

Diseño, resistencia, tablas de diseño, propuesta de empaque y manuales de uso de cerchas construidas con madera de *Gmelina arborea* e *Hieronyma alchorneoides* de plantaciones forestales en Costa Rica

Carolina Tenorio<sup>1</sup>  
Roger Moya<sup>1</sup>  
Marta Saenz<sup>2</sup>  
Angel Navarro<sup>3</sup>  
Mauricio Carranza<sup>3</sup>  
Viviana Panigua<sup>4</sup>

## Resumen

Se diseñaron dos cerchas “tipo pratt” con luces entre apoyos de 6 m y 9 m, construidas con madera de *Gmelina arborea* (melina) e *Hieronyma alchorneoides* (pilón), utilizando dos tipos de uniones: clavos y tornillos. Las cerchas fueron sometidas a cargas de flexión para establecer los valores de resistencia y luego derivar los cuadros de diseño para ser utilizadas en techos de casas de habitación. Además, se propuso el sistema de empaque para los dos tipos de cerchas, así como un manual técnico y de armado dirigido a profesionales y constructores. En los resultados de resistencia se

## Abstract

**Design, resistance, design load, assembly and user manuals of trusses fabricated with *Gmelina arborea* and *Hieronyma alchorneoides* wood from forest plantations trees in Costa Rica**

Two pratt-type trusses were constructed using *Gmelina arborea* (melina) and *Hieronyma alchorneoides* (pilón), designed with spans of 6 m and 9 m between bearings and using two types of joints: nails and screws. The trusses were subjected to bending loads in order to establish the resistance values to derive the design tables to be

1. Tecnológico de Costa Rica, Escuela de Ingeniería Forestal; Cartago, Costa Rica; [ctenorio@itcr.ac.cr](mailto:ctenorio@itcr.ac.cr), [rmoya@itcr.ac.cr](mailto:rmoya@itcr.ac.cr)

2. Tecnológico de Costa Rica, Escuela de Ingeniería Diseño Industrial; Cartago, Costa Rica; [saenz.marta@gmail.com](mailto:saenz.marta@gmail.com)

3. Tecnológico de Costa Rica, Escuela de Ingeniería en Construcción; Cartago, Costa Rica; [ahnavarro@itcr.ac.cr](mailto:ahnavarro@itcr.ac.cr), [mcarranza.aesa@gmail.com](mailto:mcarranza.aesa@gmail.com)

4. Universidad de Costa Rica, Escuela de Arquitectura; San José, Costa Rica; [viviviph@gmail.com](mailto:viviviph@gmail.com)

Recibido: 08/02/2017  
Aceptado: 10/04/2017

encontró que los valores de carga máxima en las cerchas construidas con madera de *H. alchorneoides* fueron mayores en comparación con las cerchas construidas con madera de *G. arborea*, entre 286 kg a 438 kg y 204 kg a 286 kg respectivamente. Los cuadros de diseño para los dos tipos de cerchas, de ambas especies y tipos de unión se determinaron para luces entre apoyos de 4 m, 5 m, 6 m y 7 m. El empaque que se propuso para cada largo de cercha consistió de dos cajas de cartón corrugado; la primera caja de 2,5 m x 25 cm x 12 cm para las piezas más grandes y de 1,35 m x 15,5 cm x 12 cm para las piezas pequeñas en la cercha de 9 metros. Mientras que en la cercha de 6 metros se propuso también dos cajas de 2,5 m x 15,5 cm de ancho x 12 cm para las piezas más grandes y de 1,35 m x 15,5 cm de ancho x 12 cm para las piezas pequeñas. Finalmente se describe en detalle y forma gráfica el sistema de armado de las cerchas.

**Palabras clave:** Construcción, estructura de madera, especies tropicales, embalaje.

## Introducción

En los últimos 10 años el uso de la madera en las construcciones civiles en Costa Rica ha disminuido (Serrano y Moya, 2011). En décadas pasadas, el sector de construcción consumía más del 50 % del volumen total de madera; sin embargo, cifras recientes indican una disminución a solo el 24 % (ONF, 2015). Por otra parte, las construcciones civiles de madera, principalmente casas de habitación en Costa Rica en el pasado se caracterizaban por ser de tipo “liviana”. Para este tipo de construcciones se usaban secciones transversales de madera aserrada de 5,0 cm x 7,5 cm o 2,5 cm x 7,5 cm, las cuales se utilizaban para soportes estructurales de pisos y paredes y para la construcción de cerchas (Tuk, 2010). No obstante, en la actualidad este tipo de estructuras en madera han sido desplazadas por otro tipo de materiales como el plástico, el acero y el concreto (Tuk, 2010; Fournier, 2008).

Las cerchas de madera son uno de los componentes de las “estructuras livianas” que han sido ampliamente utilizadas a nivel mundial y datan desde el siglo 6to A.C. (Barbari, Cavalli, Fiorineschi, Monti y Togni, 2014). Las cerchas tienen la característica de que maximizan la eficiencia estructural, ya que permiten alta rigidez en flexión y alta capacidad de carga, como consecuencia de que la estructura es dividida en un número determinado de piezas, cuyas dimensiones y métodos de unión le conceden niveles de tensión más bajos en comparación con otro tipo de estructuras como las vigas (Woods, Hill y Friswell, 2016).

used on roofing for dwellings. In addition, a packaging system was proposed for both types of trusses, as well as a technical and assembly manual for professionals and builders. In the resistance results it was found that the maximum load values in the trusses constructed with *H. alchorneoides* were higher compared to those constructed with *G. arborea*, between 286 kg to 438 kg and between 204 kg to 286 Kg, respectively. The design tables for the two types of trusses, for both species and types of joining were determined for bearing span of 4 m, 5 m, 6 m and 7 m. The packaging that was proposed for each length of truss consisted of two boxes of corrugated cardboard; the first box of 2.5 m x 25 cm x 12 cm for the largest pieces and 1.35 m x 15.5 cm x 12 cm for small pieces for the 9-meter truss. While for the 6 meter truss, two boxes of 2.5 mx 15.5 cm wide x 12 cm were proposed for the larger pieces and 1.35 mx 15.5 cm wide x 12 cm for small pieces. Finally, the truss reinforcement system is described in detail and graphic form.

**Keywords:** Framing, wood structures, tropical species, packing.

Por otro lado, en Costa Rica y muchos países se han presentado cambios en las especies utilizadas en procesos de construcción (Wolfsmayr y Rauch, 2014; Serrano y Moya, 2011). En Costa Rica, anteriormente se utilizaban especies del bosque natural con densidades sobre 0,6 g/cm<sup>3</sup>, pero recientemente han surgido maderas de plantaciones forestales, entre las que destacan *Gmelina arborea* e *Hieronyma alchorneoides* (Malavassi, 2010; Serrano y Moya, 2011), las cuales poseen densidades inferiores a 0,6 g/cm<sup>3</sup> (Moya, 2004; Tenorio, Moya, Salas y Berrocal, 2016). *G. arborea* ha sido ampliamente estudiada y se le señalan una serie de cualidades para ser utilizada con fines estructurales (Moya, 2004; Tenorio, Moya y Camacho, 2012; Moya, Tenorio, Carranza, Camacho y Quesada, 2013). En tanto que *H. alchorneoides* ha sido utilizada para reforestación comercial en Costa Rica y el estudio de las propiedades de la madera de árboles de plantación ha demostrado altos valores de resistencia estructural (Moya, Leandro y Murillo, 2009; Tenorio et al., 2016a).

