

# Estructuras livianas a partir de piezas menores de madera de plantación

Fecha de recepción: 07/12/06  
Fecha de aceptación: 30/03/07

Aldo Ramírez Coretti<sup>1</sup>  
Rafael Serrano Montero<sup>2</sup>  
Carl A. Eckelman<sup>3</sup>  
Eva Haviarova<sup>4</sup>

*Se presentan los resultados de un estudio exploratorio, parte de una serie de investigaciones conjuntas desarrolladas y en proceso de desarrollo, alrededor de esta temática. Su ejecución respondió, entre otras, a inquietudes presentadas por diversos productores de madera de plantación.*

## Palabras clave

Máquina espigadora, estructuras, madera, marcos, uniones, paneles, raleos.

## Resumen

Se presentan los resultados de un estudio exploratorio, parte de una serie de investigaciones conjuntas desarrolladas y en proceso de desarrollo, alrededor de esta temática. Su ejecución respondió, entre otras, a inquietudes presentadas por diversos productores de madera de plantación. El estudio consideró el diseño y fabricación de una máquina espigadora de piezas estructurales. También procuró explorar el potencial de aprovechamiento de piezas producto de raleos de madera de plantación para la fabricación de estructuras livianas. Se llevaron a cabo ensayos de uniones, de marcos simples con dos paneles de cerramiento comerciales, empleando cuatro especies de madera de plantación. También se llevó a cabo la fabricación de las piezas y montaje de una estructura modelo, empleando el equipo y

otra información obtenida como resultado de la investigación. Los resultados muestran un gran potencial para el desarrollo de un sistema de construcción ágil y modular. Asimismo, las resistencias obtenidas son adecuadas para las condiciones a que estarían expuestas las estructuras.

## Introducción

La existencia de grandes volúmenes de árboles con diámetros menores que se descartan, tanto en los raleos como en el procesamiento por falta de dimensiones adecuadas, se incrementa a medida que el cultivo de madera de plantación avanza. A pesar de su abundancia, disponible para su conversión en otros productos de valor agregado, se debe verificar que estos sean lo suficientemente valiosos como para justificar los costos de su recolección y posterior uso. Según lo anotan Wolfe (2000) y Wolfe y Moseley (2000), las aplicaciones para fines estructurales ofrecen un alto potencial de productos de valor agregado a partir de árboles de diámetros menores. Desde un punto de vista estructural, deben

1. Académico del Instituto Tecnológico de Costa Rica. Correo electrónico: [aramirez@cfia.or.cr](mailto:aramirez@cfia.or.cr)
2. Académico del Instituto Tecnológico de Costa Rica. Correo electrónico: [jserrano@itcr.ac.cr](mailto:jserrano@itcr.ac.cr)
3. Académico de la Universidad de Purdue, Indiana, EE. UU. Correo electrónico: [carle@purdue.fnr.edu](mailto:carle@purdue.fnr.edu)
3. Académico de la Universidad de Purdue, Indiana, EE. UU. Correo electrónico: [ehaviar@purdue.fnr.edu](mailto:ehaviar@purdue.fnr.edu)

resolverse varios problemas. En particular, deben buscarse métodos resistentes, pero a la vez costeables para las uniones.

Otros estudios realizados con mobiliario (Haviarova *et al.*, 2001a, b) indican que las uniones de orificio y espiga redonda poseen un gran potencial como conectores en marcos construidos con madera de diámetros menores. Los estudios muestran que se pueden lograr uniones de muy buena calidad con el empleo de equipo sencillo y disponible en todo lugar.

A pesar de este potencial, aún no se han realizado estudios de este tipo de unión en tamaños adecuados para la construcción de edificaciones. Los resultados obtenidos en pruebas de mobiliario (Eckelman *et al.*, 2001) muestran que este tipo de unión es muy eficiente en la transmisión de cargas de flexión y altamente resistente a cargas cíclicas. Sin embargo, se debe tener en cuenta que la resistencia de la unión depende básicamente de la resistencia de la espiga y, por lo tanto, no hay forma de reforzar este tipo de unión si se requiere de mayor resistencia. Como resultado, los marcos de edificaciones deben diseñarse de manera que las fuerzas resistentes internas de flexión se distribuyan uniformemente a los diferentes miembros y uniones. Además, deben incluirse una cantidad suficiente de miembros en el diseño para garantizar que la resistencia interna total de la construcción sea suficiente para resistir las cargas impuestas a la estructura. Por lo tanto, la naturaleza inherente de los diseños que se busca lograr es tal que se emplean numerosos miembros pequeños para la construcción en vez de unos pocos miembros de mayor tamaño.

