

Theoretical and experimental analysis of structural joints of glued laminated pressed bamboo guadua for a housing project

Análisis teórico experimental de conexiones en elementos estructurales de bambú guadua laminado pegado prensado, para un proyecto de vivienda

Patricia Luna ^a, Ana Milena Olarte ^c & Caori Takeuchi ^d

^a MSc. Estructuras, Universidad Nacional de Colombia, plunat@unal.edu.co

^c MSc. Estructuras, Universidad Nacional de Colombia, amolartea@unal.edu.co

^d MSc. Estructuras, Universidad Nacional de Colombia, ccptakeuchi@unal.edu.co

Received: March 12th, 2013. Received in revised form: September 17th, 2013. Accepted: October 10th, 2013

Abstract

The analysis of connections between elements of glued laminated pressed bamboo guadua (*Guadua angustifolia* Kunth) for a housing project is presented in this article. The analysis was carried out in four stages: design, load test, numerical simulation and finite element modeling. Design connection was developed using the allowable stresses method. In load test, displacements were measured in order to identify the behavior of connections for different load increments. Numerical simulation was performed in the software ETABS® with the loads used in the load test in order to determine the displacements at points experimentally instrumented in the test; each stage of load of test was simulated. Finally, the finite element modeling was performed in the software ANSYS®. Differences between the experimental results and those obtained with the simulations were found, which could be result of the differences between real conditions of the load test and design considerations as behavior completely rigid or pinned of connections.

Keywords: Bamboo-guadua, laminated, joints, structure test, allowable stresses design.

Resumen

El análisis de las conexiones entre elementos fabricados en Bambú guadua (*Guadua angustifolia* Kunth) laminado pegado prensado para un proyecto de vivienda, es mostrado en este artículo. El análisis se ejecutó en cuatro etapas: diseño, prueba de carga, simulación numérica y modelación por elementos finitos. El diseño se realizó por el método de los esfuerzos de trabajo. En la prueba de carga fueron medidos desplazamientos para conocer el comportamiento de las conexiones para diferentes incrementos de carga. La simulación numérica fue realizada en el programa ETABS® con la carga real impuesta en cada etapa de la prueba de carga. Finalmente, la modelación por elementos finitos se realizó en el programa ANSYS®. Se encontró que existen diferencias entre los resultados experimentales y los numéricos, las cuales pueden ser consecuencia de que las condiciones reales de la prueba de carga no corresponden exactamente a las consideraciones supuestas de diseño como nudos completamente rígidos o articulados.

Palabras Clave: Bambú-guadua, laminado, conexiones, prueba de carga, diseño por esfuerzos admisibles.

1. Introducción

En el sector de la construcción a nivel nacional e internacional, se ha venido fomentado la búsqueda de materiales renovables y sustentables que presenten un comportamiento estructural adecuado; en medio de esta búsqueda ha surgido el bambú guadua (*Guadua angustifolia* Kunth) laminado pegado prensado (BGLPP).

Recientemente, se desarrollaron dos proyectos de investigación financiados por el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural de Colombia, que tenían como objetivo, entre otros, estudiar el comportamiento mecánico de este material; el primero “Validación tecnológica de los

laminados de guadua para la industria de la construcción”, desarrollado por la Universidad de Los Andes (Colombia), dentro del cual se pueden destacar investigaciones sobre el tipo y cantidad de adhesivo con el que se obtiene un mejor comportamiento mecánico del material [1], la determinación de propiedades físicas y mecánicas [2], así como el comportamiento de elementos estructurales [3] y conexiones [4]. El segundo, “Diseño y Construcción de vivienda con elementos estructurales en guadua laminada pegada prensada” desarrollado por la Universidad Nacional de Colombia, en el cual pueden resaltarse los trabajos realizados para establecer la influencia del adhesivo en el comportamiento mecánico del material [5], y otros

encaminados a determinar el comportamiento de elementos estructurales como vigas [6], columnas [7], paneles y tableros de piso [8] y pórticos [9], con el objetivo de diseñar arquitectónica y estructuralmente un prototipo de vivienda.

El segundo proyecto, es el punto de partida de esta investigación, ya que al buscar un diseño estructural completamente funcional, las uniones entre los diferentes elementos deben diseñarse para que trabajen adecuadamente ante las solicitaciones a las que estarán expuestas durante la vida útil de la estructura. Así, una vez dimensionados todos los elementos estructurales del sistema de resistencia sísmica del prototipo de vivienda, se procedió al diseño de sus conexiones, con las mismas cargas y restricciones de diseño impuestas en la etapa de dimensionamiento de secciones.