Así mismo, Serrano y Moya (2011) haciendo un análisis histórico sobre la comercialización de la madera en Costa Rica, indican que durante la mayor parte del siglo pasado la madera aserrada era comercializada sin mayor criterio técnico; esta se vendía sin dificultad en el mercado y no se necesitaba de técnicas avanzadas de comercialización. También indican que entre 1990 y 2010, debido a la escasez de maderas del bosque natural, y el surgimiento de nuevos productos para la construcción, los industriales se preocuparon más por la falta de materia prima y no por mejorar los estándares de

calidad y productos de la madera. En la última década, los industriales que producen madera de plantación, han buscado nuevas formas y productos para mejorar la comercialización y sobre todo mejorar los estándares de la madera aserrada para ser utilizada en construcción.

Hoy en día varios productos de madera pueden ser marca registrada, tal es el caso de los productos Amatek®, Mateco®, Vigamel®, Plymel®, Tablanel®, entre otros. Estos productos además de su marca registrada cuentan con información técnica, que puede ser consultada en páginas en internet o bien por asesoría de los vendedores técnicos de las empresas. Sin embargo, estos productos no cuentan con empaques para su comercialización.

En referencia a esto, el empaque juega un rol crítico en el manejo y distribución de los diferentes productos que se comercializan en el mercado (Pathare, Opara, Vigneault, Delele y Al-Said, 2012; Pthare y Opara, 2014). Entre la funciones que se le señalan al empaque son: protección física del producto, conservación, facilidad de transporte y almacenamiento (Pathare et al., 2012). Además que un buen empaque contiene o incluye información técnica y gráfica sobre el uso y cuidado del producto (Hägglund and Carlsson, 2011). Los materiales usados para la fabricación de los empaques son de varios tipos, pero el material que domina este mercado es el cartón corrugado, debido a su bajo peso, condición fundamental en el transporte, versatilidad de diseño, buena resistencia, fácil manipulación, rotulación y por ser reciclable (Pathare et al., 2012). En el caso de Costa Rica, la disponibilidad de productos de madera debidamente empacados, incluyendo información sobre su ensamble y condiciones de uso, son limitados. Este tipo de productos se comercializan únicamente en las grandes ferreterías y por lo general son importados de países como Estados Unidos, Canadá o China.

En el caso del uso de las maderas de plantación, en especial las especies *G. arborea* y *H. alchorneoides*, aún se carece del conocimiento de las propiedades estructurales de estas en los procesos de construcción de “estructuras livianas”. En el caso de la madera de *G. arborea* proveniente de árboles en plantaciones se ha demostrado que puede ser utilizada satisfactoriamente en la construcción de Vigas-I (Moya et al., 2013, Tenorio, Moya y Carranza, 2014; Paniagua y Moya, 2014). En tanto que los usos de la madera de *H. alchorneoides* extraída de árboles de plantaciones aún son limitados, con la excepción del reciente estudio llevado a cabo por Leiva, Moya y Navarro (2017), donde muestran el uso de estas dos maderas de plantación en la fabricación de “estructuras livianas”. Así mismo es importante, diseñar productos con empaque y que contengan la información técnica y de ensamble como lo hacen otros productos que se presentan en el mercado.

Ante tal situación, el presente trabajo tuvo como objetivo

el diseño de dos cerchas “tipo pratt” con luces entre apoyos de 6 m y 9 m, construidas con madera de *Gmelina arborea* e *Hieronyma alchorneoides*, utilizando dos tipos de uniones: clavos y tornillos. Además, se establecieron los valores de resistencia y los cuadros de diseño para el uso de cerchas en casas de habitación. Finalmente, se propuso el sistema de empaque para los dos tipos de cerchas, así como un manual técnico y de armado.

## Materiales y métodos

El trabajo de diseño, construcción y análisis de las cerchas, así como la propuesta de empaque y los manuales de uso se llevaron a cabo en las Escuelas de Ingeniería Forestal, Ingeniería en Construcción y Diseño Industrial del Instituto Tecnológico de Costa Rica (9,8559° N; 83,9115° O) en Cartago, Costa Rica. Dicho estudio fue ejecutado entre los años de 2015 y 2016.

### Madera utilizada

Se utilizó madera de *Hieronyma alchorneoides* (Allemão) y *Gmelina arborea* (Roxb. ex Sm.) de aproximadamente 15 años de edad. La primera especie fue seleccionada porque la madera procedente de bosque natural es tradicionalmente utilizada para la fabricación de cerchas (Tuk, 2010). En tanto que la segunda especie, se seleccionó por su alta tasa de reforestación en Costa Rica y porque está siendo utilizada en la construcción de cerchas para casas de habitación. La madera de *G. arborea* y de *H. alchorneoides* fue obtenida de los aserraderos Maderas S&Q 2005 situado en el cantón de Pérez Zeledón, San José, Costa Rica y ECOCAJAS S.A ubicado en el cantón de Guápiles, Limón, Costa Rica, respectivamente. La madera utilizada presentaba dimensiones de 2,5 cm de espesor por 7,5 cm de ancho y largo de 2,5 m. Luego del aserrío ambos tipos de maderas fueron secadas en un horno experimental siguiendo el programa de secado detallado por Muñoz y Moya (2008) en *G. arborea* y Tenorio, Moya y Salas (2016b) para *H. alchorneoides*. En ambos casos la madera fue secada a un contenido de humedad final del 14%.

### Diseño de la cercha

Se construyeron cerchas “tipo Pratt”, la cual consta de una cuerda inferior, dos cuerdas superiores unidas al centro de la longitud de la cercha, piezas verticales que trabajan en compresión y piezas diagonales que trabajan en tensión (Figura 1). Se seleccionó este tipo de cercha debido a que es la cercha que tradicionalmente es utilizada en Costa Rica (Nieto y Solórzano, 1993). Este tipo de cercha utiliza piezas de madera con dimensiones que se adaptan a la madera obtenida de plantaciones forestales que se produce normalmente en Costa Rica. Dichas dimensiones se caracterizan por presentar poco espesor y ancho, y largos no mayores a los 2,5

m (Serrano y Moya, 2011). Se construyeron cerchas con madera de *G. arborea* y de *H. alchorneoides* con largos totales de 7,2 m y 10,2 m, las cuales se pueden utilizar en distancias o luces entre apoyos de 6 m a 9 m, respectivamente (Figura 1a-b). Los dos tipos de cerchas se diseñaron con una pendiente de 20%. La cercha de 7,2 m presentó con una altura en la parte central de 87,5 cm y en los extremos de 14,7 cm, además fue construida con 6 piezas verticales, con separaciones de 120 cm entre los centros de las piezas y 7 piezas diagonales entre las verticales (Figura 1a). En tanto la cercha de 10,2 m presentó una altura en la parte central de 114,5 cm y en los extremos de 14,7 cm y de 11 piezas verticales con separaciones de 120 cm entre los centros de las piezas y 8 diagonales entre las verticales (Figura 1b).