Investigaciones paralelas también han mostrado que a pesar de que este tipo de unión funciona bien en mobiliario, no posee suficiente resistencia a tensión para operar como una unión sometida puramente a tensión dentro de la estructura. Además, el uso de uniones ajustadas (como en el caso de mobiliario), haría

difícil la fabricación de estas uniones en tamaños mayores. En general, se tiene que los diseños de estos marcos deben ser tales que se evite someter a la espiga a tensión. Estudios piloto con mobiliario muestran que se pueden obtener uniones muy resistentes usando espigas sujetadas por medio de un “pin”, que sea la mitad del diámetro de la espiga y que se inserta atravesando tanto al elemento como a la espiga (Eckelman; Erdil; Haviarova, e.p.). Este tipo de construcciones proveería suficiente resistencia a las uniones secundarias que no estén expuestas a cargas continuas, uniones como las usadas para anclar el techo, de manera que se evite el levantamiento por efectos del viento. Sin embargo, estudios realizados por Akcay, Eckelman; Haviarova (e.p) muestran que la capacidad para resistir momentos “flexores” se ve reducida por el empleo de pines. Lo anterior, por la reducción de sección efectiva de la espiga.

## Definición del problema

Mientras la disponibilidad de madera de plantación aumenta y se busca su entrada en diferentes sectores de la economía nacional, existe un incremento de material que por sus características no puede emplearse para los usos actuales. Lo anterior presenta problemas de contaminación ambiental y el desaprovechamiento de recursos naturales que podrían solventar otras necesidades. En particular, el faltante crónico de refugios a costos accesibles y de otras construcciones a base de marcos livianos. La solución total a problemas de esta naturaleza se aleja de las posibilidades de un solo proyecto como este. Sin embargo, el uso de material actualmente desaprovechado puede proveer de soluciones o aportes parciales que se irán complementando conforme se avance en estudios posteriores o complementarios. La aplicación inicial en vivienda rural es una alternativa más, los resultados podrán emplearse para la fabricación de viviendas básicas, refugios

*Investigaciones paralelas también han mostrado que a pesar de que este tipo de unión funciona bien en mobiliario, no posee suficiente resistencia a tensión para operar como una unión sometida puramente a tensión dentro de la estructura. Además, el uso de uniones ajustadas (como en el caso de mobiliario), haría difícil la fabricación de estas uniones en tamaños mayores*

en parques nacionales, graneros, bodegas pequeñas, etc. El sistema que se propone hace uso de muchas piezas de menor tamaño, con lo cual el aprovechamiento de los recursos será mayor. El problema por solventar en este caso es el desarrollo de conexiones mejoradas y resistentes. Su desarrollo podrá aportar mejoras al medio ambiente y a las vidas de muchas personas. Asimismo, contribuiría al desarrollo económico de otras zonas del país, y el regreso al control de las comunidades sobre el uso de los recursos naturales renovables de que disponen.

## Objetivo

El objetivo general del proyecto fue llegar a crear un conjunto de partes estandarizadas, que se puedan incorporar a diseños modulares fabricados por mano de obra no calificada, que requiera de poco o ningún equipo especializado para su construcción. Las partes se elaborarían a partir de piezas cortas de madera de plantaciones forestales, provenientes de raleos o de partes no aptas para la fabricación de piezas de mayor tamaño.

Por la necesidad de contar antes con información relativa a la resistencia y comportamiento de las uniones con este tipo de construcción, se llevó a cabo este primer subproyecto, cuyos objetivos específicos fueron:

1. Diseño y fabricación de equipo
2. Diseño, fabricación, y prueba de uniones
3. Fabricación y ensayo de marcos pequeños
4. Montaje de una estructura modelo

Los resultados detallados del estudio se pueden consultar en el Informe Final del proyecto correspondiente (Ramírez C., A.; Serrano M., R.; 2005).