El diseño de las conexiones, se llevó a cabo siguiendo los lineamientos del Manual de Diseño para Maderas del Grupo Andino [10] en lo correspondiente al número y ubicación de los pernos conectores, y en las Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo Resistente NSR-98 [11] para lo concerniente al dimensionamiento de las platinas de acero, por ser el reglamento vigente al comienzo de la investigación. Posteriormente, se realizó una prueba de carga para evaluar el comportamiento real de algunas de las conexiones diseñadas.

Adicionalmente, con el objetivo de encontrar el estado límite de algunas de las conexiones diseñadas, se realizaron modelaciones por elementos finitos.

2. Metodología

De acuerdo con los lineamientos establecidos en el Manual de Diseño para Maderas del Grupo Andino, el diseño de las conexiones se realizó por el método de los esfuerzos de trabajo.

2.1. Clasificación del material

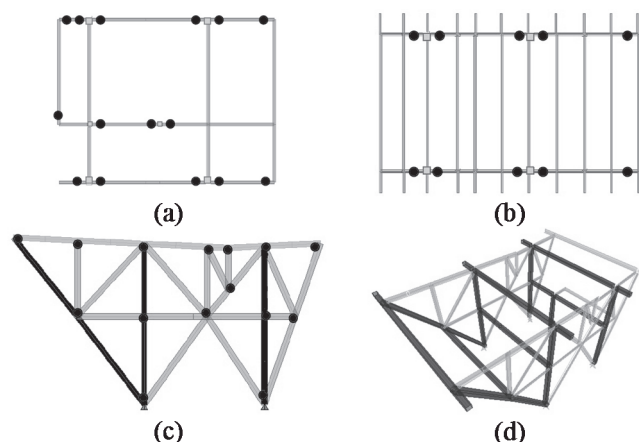
Teniendo en cuenta que el bambú guadua laminado pegado prensado no hace parte de los materiales normalizados por los códigos usados en la presente investigación, se trabajó como una madera estructural tipo B, normalizada por la NSR-98, teniendo en cuenta los esfuerzos admisibles determinados experimentalmente en investigaciones previas para corte paralelo y compresión perpendicular [5], flexión longitudinal [6], compresión paralela [7].

2.2. Evaluación de solicitaciones

La Figura 1 presenta la distribución de los elementos estructurales que conforman el prototipo de vivienda; los elementos resaltados en la Figura 1 (c) y (d) corresponden a los pórticos principales con conexiones viga – columna resistentes a momento. Las demás conexiones, resaltadas con puntos, corresponden a conexiones articuladas (no resistentes a momento).

A partir de los resultados obtenidos en la simulación numérica realizada para el dimensionamiento de los

elementos estructurales, se determinaron las solicitaciones actuantes en cada elemento.



(a): planta de entrepiso, (b): planta de cubierta, (c): fachada lateral, (d): vista 3D

Figura 1. Prototipo de vivienda modelado

2.3. Diseño de las conexiones

La metodología usada para el diseño de los dos tipos de conexiones estudiadas, resistentes a momento o no, es similar, existiendo diferencia únicamente en las solicitaciones actuantes en la conexión.

El procedimiento general inicia con la identificación de las dimensiones de la sección transversal de los elementos a conectar, de las solicitaciones actuantes y su orientación, y la selección del diámetro de pernos a usar. Con base en esta información es determinada la carga admisible para cada una de las secciones a unir, haciendo uso de la tabla 12.7 del Manual de Diseño para Maderas del Grupo Andino. Debido a que la tabla mencionada solo contiene valores de cargas admisibles para elementos con espesores menores o iguales a 10 cm, y a que, en algunos casos, los espesores de los elementos a conectar superan este valor, fue necesario realizar una extrapolación lineal a partir de los valores iniciales.

En función de la carga admisible determinada para cada conexión, se define el número de pernos necesarios, espaciamiento entre los mismos, distancias al borde y con ello las dimensiones de las platinas metálicas, teniendo en cuenta los factores de reducción de resistencia por efecto de grupo.