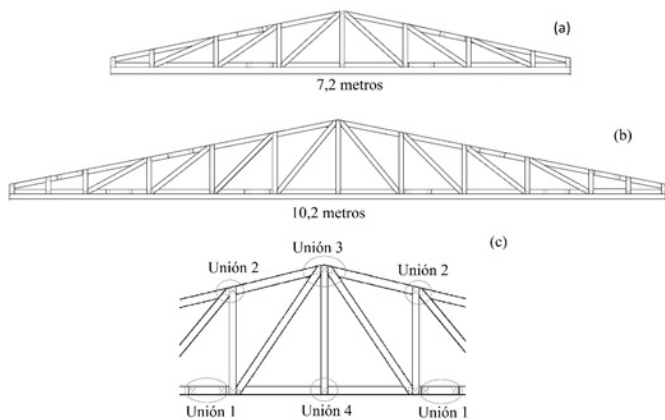


Figura 1. Cercha tipo pratt para distancias entre apoyo de 6 m (a) y 9 m (b) y los cuatro tipos de uniones (c) presentes en las cerchas construidas con madera de *Gmelina arborea* e *Hieronyma alchorneoides*.

Figure 1. Pratt type truss with bearing spans of 6 m (a) and 9 m (b) and the four types of joints (c) used in wooden trusses of *Gmelina arborea* and *Hieronyma alchorneoides*.

## Construcción de la cercha

En todos los casos se utilizó madera aserrada en condición de aserrío con dimensiones de 7,5 cm de ancho, 2,5 cm de espesor y 2,5 m de largo, y medidas nominales para la comercialización de 7,1 cm, 2,2 cm y 2,5 m respectivamente en estado seco. Durante la construcción de la cercha se buscó que el centro de una pieza de 2,5 m de largo coincidiera con el centro de la cercha. Luego se colocaron hacia los lados piezas de 2,5 cm hasta llegar a los extremos de la cercha. En el caso de las cuerdas superiores se empezó con una pieza de 2,5 m de largo del punto más alto y luego se colocaron las piezas de 2,5 m largo hasta el extremo de la cercha. En la cuerda superior se buscó que la unión de las piezas quedará a la mitad de la distancia de dos piezas verticales. En la construcción de cercha “tipo pratt” se utilizaron cuatro tipos de uniones (Figura 1c):

- Unión 1: unión por extremo, en este tipo dos piezas de madera fueron unidas por los extremos colocando una pieza de 30 cm tipo parche. En este tipo de unión se utilizó en las uniones de las cuerdas inferior y superior de la cercha.

- Unión 2: consiste de la unión de una pieza vertical con una cuerda superior o inferior. Esta unión se utilizó donde se unen una pieza vertical y una diagonal con la cuerda inferior o superior.

- Unión 3: esta unión se ubicó en la parte más alta de la cercha y se compone de la unión de las dos cuerdas superiores, una pieza vertical y dos piezas diagonales. Por tratarse de la parte central, esta fue reforzada con una pieza como parche de 30 cm de largo sujetando las piezas verticales y las dos diagonales.

- Unión 4: la unión se ubicó en la parte central inferior de la cercha y se compone de la unión de la pieza vertical central con la cuerda inferior.

## Tipos de elemento en las uniones

Las uniones de las cerchas fueron hechas mediante dos elementos de unión, los cuales permiten una conexión semirrígida y que además son los elementos más usados en Costa Rica para construcciones livianas. Los dos elementos de unión fueron: tornillo y clavo. Los tornillos usados fueron de cabeza plana tipo phillips en dos tamaños. En las uniones 1 y 2 fue usada una medida de 75 mm x 4,93 mm (tornillo #10) y en las uniones 3, 4 y 5 se usó tornillo de 50 mm x 4,27 mm (tornillo #8). Los clavos usados también fueron de 51 mm x 2,8 mm (clavo #12,5). Finalmente, los clavos o tornillos se colocaron aproximadamente a 2,5 cm del extremo de cada pieza para lograr un distanciamiento aproximado de 2,5 cm entre cada elemento de unión. Se utilizaron clavos o tornillos en cada extremo de las piezas de madera, por lo que en la unión 1, 2, 3 y 4, se usaron 10, 10, 24 y 5 elementos de unión respectivamente (Figura 1c-f).

## Pruebas de resistencia

La cercha fue ensayada en flexión estática. Durante el ensayo la cercha se colocó sobre un sistema de apoyos simples colocados a 6 m y 9 m (correspondiente a la distancia entre apoyo), dejando 60 cm hacia adentro del extremo de la cercha (Figura 2a). Las cerchas fueron mantenidas verticalmente, para evitar el movimiento lateral, mediante el uso de elementos de madera (Figura 2b). La carga se aplicó en tres diferentes puntos: sobre la pieza vertical en la parte central de la cercha y en dos piezas verticales ubicadas a cada lado de la pieza vertical del centro (Figura 2a). Para la aplicación de estas cargas durante el ensayo de la cercha fue necesaria la construcción de un aditamento para la adecuada distribución de las cargas. Este aditamento fue fabricado utilizando vigas de metal en “C” de 5,0 cm x 7,5 cm con

6,0 mm de espesor y un peso de 42 kg (Figura 2a). Este aditamento de ensayo fue modelado como elemento finito en el programa SAP2000. Se logró determinar que distribuye un 31 % de la carga en los nodos de los extremos del accesorio y un 38 % en el nodo central. Esto significa que de los 42 kg del peso del aditamento, 17,2 kg fueron aplicados en el nodo central y 12,4 kg en los otros dos nodos (laterales). Para el ensayo se colocó un sensor “tipo crackmeter” para medir el desplazamiento vertical en el centro de la cercha (Figura 2a).



Figura 2. Sistema de aplicación de carga en los ensayos de las cerchas (a), elementos de restricción utilizados para evitar el pandeo lateral de las cerchas durante los ensayos (b).

Figure 2. Load application system for trusses testing (a), restriction elements used to avoid lateral buckling of the trusses during testing (b).

### Parámetros determinados

Durante el ensayo se registró cada 5 segundos la carga y el desplazamiento en la parte central de la cercha (Figura 1a) de manera automática por medio de un “datalogger”. Luego, con esta información se construyeron gráficos de carga vs desplazamiento de todas las cerchas. Con la ayuda de estos gráficos se obtuvo la carga máxima o “carga de falla” ( $F_{falla}$ ) que representa la carga máxima que soporta la cercha. Así mismo se obtuvo el desplazamiento en el punto de proporcionalidad o límite elástico de la cercha y a este se le llamó “desplazamiento elástico”. El tercer parámetro determinado correspondió al desplazamiento máximo que tuvo la cercha en el momento que falla y este término fue llamado “desplazamiento máximo experimental” ( $\Delta_{experimental}$ ). En el momento de graficar dichas curvas el peso del aditamento fue sumado a los valores de carga aplicada sobre cada cercha. Estos parámetros fueron determinados por tipo el largo de la cercha, especie y tipo de elementos de unión (Cuadro 1).

### Diseño experimental y análisis estadístico

Se estableció un diseño experimental factorial 22 para las cerchas fabricadas de cada una de las especies

estudiadas, dos luces entre apoyo (6 m y 9 m) y dos elementos de unión (clavos y tornillos). Se construyeron seis cerchas de *G. arborea* para cada distancia entre apoyos y cada tipo de elemento de unión (2 distancia entre apoyo x 2 tipo de elemento de unión x 6 repeticiones = 24 cerchas en total), mientras que para *H. alchorneoides* se construyeron cuatro cerchas para cada distancia entre apoyos y cada tipo de elemento de unión (2 distancia entre apoyo x 2 tipo de elemento de unión x 4 repeticiones= 16 cerchas en total). De cada ensayo se obtuvieron diferentes parámetros: promedio, valor máximo y mínimo, el rango, desviación estándar, mediana y varianza. Para la carga máxima y el desplazamiento máximo se verificó la normalidad de los datos por medio de Prueba de Kolmogorov-Smirnov. Seguidamente se procedió a realizar el análisis de varianza (ANDEVA) para cada una de las especies (*G. arborea* y de *H. alchorneoides*), considerando dos factores, distancia entre apoyos (6 m y 9 m) y elemento de unión utilizado (clavos y tornillos). Finalmente, para determinar si existían diferencias significativas entre los dos tipos de uniones utilizadas (clavos o tornillos) para cada luz entre apoyos y especie, se realizó una comparación de los tratamientos por medio de la prueba de Tukey.