## Metodología

### Material de ensayo

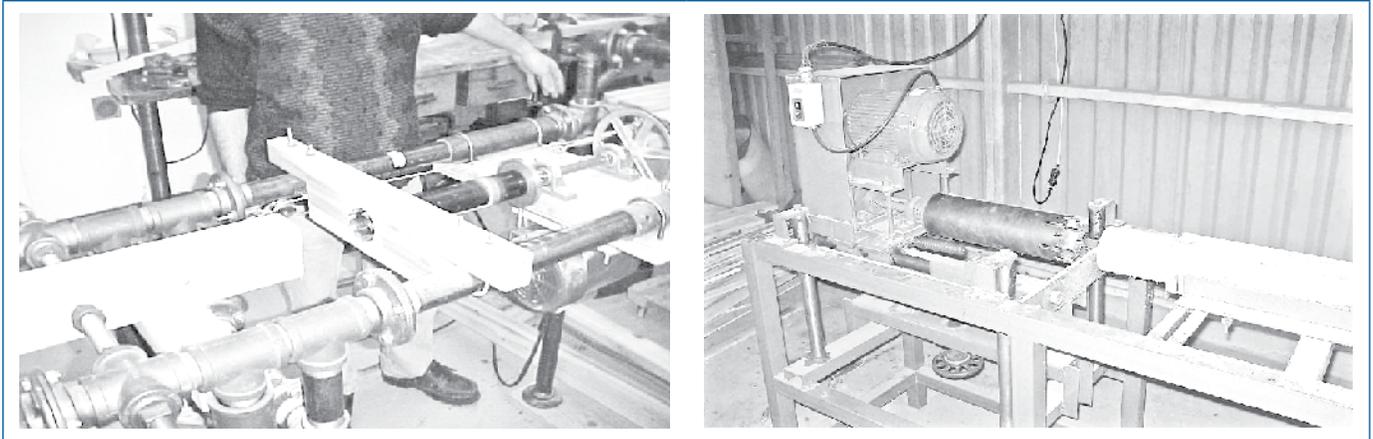
Para la ejecución de los ensayos, se seleccionaron cuatro especies de madera: melina (*Gmelina arborea*), teca (*Tectona grandis*), laurel (*Cordia alliodora*) y ciprés (*Cupressus lusitanica*). Parte de este material se obtuvo de empresas que donaron las trozas, las cuales fueron transportadas al ITCR para aserrarlas. En el caso de melina y laurel, no fue posible obtener material adecuado y a tiempo para la elaboración de las piezas de todos los ensayos. En el caso de las pruebas de uniones, se emplearon las especies melina, teca, y laurel. Para las pruebas de marcos, se emplearon las especies ciprés y teca.

### Diseño y fabricación de equipo

Para la elaboración de las espigas fue necesario diseñar y fabricar una máquina para este fin, junto con otras adaptaciones que permitieran el corte de las piezas.

Se dispuso de un primer esquema y construcción de la máquina para la fabricación de las espigas redondas en las piezas de madera de 8,9 x 8,9 cm (4" x 4" medida nominal) en la Universidad de Purdue. Se confeccionó utilizando tubería de hierro galvanizado de varias medidas (1, 1,5 y 2 pulgadas de diámetro nominal), la que se unió por medio de accesorios típicos utilizados en cañerías de agua potable (uniones de rosca interna, tes [T], codos de rosca interna, etc. (figura 1a), con el fin de producir una estructura de apoyo de la unidad motriz así como de la unidad de sujeción de la madera.

Para el prototipo de máquina diseñado y fabricado en el Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR), se consideró la utilización de tubo cuadrado de hierro negro (en sustitución de la tubería de hierro galvanizado más cara) unido por medio de soldadura, con lo que se conseguía una



(a)

(b)

Figura 1: Vista parcial de la máquina para hacer espigas (a) preliminar fabricada en la Universidad de Purdue, (b) final fabricada en el ITCR

máquina de mayor rigidez, que pudiera producir tirajes en mayor cantidad de piezas de madera (figura 1b). Con base en este diseño y con los cambios considerados, se procedió a la búsqueda de fabricantes locales que pudieran cotizar la elaboración de la máquina. Dado que el costo que se cotizó era superior a lo presupuestado, se tuvo que volver a readecuar el diseño a

uno más simple. Una vez realizados los cambios, se cotizó de nuevo la máquina, la cual se fabricó en el segundo semestre del 2002. La máquina del ITCR tiene además ajuste vertical y del movimiento horizontal de la broca sierra por medio de tornillos roscados. A su vez, el mecanismo para dar la presión transversal para sujetar la pieza de madera, es mediante un volante tipo timón (figura 2) que permite autocentrar la pieza al acercar y/o alejar los angulares en forma simétrica desde el centro de la broca sierra.



