Hong, C., Li, H., Lorenzo, R., Wu, G., Corbi, I., Corbi, O., Xiong, Z., Yang, D. y Zhang, H. (2019). Review on connections for original bamboo structures. *Journal of Renewable Materials*, 7(8), 1–18. <https://doi.org/10.32604/jrm.2019.07647>
- Hu, C., Cheng, R., Cheng, Q. y Liu, J. (2021). Study on behavior of steel hoop connections for raw bamboo members. *Materials*, 14(7253), 1-25.
<https://doi.org/10.3390/ma14237253>
- Kaminski, S., Laurence, A. y Trujillo, D. (2016). Structural use of bamboo. Part 1: Introduction to bamboo. In *The Structural Engineer, volume 94 (8)*, 40–43. The Institution of Structural Engineers, London, United Kingdom.
- Kou, Y., Tian, L., Hao, J., Jin, B. y Xin, A. (2022). Lateral resistance of screwel connections of original bamboo. *Journal of Building Engineering*, 45, 1–22.
<https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103601>
- Lamus, F., Andrade, S. y Torres, C. (2014). Rigidez de una conexión de columna-cimentación para estructuras de guadua angustifolia Kunth. *Épsilon*, 1(22), 39–53.
<https://oaji.net/articles/2015/2065-1432476904.pdf>
- Lao, H. (2021). *Connections for Bamboo Structures*. 2nd International Conference on Geology, Mapping and Remote Sensing. Earth and Environmente Science. Zhangjiajie, China.

- Martínez-Forero, M. (2018). Mejoramiento de uniones estructurales de bambú-guadua *Angustifolia Kunth* para la conformación de sistemas reticulados. En, "*Memorias del 8vo Congreso de la construcción y la arquitectura sostenible*". D. Marín, J. Sarmiento, A. Ruiz, J. Buelvas, R. Hernández y M. Albis (eds.), 183-197. Editorial Corporación Universitaria del Caribe-CECAR, Sincelejo, Colombia.
- Masdar, A., Suhendro, B., Siswosukartor, S. y Sulisty, J. (2019). Elastic behavior of connection system with the addition of wooden clamp on bamboo truss structure. *International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE)*, 7(6S5), 999–1004. <https://www.ijrte.org/wp-content/uploads/papers/v7i6s5/F11710476S519.pdf>
- Morán-Ubidia, J. (2015). *Construir con bambú. Manual de construcción* (3ra ed). Red Internacional del Bambú y Ratán - INBAR, Lima, Perú.
- Morán, R., Muñoz, J., Silva, H., & García, J. (2018). A bamboo beam-column connection capable to transmit moment. En "*Materials Research Proceedings, Vol. 7*", K. Ghavami y P. Herrera (eds.), 35–44. Materials Research Forum LLC., Millersville PA, USA.
- Nie, S., Ran, S., Wu, D., Chen, J., Wang, H. y Wei, Q. (2022). Mechanical properties of moso bamboo connections with external clamp steel plates. *Journal of Renewable Materials*, 10(2), 487–511. <https://doi.org/10.32604/jrm.2022.017275>
- Pradhan, N. y Dimitrakopoulos, E. (2021). Pilot study on capacity-based design of multiculm bamboo axial members with dowel-type connections. *Journal of Structural Engineering*, 147(5), 1–13. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0002995](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0002995)
- Sánchez-Vivas, L., Mullins, G., Cunningham, J. y Mihelcic, J. (2019). Mechanical properties of bamboo: a research synthesis of strength values and the factors influencing them. *Journal of American Bamboo Society*, 29, 1–21. https://bamboo.org/_uploads/pdfs/JABSv29_Sanchez_20191007.pdf
- Trujillo, D. (14-18 August 2018). Developments in Structural Design Standard with Bamboo. 11th World Bamboo Congress, Xalapa, México.
- Venegas, O., Díaz, F., Cendales, M. y Moreno, J. (2019). Evaluación del esfuerzo último de dos uniones con acoples de diferentes diámetros, adheridos con una mezcla de mortero para determinar su posible aplicación a construcciones en guadua *Angustifolia Kunth*. En "*Investigación formativa en ingeniería*", Serna, E. (ed.), 106-114. Editorial Instituto Antioqueño de Investigación IAI, Medellín, Colombia.
- Villegas, L., Moran, R., Muñoz, J., Silva, H. y García, J. (2018). Uniones basadas en semi-anillos de acero para elementos estructurales de Guadua. En "*La ingeniería, una profesión de impacto*", Vera, L. (ed), 73–82. Editorial UNIMAR, San Juan de Pasto, Colombia.
- Wang, Z., Wei, Y., Jiang, J., Zhao, K. y Zheng, K. (2020). Comparative study on mechanical behavior of bamboo-concrete connections and wood-concrete connections. *Frontiers in Materials*, 7, 1–18. <https://doi.org/10.3389/fmats.2020.587580>

Conflicto de intereses:

El autor declara que no existe conflicto de interés posible.

Financiamiento:

No existió asistencia financiera de partes externas al presente artículo.

Agradecimiento:

N/A

Nota:

El artículo no es producto de una publicación anterior, tesis, proyecto, etc.