### Calibración del modelo

La calibración del modelo de la cercha consistió en ajustar los datos de desplazamiento en la parte central de la cercha y la carga de falla en un modelo digital mediante el programa de modelación SAP2000 (Ecuación 1). El objetivo fue lograr que el modelo proporcionara el dato de la deformación obtenida experimentalmente en la carga máxima. No es frecuente encontrar este ajuste en los modelos de simulación, de forma que para lograr las mismas deformaciones obtenidas experimentalmente, en el modelo se debe cambiar la rigidez de las uniones de las cerchas ( $K$ ), en este caso en la unión 4 (Figura 1c) que es donde se está midiendo la deformación. Como primera etapa de la calibración, en el programa de SAP2000 a cada una de las cerchas se le aplicó la carga de falla y se fue cambiando la rigidez hasta tener la “deformación máxima experimental” (Ecuación 2). Este procedimiento fue aplicado para cada tipo de cercha según: distancia entre apoyos, tipos de uniones y la

$$k = \frac{F}{\Delta} \quad (1)$$

$$\Delta_{modelo} = \frac{F_{falla}}{K} \quad (2)$$

especie de madera utilizada.

Dónde:  $F$ = fuerza;  $\Delta$ = deformación;  $K$ = rigidez;  $\Delta_{modelo}$  = deformación del modelo que debe ser igual a la desplazamiento experimental ( $\Delta_{experimental}$ );  $F_{falla}$  =

En la segunda etapa, para simular las uniones tipo 1 existentes en la cuerda inferior (unión donde fallaron las cerchas), se colocaron piezas de 10 cm de largo en el modelo virtual, para darle mayor resistencia a la unión. A estas piezas de 10 cm es a las que se les cambió la rigidez en sus extremos (nudos), este cambio de rigidez de los nudos se aplica tanto a la rigidez flexional (momento con un valor mínimo de 1 kgf/mm) como a la rigidez axial, esta última es la que se varió para poder lograr la deformación máxima al aplicar la carga de falla.

En el tercer paso, se buscó determinar la distancia a la cual se pueden colocar las cerchas unas de otras, utilizando las cargas máximas obtenidas experimentalmente y las propiedades rigidez determinadas en el modelo SAP2000. Para ello, en las cerchas se colocó una carga distribuida sobre la cuerda superior nuevamente utilizando el programa SAP2000, sin variar la rigidez axial encontrada en el paso dos. Esta carga distribuida se varió hasta que la cercha alcanza la deformación máxima teórica, la cual es  $L/360$ , siendo  $L$  la longitud entre apoyos (6 m y 9 m). Al tener que llegar a la deformación máxima teórica, se obtiene la carga máxima que soporta la cercha. Una vez conocida la carga a la cual se alcanza la deformación máxima teórica, es posible conocer la distancia ( $S$ ) a la cual se pueden colocar las cerchas. Esta separación se puede hallar utilizando el valor de carga temporal propuesto por el Código Sísmico de Costa Rica del año 2010 (CSCR-10), el cuál es de  $40 \text{ kg/m}^2$ , al dividir este valor entre la carga aplicada a la cercha para hallar la deformación máxima teórica, restándole el peso propio por metro lineal (Ecuación 3). También se puede conocer la carga máxima adicional, suponiendo que las cerchas se encuentran separadas a 1 m.

$$S = \frac{CT_{CSCR}}{CT_{apl}} \quad (3)$$

En dónde:  $CT_{CSCR}$ : carga temporal para techos propuesta por el CSCR-10,  $40 \text{ kg/m}^2$ .

$C_{T_{apl}}$  = carga temporal aplicada a la cercha, se calcula de la siguiente forma:

$C_{T_{apl}}$  = carga aplicada – peso propio (por metro lineal).

Carga aplicada = carga colocada sobre la cercha en el programa SAP2000 para hallar la deformación máxima teórica.

Al haber finalizado con las cerchas de 6 m y 9 m de luz, es posible interpolar los valores necesarios para crear dos nuevos tipos de cerchas de 4 m y 5 m de luz, conservando las mismas variables de las cerchas originales (distancia entre apoyos, tipos de uniones y especie de madera). Aunque no se determinaron en el ensayo de tamaño real las cerchas para largo entre apoyo de 4 y 5 m, estos

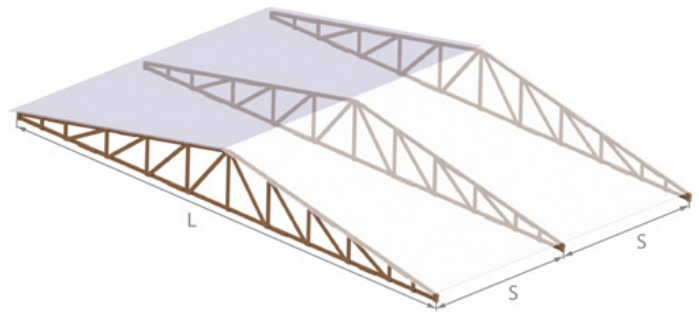


Figura 3. Separación entre cerchas y longitud en las tablas de diseño para cerchas construidas con madera de *Gmelina arborea* e *Hieronyma alchorneoides*. Nota:  $S$  = separación entre cerchas,  $L$  = luz de la cercha

Figure 3. Separation space between trusses and in the design table's length for wooden trusses of *Gmelina arborea* and *Hieronyma alchorneoides*. Note:  $S$  = truss spacing,  $L$  = truss span

son importantes para en las construcciones civiles. En la derivación de los valores para estas luces entre apoyo, se siguió el mismo procedimiento anteriormente descrito para hallar la separación mínima entre cerchas; es importante recalcar que estas fueron completamente teóricas, ya que no existen datos de laboratorio.

### Propuesta de embalaje

Para el desarrollo de la propuesta de embalaje, se tomó en cuenta la cantidad y dimensiones de las piezas que conforman las dos longitudes finales de cerchas (7,2 m y 10,2 m). Luego de cuantificadas y clasificadas por tamaños las piezas de cada cercha, se diseñó el empaque el cual debía tener las siguientes características:

1. El empaque debía permitir al producto ser auto-soportante.
2. El empaque debía ser fabricado con el material más barato posible.
3. El peso máximo del producto (madera y empaque) no debe sobrepasar los 25 kg, en concordancia con las especificaciones dadas por la Organización Internacional de Trabajo (OIT) para el peso máximo de un embalaje de manejo individual.
4. En el empaque debía estar contenido todo el material (madera y elementos de unión), y las instrucciones de armado de la cercha (manual de armado).

### Manuales de armado y técnico

Para completar la propuesta de comercialización y usos de las cerchas prefabricadas de una estructura liviana se desarrollaron dos tipos de manuales:

1. Manual de armado, dirigido a las personas que se encargarán de armar la cercha para su colocación. Este manual debe cumplir los siguientes aspectos: (i) ser lo más esquemático posible, (ii) debía representar la secuencia de pasos necesarios para el armado de las cerchas, (iii) los pasos de armado deben tener un orden lógico y (iv) ser una sola hoja ubicada dentro del empaque de la cercha.