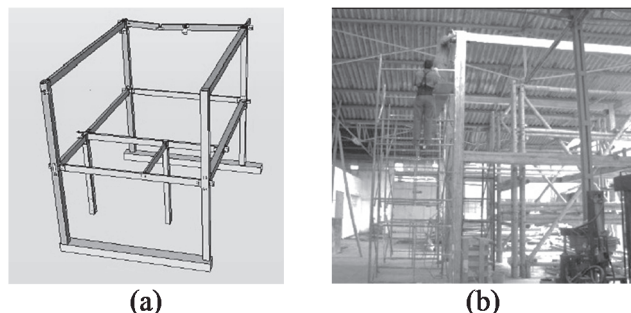
Una vez dimensionada la platina, se procede a su diseño bajo la misma metodología usada para el dimensionamiento de la conexión, verificando los parámetros de resistencia, aplastamiento y bloque cortante de acuerdo con los lineamientos establecidos en la NSR-98.

2.4. Montaje y prueba de carga

Con el objetivo de evaluar el comportamiento real de algunas de las conexiones diseñadas, fue realizada una prueba de carga vertical, para los elementos estructurales que conforman el módulo central del prototipo de vivienda, mostrados en la Figura 2.

Para la colocación de la carga fueron dispuestos culmos de guadua apoyados sobre algunas vigas del entrepiso, simulando el sistema de viguetería; las vigas corresponden a las vigas de carga establecidas en el diseño estructural.

La carga vertical fue aplicada al colocar vigas de concreto y sacos de arena en tres etapas, obteniendo una carga final de 179 kgf/m^2 , aproximándose de esta manera a la carga viva para la cual fueron diseñados los elementos estructurales (180 kgf/cm^2).



(a): módulo central ensayado, (b): montaje módulo central
Figura 2. Montaje de la prueba de carga

Para la determinación del comportamiento estructural real de algunas conexiones, fueron medidos los desplazamientos en el centro de la luz de las vigas y en puntos de unión viga – columna, con ayuda de seis (6) comparadores de carátula (sensibilidad 0.01 cm) posicionados como se muestra en la Figura 3, en donde los sentidos de las flechas indican el sentido del desplazamiento medido por cada uno; las conexiones 1 y 2, instrumentadas con los conjuntos de comparadores de carátula 3-4 y 2-5-6, corresponden a conexiones resistentes a momento; la conexión 3 corresponde a una conexión no resistente a momento.

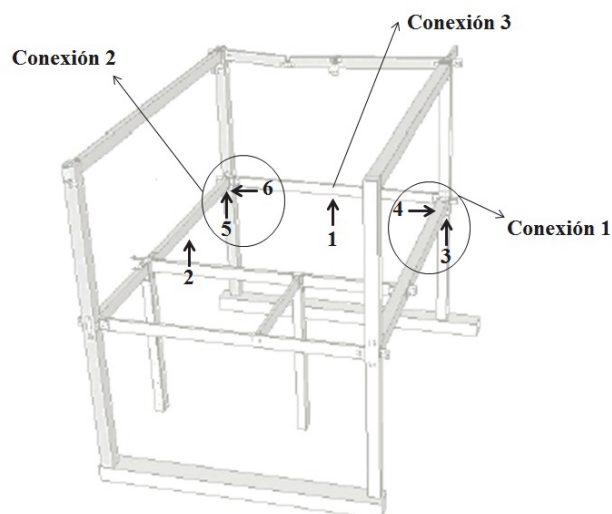


Figura 3. Instrumentación para medición de desplazamientos

2.5. Simulación numérica de la prueba de carga

Los desplazamientos registrados en la prueba de carga fueron comparados con desplazamientos obtenidos a través

de una simulación numérica en el programa ETABS® del módulo del prototipo de vivienda ensayado. En el programa fue simulada la carga real impuesta siguiendo las mismas etapas de la prueba, determinando para cada una los desplazamientos en los puntos instrumentados experimentalmente.

2.6. Simulación en elementos finitos de conexiones

Adicionalmente, fue realizada una simulación en elementos finitos usando el programa ANSYS® para encontrar los estados límites o carga máxima soportada por las conexiones instrumentadas, que se alcanza cuando la platina metálica entra en fluencia (utilizando el criterio de Von Mises) o cuando se supera el valor de esfuerzo admisible para el BGLPP en dirección perpendicular a las fibras; la Tabla 1 muestra los valores máximos soportados por los dos materiales. Además, esta simulación también fue usada para determinar los desplazamientos teóricos, con la imposición del valor de carga alcanzado en la prueba de carga.