2. Manual técnico, dirigido a ingenieros o arquitectos y debe contener: (i) la información de las características generales de la madera, (ii) los valores de diseño de las cerchas y (iii) forma de colocación de las cerchas en un techo.

## Resultados

### Resistencia de las cerchas

Los promedios de carga máxima obtenidos para las cerchas de *H. alchorneoides* fueron mayores a los obtenidos en las cerchas *G. arborea*, para la primera especie fueron de alrededor de 285,52 kg a 438,48 kg (Figura 4b) y para la segunda de 203,94 kg a 285,52 kg, considerando las dos luces entre apoyos y los dos tipos de uniones utilizados (Figura 4a). Con respecto a la carga máxima, en las cerchas construidas de madera de *G. arborea* para luces entre apoyo de 6 m y 9 m, no se presentaron diferencias estadísticas entre los dos tipos de elementos de unión utilizados, y que las cerchas para luces entre apoyo de 6 m presentaron un promedio de carga máxima mayor en comparación con las cerchas para luces entre apoyo de 9 m (Figura 4a). Las cerchas construidas con la madera de *H. alchorneoides* presentaron el mismo comportamiento que las cerchas construidas de madera de *G. arborea*, no hubo diferencias significativas entre los dos tipos de elemento de unión utilizados para los dos luces entre apoyo, pero las cerchas para luces entre apoyo de 6 m presentaron los promedios de carga máxima más altos (Figura 4b). Es importante destacar que si bien no se presentaron diferencias estadísticas entre los dos tipos de elementos de unión utilizados, las cerchas fabricadas con madera de *G. arborea* con tornillos presentaron los promedios más altos, mientras que las cerchas fabricadas con madera de *H. alchorneoides* con clavos presentaron los valores de carga máxima más altos (Figura 4a).

Los valores promedio de los desplazamientos máximos obtenidos para las cerchas fabricadas con madera de *G. arborea* y *H. alchorneoides* no presentaron diferencias estadísticas entre los dos tipos de elementos de unión utilizados para las dos luces o tamaños de cercha (Figura 1c-d). Solo se presentaron diferencias estadísticas en las cerchas fabricadas con madera de *H. alchorneoides* en las luces entre apoyo de 9 m, donde las cerchas construidas con clavos presentaron los desplazamientos

en el límite de proporcionalidad en los dos puntos de medición (central y lateral) son más altos (Cuadro 1).

En relación a otros parámetros determinados en las diferentes cerchas se observó que la carga máxima presentó rangos de variación muy amplios, sobre 100 kg, en tanto que el resto de los parámetros son presentados en el Cuadro 1.

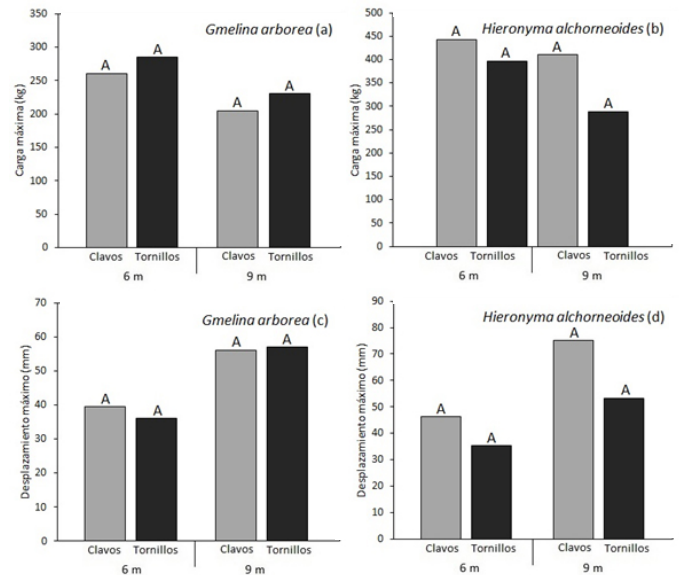


Figura 4. Carga máxima (a y b) y desplazamiento máximo (c y d) obtenidos para cerchas construidas con madera de *Gmelina arborea* e *Hieronyma alchorneoides*

Figure 4. Maximum load (a and b) and maximum displacement (c and d) obtained for wooden trusses of *Gmelina arborea* and *Hieronyma alchorneoides*.

Los valores más altos obtenidos en los promedios de carga y desplazamiento en las cerchas construidas con madera de *H. alchorneoides* para los dos tipos de luces entre apoyo y dos tipos de uniones utilizados (Figura 4, Cuadro 1), reflejan el peso específico básico (PEB) de la madera. Diversos estudios consideran que PEB es una de las propiedades que mejor define el comportamiento mecánico de la madera (Wiemann y Williamson, 1989). De forma que, las diferencias en los promedios de cargas y desplazamientos entre las cerchas construidas con madera de *G. arborea* y *H. alchorneoides*, es consecuencia de que la madera de *H. alchorneoides* presenta un PEB mayor que la madera de *G. arborea*. Para madera de *H. alchorneoides* proveniente de plantaciones forestales se reporta un PEB de 0,45 (Tenorio, Moya, Salas y Berrocal, 2016), mientras que para la madera de *G. arborea* se señala un rango de PEB de 0,30 a 0,40 (Moya y Tomazello, 2007).

Cuadro 1. Valores estadísticos determinados para los parámetros de carga y deformación en cerchas construidas con madera de *Gmelina arborea* e *Hieronyma alchorneoides*.

Table 1. Statistical values determined for the loading and deformation parameters for wooden trusses of *Gmelina arborea* and *Hieronyma alchorneoides*.

Especie	Tipo de unión	Luz entre apoyos (m)	Parámetros	Promedio	Máximo	Mínimo	Rango	Desviación Estándar	Mediana	Varianza
<i>G. arborea</i>	Clavos	6	Carga máxima (kg)	260,83	319,66	215,49	104,17	38,12	255,22	1253,47
			Desplazamiento elástico (mm)	44,33	56,6	28,78	27,82	10,43	46,07	98,58
			Desplazamiento máximo (mm)	60,36	72,2	46,49	25,71	10,11	63,51	1116,26
		9	Carga máxima (kg)	206,03	269,39	144,97	124,42	34,51	202,1	1847,47
			Desplazamiento elástico (mm)	62,72	90,1	48,15	41,95	18,7	52,12	349,68
			Desplazamiento máximo (mm)	77,45	125,01	52,81	72,2	29,85	62,52	890,75
	Tornillos	6	Carga máxima (kg)	285,6	394,56	224,23	170,33	67,25	263,62	3974,52
			Desplazamiento elástico (mm)	37,45	56,57	19,54	37,03	14,52	39,6	179,51
			Desplazamiento máximo (mm)	49,84	57,62	42,07	15,55	7,29	50,74	46,27
		9	Carga máxima (kg)	231,36	283,86	184,22	99,64	38,26	233,37	1265,65
			Desplazamiento elástico (mm)	58,83	82,4	37,57	44,83	16,3	56,2	233,19
			Desplazamiento máximo (mm)	66,15	93,6	52,28	41,32	16,9	62,15	235,08
<i>H. alchorneoides</i>	Clavos	6	Carga máxima (kg)	442,81	492,12	392,38	99,74	47,84	443,37	2288,8
			Deformación en falla (mm)	49,5	64,27	41,75	22,52	10,44	46,01	108,93
			Deformación máximo (mm)	71,76	77,44	60,77	16,67	7,62	74,42	58,03
		9	Carga máxima (kg)	455,95	578,33	290,58	287,75	122,94	477,45	15114,67
			Desplazamiento elástico (mm)	92,29	122	67,58	54,42	24,85	89,79	617,38
			Desplazamiento máximo (mm)	117,56	148,99	83,1	65,89	27,67	119,09	765,52
	Tornillos	6	Carga máxima (kg)	396,63	465,24	306,26	158,98	71,08	407,53	5051,66
			Desplazamiento elástico (mm)	36,24	39,95	33,72	6,23	2,72	35,65	7,41
			Desplazamiento máximo (mm)	43,48	50,67	39,96	10,71	4,87	41,65	23,7
		9	Carga máxima (kg)	288,85	368,95	226,81	142,14	63,07	279,82	3977,62
			Desplazamiento elástico (mm)	55,49	93,12	27,24	65,88	28,29	50,81	800,2
			Desplazamiento máximo (mm)	62,67	96,58	29,13	67,45	28,27	62,48	798,91



Este comportamiento, de menor resistencia de las cerchas fabricadas con madera de *G. arborea*, es concordante con el estudio realizado por Leiva-Leiva, Moya y Navarro-Mora (2017) para paneles de paredes prefabricados con las mismas dos especies. Dichos autores encontraron que la mayor resistencia y los menores desplazamientos se presentaron en las estructuras fabricadas con madera de *H. alchorneoides* y que esto permite un mejor desempeño estructural de la cercha.

Las diferencias en las cerchas con luces de apoyo de 6 m presentaron valores de cargas mayores y de desplazamientos menores en comparación con las cerchas con luces de apoyo de 9 m (Figuras 3 y 4, Cuadro 1). Esta tendencia es explicada porque en las cerchas de 9 m se producen altas fuerzas de tensión en la parte inferior central de la estructura, las cuales se traducen en una menor resistencia y un mayor desplazamiento (Mc Martin, Quaille y Keenan, 1984), al contrario, de las cerchas de 6 m donde las fuerzas son menores. No obstante, es normal que cerchas con altos valores de luces entre apoyo presenten bajas resistencias y altas deformaciones en comparación con cerchas de bajas luces entre apoyo (Caruso, Wang, Marnetto y Monti, 2016).

Por otro lado, se observó el efecto de la presencia de fuerzas cortantes sobre los diferentes tipos de cerchas, luces entre apoyos, tipos de unión (clavos o tornillos) y el tipo de madera utilizada. Por ejemplo, en las cerchas construidas con madera de *H. alchorneoides* y con clavos presentaron valores de carga y desplazamiento mayores que las cerchas construidas con tornillos para el luces entre apoyo de 6 m (Figura 4c y d). Para las cerchas con luces entre apoyo de 9 m no se observó este mismo comportamiento entre los dos tipos de uniones en la cercha construida de *H. alchorneoides* (Figura 4c y d). En el caso de las cerchas construidas madera de *G. arborea* unidas con clavos y las cerchas unidas con tornillos no presentaron diferencias independientemente a la luz de apoyo (Figura 4a y b). Estos resultados indican que cuando las cerchas son construidas con maderas de alto PEB (como *H. alchorneoides*) y se utilizan luces entre apoyo cortos (6 m) donde el cortante es menor (Mc Martin, Quaille y Keenan, 1984), los clavos brindan una mayor resistencia en relación a los tornillos, pero si las cerchas son construidas con maderas de bajo PEB no hay diferencia entre utilizar clavos o tornillos, esto debido probablemente a que la resistencia de la cercha es más limitada por el tipo de unión utilizado y no la distancia entre apoyo. Comportamiento contrario al que ocurre en las cerchas con distancia entre apoyo de 9 m, donde las cargas que se aplican producen grandes fuerzas de cortante, haciendo que la resistencia este limitada por el tipo de madera utilizada en la construcción de las cerchas y no por el tipo de unión.

## Modelo de simulación y cuadros de diseño

Además de determinar el valor de rigidez (k) para los dos tipos de cerchas, se calcularon valores de rigidez para cerchas con separación entre apoyos de 4 m y 5 m, aunque no se determinaron en el ensayo de tamaño real, esto es relevante para en las construcciones civiles. Los resultados mostraron que el valor de K fue mayor en las cerchas de mayor distancia entre apoyos, por lo que la rigidez decrece (Cuadro 2). Así mismo, fue evidente que la rigidez es más alta en las cerchas construidas con tornillos y con madera de *H. alchorneoides* (valor  $P < 0.01$ ).

En relación con la separación (S) entre las cerchas se derivó que se deben utilizar para 4 diferentes luces entre apoyo (Figura 3), 4 m, 5 m, 6 m y 7 m en madera de *G. arborea* y *H. alchorneoides* y los dos tipos de elementos de uniones. En el cuadro 2 se presentan las respectivas cargas máximas para esas separaciones y la carga máxima temporal que soportarían las cerchas si éstas tienen una separación entre cerchas de 1 m.

## Diseño o propuesta de embalaje

En la propuesta del diseño de empaque (Figura 5), se propuso que todas las piezas que componen las cerchas con luces de 6 m y 9 m (Figura 6a, sección de piezas) formaran dos paquetes: uno con las piezas de 2,5 m de largo y otro paquete que contiene las piezas verticales y diagonales de las cerchas. Las dimensiones de cada uno de los paquetes en cada cercha se detalla en la figura 5 (a-b). El empaque así tiene las siguientes características:

- Los paquetes no deben sobrepasar los 25 kg de peso.
- El embalaje no solo protege la madera sino que mantiene todas las piezas juntas también.
- El embalaje es fabricado con cartón corrugado flauta "C", es que es el material más barato para empaque. Este cartón corrugado es un material liviano, cuya resistencia se basa en el trabajo conjunto y vertical de estas láminas de papel
- El empaque de cartón es producido por una máquina troqueladora que indica los dobleces de las cajas y sale de forma plana y este se dobla cuando se empaca la cercha (Figura 5d).
- En los extremos se coloca una capucha con corte de troquel y luego se arma y se coloca mediante el uso de flejes en los extremos de la caja (Figura 5d).
- Es necesaria la colocación de 3 flejes, adicionales a los de los extremos, distribuidos en el largo de las cajas de 2,5 m, y de un fleje en el caso de la caja de 1,35 m (Figura 5d).