Tabla 1. Estado límite de los materiales simulados

MATERIAL	ESTADO LÍMITE (kgf/m^2)
Platina metálica	2,549,250
BGLPP	1,352,122

En la Figura 4, se observa la discretización de elementos finitos realizada a una de las conexiones modeladas (resistente a momento). Las propiedades asignadas a los materiales corresponden a valores del módulo de elasticidad longitudinal (E) y al coeficiente de Poisson (μ), que para el caso del BGLPP fueron de $E = 2.04 \times 10^9 \text{ kgf/m}^2$ y $\mu = 0.20$, y para el acero (platinas y pernos) de $E = 2.04 \times 10^{10} \text{ kgf/m}^2$, $\mu = 0.30$; los valores asignados para el BGLPP corresponden a los mismos usados en el diseño estructural.

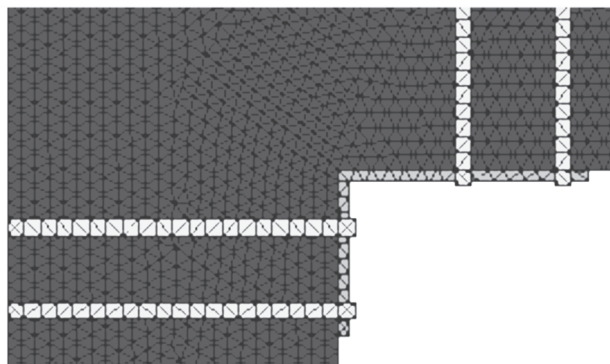


Figura 4. Discretización usada para la conexión resistente a momento 1

3. Resultados

3.1. Desplazamientos

La Tabla 2 presenta los resultados obtenidos para el desplazamiento vertical, es decir para la viga, medido experimentalmente con la prueba de carga (Δ_{VPC}), usando simulación numérica (Δ_{VSN}) y por elementos finitos (Δ_{VEF}) para las conexiones instrumentadas.

Tabla 2.

Desplazamientos verticales conexiones instrumentadas

CONEXIÓN	$\Delta_v PC$ (cm)	$\Delta_v SN$ (cm)	$\Delta_v EF$ (cm)
1	0.023	0.072	0.053
2	0.214	0.500	0.303
3	0.175	1.289	0.625

De forma similar, la Tabla 3 presenta los resultados obtenidos para el desplazamiento horizontal, es decir para la columna, medido experimentalmente con la prueba de carga ($\Delta_H PC$), usando simulación numérica ($\Delta_H SN$) y por elementos finitos ($\Delta_H EF$) para las conexiones instrumentadas. Debido a que la conexión 3 no es resistente a momento, no fueron determinados desplazamientos horizontales.

Tabla 3.

Desplazamientos horizontales conexiones instrumentadas

CONEXIÓN	$\Delta_H PC$ (cm)	$\Delta_H SN$ (cm)	$\Delta_H EF$ (cm)
1	0.001	0.180	0.107
2	0.096	0.598	0.391

En el caso del desplazamiento vertical (Tabla 2), se observa que para la conexión 1 se obtienen resultados del mismo orden de magnitud al comparar los obtenidos en la prueba de carga y la simulación numérica; este mismo comportamiento se observa en la conexión 2. Al comparar los desplazamientos verticales para la conexión 3, se observó que los obtenidos experimentalmente son del mismo orden de magnitud a los determinados con la modelación por elementos finitos, y son muy inferiores cuando se comparan con los arrojados por la simulación numérica.

En el caso del desplazamiento horizontal (Tabla 3), se observa que el resultado experimental para la conexión 1 es inferior cuando se compara con los valores obtenidos en la simulación numérica, debido a que al momento de la prueba de carga el comparador de carátula asignado a este elemento arrojó siempre la misma lectura; los desplazamientos arrojados por la simulación numérica son del mismo orden de magnitud. Al comparar los desplazamientos horizontales para la conexión 3, se observa que los obtenidos experimentalmente son inferiores a los de la simulación numérica.

Comparando los resultados de desplazamiento vertical y horizontal para las conexiones resistentes a momento 1 y 2, se observa que en ninguno de los casos (experimental o simulación numérica) los valores para viga y columna son iguales. Los resultados obtenidos con la prueba de carga muestran que aun cuando durante la etapa de diseño se asuma la conexión completamente rígida, constructivamente no es posible garantizar esta condición debido a que las perforaciones tanto en las platinas como en los elementos de BGLPP son de un diámetro mayor a las de los pernos utilizados (diámetro perforación = diámetro perno + 1.59 mm) o debido a efectos de acomodamiento del material.

3.1. Estado límite de las conexiones

La Tabla 4 muestra los resultados obtenidos a partir de la simulación por elementos finitos para los estados límite

de cada conexión, en donde w corresponde a la carga para la que se obtiene la falla, σ_{BGLPP} corresponde al esfuerzo en dirección perpendicular a la fibra para el BGLPP obtenido para la carga w , σ_{PL} al esfuerzo de la platina para la carga w y CV a la carga viva por metro cuadrado que debe ser aplicada para generar la falla de la conexión.