Cuadro 2. Valores de diseño para cerchas construidas con madera de *Gmelina arborea* e *Hieronyma alchorneoides*

Table 2. Design values for wooden trusses of *Gmelina arborea* and *Hieronyma alchorneoides*

Especie	Elemento de unión	Luz entre apoyos (m)	Rigidez de unión 4 (kg-mm)	Separación (m)	Carga máxima (kg/m)	Carga máxima temporal con 1 m de separación (kg/m <sup>2</sup> )
<i>G. arborea</i>	Clavos	4	63,22	0,72	31,00	28,69
		5	66,65	0,61	27,00	24,51
		6	70,07	0,61	26,80	24,36
		9	80,34	0,27	13,20	10,72
	Tornillos	4	90,93	1,02	43,00	40,67
		5	92,51	0,84	36,75	33,77
		6	94,10	0,80	34,50	32,06
		9	98,86	0,34	16,15	13,67
<i>H. alchorneoides</i>	Clavos	4	93,85	1,10	47,27	44,09
		5	98,23	0,92	19,45	36,64
		6	102,60	0,93	39,50	37,06
		9	115,75	0,39	19,45	15,73
	Tornillos	4	135,56	1,55	49,50	61,84
		5	133,95	1,25	21,40	50,14
		6	132,35	1,18	49,50	47,06
		9	127,54	0,44	21,42	17,72

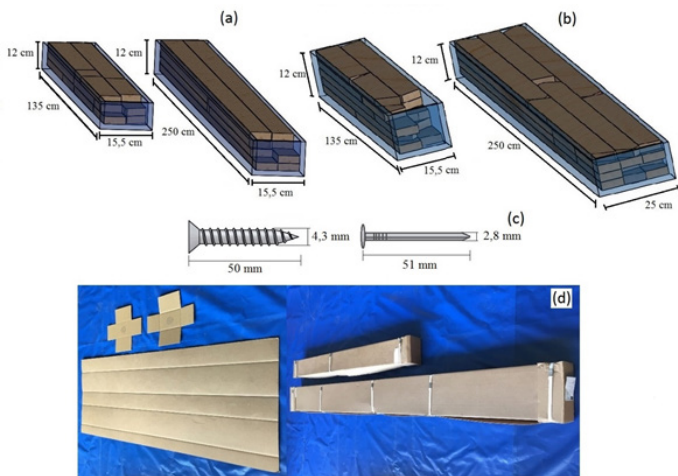


Figura 5. Diseño de acomodo y empaque para las piezas de las cerchas con luces de 6 m (a) y 9 m (b), clavos y tornillos utilizados en la fabricación de las cerchas (c) y propuesta de embalaje (d) para las cerchas construidas con madera de *Gmelina arborea* y *Hieronyma alchorneoides*.

Figure 5. Layout and packaging design for truss pieces with 6 m (a) and 9 m (b) bearing span, nails and screws used in the manufacture of trusses (c) and packaging proposal (d) for wooden trusses of *Gmelina arborea* and *Hieronyma alchorneoides*.

## Manuales de armado y técnico

Para completar la propuesta de comercialización y uso de las cerchas prefabricadas de una estructura liviana se desarrollaron dos tipos de manuales:

- Un manual de armado; está dirigido a las personas que se encargarán de armar la cercha para su colocación. Este manual cumple los siguientes aspectos: (i) esquemático, (ii) representa la secuencia de pasos necesarios para el armado de las cerchas, (iii) los pasos que se presentan en el manual de armado tienen un orden lógico y (iv) es una sola hoja que se encuentra dentro del empaque de la cercha.

- Manual técnico: este manual está dirigido a ingenieros o arquitectos y contiene: (i) la información de las características generales de la madera, (ii) los valores de diseño de las cerchas y (iii) forma de colocación de las cerchas en un techo.

## Manuales de Armado y técnico

Primeramente el manual de armado, se diseñó de manera gráfica (Figura 6) y consistió de una hoja tamaño carta en donde se encuentran debidamente enumeradas todas las piezas. En este se detalla cada uno de los pasos

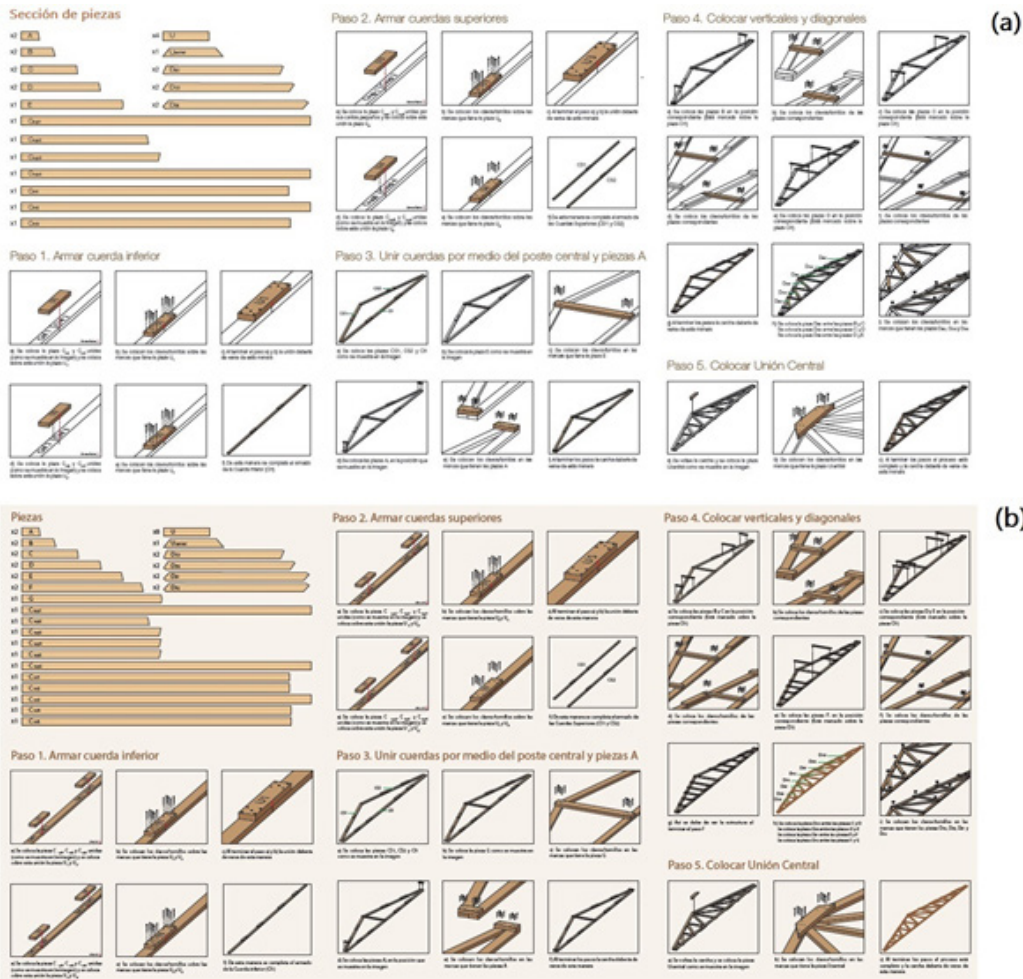


Figura 6. Manual de armado para cerchas con luz de 6 m (a) y 9 m (b) construidas con madera de *Gmelina arborea* y *Hieronyma alchorneoides*  
 Figure 6. Assembling manual for 6 m (a) and 9 m (b) bearing span wooden trusses constructed with *Gmelina arborea* and *Hieronyma alchorneoides*

que se deben seguir para el armado de cada una de las cerchas de las dos longitudes de apoyo (Figura 6). Se indica la forma como la cercha debe armarse: (1) armar la cuerda inferior, (2) la cuerda superior, (3) unir estas dos cuerdas por medio de la pieza central (4) colocar las piezas verticales y diagonales y por último armar la unión central.

En el caso del manual técnico: este manual está dirigido a ingenieros o arquitectos y muestra de forma gráfica como deben ser ancladas las cerchas en diferentes tipos de soporte, sea madera, concreto o metal. Se presentan los valores las luces entre apoyo y separación para las cerchas construidas con los diferentes tipos de madera y los dos tipos de elementos de unión, que corresponde al cuadro 2. Asimismo, se da una descripción de las dos especies de madera utilizada para construir las cerchas (Figura 7).

## Referencias

Allaoui, S., Aboura, Z., y Benzeggagh, M. L. (2009). Effects of the environmental conditions on the mechanical behaviour of the corrugated cardboard. *Composites Science and Technology*, 69(1), 104-110.