Tabla 4.

Estado límite para las conexiones instrumentadas

CONEXIÓN	w (kgf)	σ_{BGLPP} (kgf/m ²)	σ_{PL} (kgf/m ²)	CV (kgf/m ²)
1	1,555	571,032	2,549,250	423
2	2,675	438,471	2,549,250	729
3	21,569	234,531	2,549,250	1,152

En los tres casos se observa que se alcanza primero el estado límite de la platina metálica, debido a que su sección es muy pequeña en comparación con las secciones de BGLPP que conectan, generándose así grandes concentraciones de esfuerzos. Igualmente para los tres casos, la carga para la cual se alcanza el estado límite de la conexión supera la carga viva de diseño.

4. Conclusiones

Se realizó el diseño de todas las conexiones de los elementos de bambú guadua laminado pegado prensado que conforman la estructura de la vivienda, encontrando que éstas son funcionales, tal como lo demostró la prueba de carga y las modelaciones numéricas que lo respaldaron.

Se puede considerar el procedimiento de diseño como adecuado, ya que las conexiones se comportaron apropiadamente durante la prueba de carga, sin presentar fallas. Sin embargo cabe resaltar que estas no se sometieron a cargas dinámicas como las producidas por un sismo, pero sí fueron una consideración del diseño de las conexiones.

Se encontraron diferencias en algunos casos entre los resultados experimentales y los obtenidos con las simulaciones numéricas, diferencias que pudieron deberse a las condiciones reales de la prueba de carga y de las consideraciones de diseño como embotramientos o articulaciones absolutas, cuando en la realidad esto no sucede. Adicionalmente se pudieron presentar otros procesos no considerados al inicio como acomodamiento del material o el efecto de las perforaciones en el comportamiento de la conexión.

Referencias

- [1] Correal, J. F. and Ramirez, F., Adhesive bond performance in glue line shear and bending for glued laminated guadua bamboo. J. Tropical Forest Science, 22, pp. 433-439, 2010.
- [2] Correal, J. F., Ramirez, F. and Gonzalez, S., Structural behavior of Glued Laminated Guadua Bamboo as construction material. Memorias World Conference on Timber Engineering, Italia, 2010.
- [3] Varela, S., Correal, J. and Ramirez, F., Preliminary study of sheathing-to-framing connections whit Glued Laminated Guadua Bamboo panels. Memorias World Conference on Timber Engineering, Italia, 2010.

- [4] Ramírez, F., Correal, J., Yamin, L., Atoche, J. and Piscal, C., Dowel-bearing streng behaviour of Glued Laminated Guadua Bamboo. *J. Materials in Civil Engineering*, 24, pp. 1378-1387, 2012.
- [5] Cortés, J., Lozano, J., Rusinque, M. and Takeuchi, C., Assessment of the influence of glue type in the mechanical behavior of glued laminated guadua (bamboo). *Memorias 12th International Conference on Non-Conventional materials and Technologies "Material & Technologies for Sustainable Infrastructure Systems" IC-NOCMAT 2010*, Egipto, 2010.
- [6] Hackmayer, L., Rodriguez, N. and Takeuchi, C., Flexion behavior of solid section beams of glued laminated guadua. *Memorias 12th International Conference on Non-Conventional materials and Technologies "Material & Technologies for Sustainable Infrastructure Systems" IC-NOCMAT 2010*, Egipto, 2010.
- [7] Alvarado, C., Moreno, I. and Takeuchi, C., Glued laminated guadua columns. *Memorias 12th International Conference on Non-Conventional materials and Technologies "Material & Technologies for Sustainable Infrastructure Systems" IC-NOCMAT 2010*, Egipto, 2010.
- [8] Pinilla, J. and Takeuchi, C., The structural behaviour of laminated-guadua panels under parallel plane loads. *J. Ingeniería e Investigación*, 32, pp. 18-22, 2012.
- [9] Luna, P. and Takeuchi, C., Experimental analysis of frames made with glued laminated pressed bamboo guadua. *J. Key Engineering Materials*, 517, pp. 184-188, 2012.
- [10] JUNTA DEL ACUERDO DE CARTAGENA. *Manual de diseño para maderas del grupo andino*, 1987.
- [11] ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERÍA SÍSMICA (AIS). *NSR-98: Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo Resistente*, Bogotá, 1998.