Barbari, M., Cavalli, A., Fiorineschi, L., Monti, M., y Togni M (2014). Innovative connection in wooden trusses. *Construction and Building Materials*, 66: 654-663.

Caruso, S., Wang, R., Li, Z., Marnetto, R., y Monti, G. (2016). Highly Standardized Long-span Hybrid Trusses. *Applied Mechanics and Materials*, 847:485-491.

Hägglund, R., y Carlsson, L. A. (2011). Packaging performance. En K. Niskanen (Ed.), *Mechanics of paper products*. Berlin, Alemania: De Gruyter.

Fournier, R. (2008). Construcción sostenible y madera: realidades, mitos y oportunidades. *Tecnología en Marcha*, 21(4): 92-101.

Leiva-Leiva, T., Moya, R., y Navarro-Mora, A. (2017). Lateral performance of prefabricated timber wall frames made of *Hieronyma alchorneoides* and *Gmelina arborea* wood

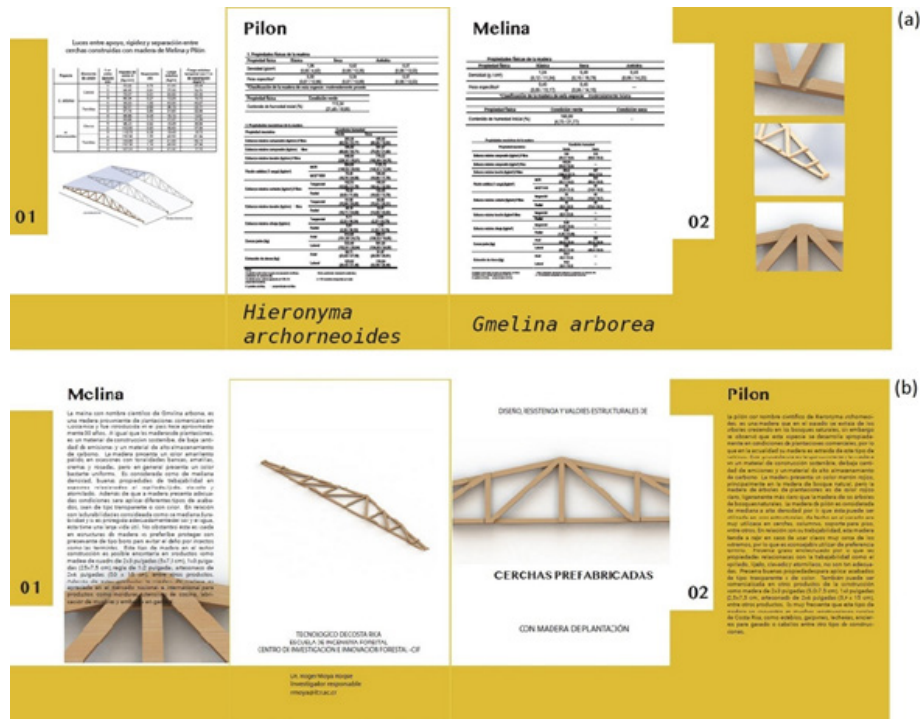


Figura 7. Parte interior (a) y parte exterior (b) del manual de técnico para cerchas construidas con madera de *Gmelina arborea* y *Hieronyma alchorneoides*.

Figura 7. Interior part (a) and outside part (b) of technical manual for wooden trusses of *Gmelina arborea* and *Hieronyma alchorneoides*

using nail and screw fasteners. Journal of Wood Science (submitted)

Malavassi, R. (2010). La vivienda de madera de los barrios del sur del cantón central de San José, Costa Rica (1910-1955). Los corredores históricos como una herramienta para su estudio. Escuela de Historia, Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica. 56 p.

McMartin, K. C., Quaile, A. T., y Keenan, F. J. (1984). Strength and structural safety of long-span light wood roof trusses. Canadian Journal of Civil Engineering, 11(4): 978-992.

Moya, R. (2004). Wood of *Gmelina arborea* in Costa Rica. New Forests, 28(2-3): 299-317.

Moya, R., y Tomazello, M. (2007). Wood density and fiber dimensions of *Gmelina arborea* in fast growth trees in Costa Rica: relation to the growth rate. Revista Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales, 16(3): 267-276.

Moya, R., Leandro, L., y Murillo, O. (2009). Características de la madera de *Terminalia amazonia*, *Vochysia guatemalensis* y *Hieronyma alchorneoides* plantadas en Costa Rica. Bosque, 30(2): 78-87.

Moya, R., Tenorio, C., Carranza, M., Camacho, D., y Quesada, H. (2013). Structural performance of I-beam fabricated from a fast-growing tree, *Gmelina arborea*. Journal of Tropical Forest Science, 25(2):151-156.

Muñoz, F. y Moya, R (2008). Moisture content variability in kiln-dried *Gmelina arborea*: effect of radial position and anatomical features. Journal of Wood Science, 54(4): 318-322

Nieto, C., y Solórzano, B. (1993). Sistemas constructivos para la vivienda de interés social en Costa Rica. San José Costa Rica 40 p.

ONF (2015) Oficina Nacional Forestal. Usos y aportes de la madera en Costa Rica-Estadísticas 2013. Ministerio de Energía, Minas y Telecomunicaciones. San José, Costa Rica. 37 p

Paniagua y Moya, 2014

Pathare, P. B., y Opara, U. L. (2014). Structural design of corrugated boxes for horticultural produce: a review. Biosystems Engineering, 125: 128-140.

Pathare, P. B., Opara, U. L., Vigneault, C., Delele, M. A., y Al-Said, F. A. J. (2012). Design of packaging vents for cooling fresh horticultural produce. Food and Bioprocess Technology, 5: 2031-2045.

Serrano, R., y Moya, R. (2011). Procesamiento, uso y mercado de la madera en Costa Rica: aspectos históricos y análisis crítico. Revista Forestal Mesoamericana, 9(21): 1-12.

Tenorio, C., Moya, R., y Camacho, D. (2012). Propiedades físico mecánicas de tableros terciados construidos con especies tropicales de plantaciones para uso estructural. Cerne, 18(2). 317-325.

Tenorio, C., Moya, R., y Carranza, M., (2014). Vigas tipo I para la construcción civil fabricadas con madera de plantaciones de rápido crecimiento en Costa Rica. Tecnología en Marcha, 27(especial): 50-59.

Tenorio, C., Moya, R., Salas, C., y Berrocal, A. (2016a). Evaluation of wood properties from six native species of forest plantations in Costa Rica. Revista Bosques, 37(1): 12-25.

Tenorio, C., Moya, R. y Salas, C., (2016b). Kiln drying behavior

utilizing drying rate of lumber from six fast-growth plantation species in Costa Rica. *Drying Technology*, 34(4): 443-453.

Tuk, J. (2010). *Madera: Diseño y Construcción*. San José: Colegio De Ingenieros y Arquitectos. San José, Costa Rica.

Wiemann, M. C., y Williamson, G. B. (1989). Wood specific gravity gradients in tropical dry and montane rain forest trees. *American Journal of Botany*, 76(6): 924-928.

Woods, B. K. S., Hill, J., y Friswell, M. I. (2016). Ultra-efficient wound composite truss structures. *Composites: Part A*, 90:111-124.

Wolfsmayr, U. J., Rauch, P. (2014). The primary forest fuel supply chain: a literature review. *Biomass Bioenergy*, 60: 203-221.