Figura 2. Vista longitudinal de máquina y sistema de sujeción de pieza de madera

Para precisar con mayor detalle el componente principal donde se sujeta la broca sierra (elemento cortante), se fabricó un aditamento especial. En la figura 3 se puede ver un detalle de esta parte.

La base de la broca sierra, o sea, la parte trasera con diámetros nominales de 5, 7,5 y 10 cm (2, 3 y 4 pulg.), es enroscada en un eje (figuras 1b y 3) con un diámetro de 19 mm (3/4 pulg.) con rosca estándar de 10 hilos por pulgada lineal. Para darle mayor estabilidad durante el régimen de operación debido al giro, se procedió a soldar un disco de 10 cm (4 pulg.) en el eje de 19 mm.

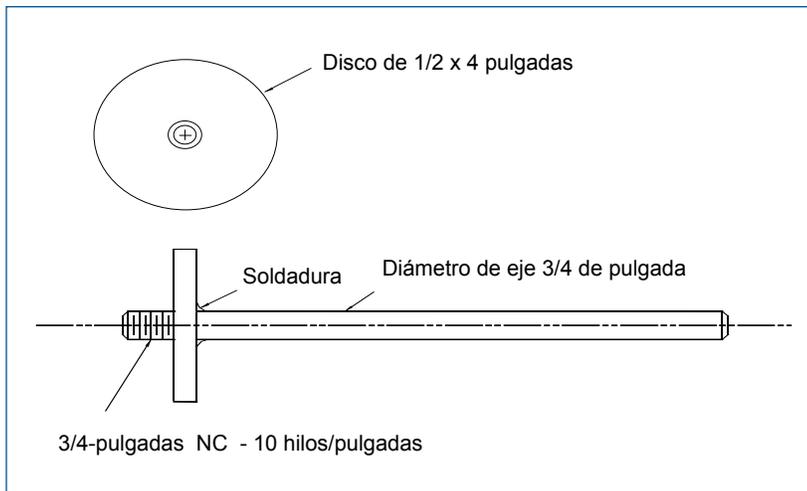


Figura 3. Componente de sujeción de la broca sierra

Otro aspecto importante fue definir la velocidad angular (rpm) del eje. Según la recomendación inicial, el rango de velocidad usual estaría entre 350 y 500 rpm, por lo que se inició con la velocidad más baja. Sin embargo, después de realizar las pruebas, se observó que la calidad de las superficies de madera no era buena por lo que decidió incrementarla a 500 rpm, con lo que se esperaba resolver el problema. Esto contribuyó bastante, pero en el caso de la madera de especie melina (madera mayormente plantada en Costa Rica), dicha velocidad no fue suficiente debido, principalmente, a la aparición de vellosidad en la superficie de la espiga. Finalmente, se optó por incrementar la velocidad a 560 rpm, con lo que se logró una buena superficie de corte. Esta velocidad fue la que finalmente se mantuvo en el prototipo de máquina fabricado.

En relación con la potencia del motor, se recomendó inicialmente un motor de 0,55 kW (0,75 hp) para broca sierras de 5 cm (2 pulg.); sin embargo, dado que se utilizarían herramientas de mayor tamaño, se decidió adquirir un motor eléctrico de 1,50 kW (2 hp).

Posteriormente a la fabricación de la máquina, se procedió a adquirir las brocas

sierras de corte que se usarían con la máquina. Estas fueron encargadas en los Estados Unidos, de acuerdo con la información suministrada de las características de la máquina. Se efectuaron las primeras pruebas para determinar el desempeño de la herramienta y la máquina. Una vez puesta la máquina en operación para hacer espigas en forma continua, se tuvo un problema adicional, debido a que cuando se desafilaban las herramientas (brocas sierras) fabricadas en EE. UU, no se podían reafilar con el equipo disponible. Por esta razón, se tuvo que diseñar y fabricar varios accesorios para su correcto afilado.

Fue necesario también diseñar un aditamento y un accesorio para la sierra circular “ingleteadota”, con el fin de eliminar el remanente externo de la espiga.

### Diseño, fabricación, y prueba de uniones

Para los ensayos de uniones, se buscó emplear brocas sacabocado de 5, 7,5 y 10 cm por 30 cm de largo (2, 3, y 4 pulgadas de diámetro por 12). Sin embargo, debido al tamaño de las trozas y al tamaño máximo de espécimen que se pudo obtener, solamente se pudo emplear una broca sacabocado de 5 cm (2 pulgadas). Para producir los orificios, se usó un taladro de pedestal. Se distribuyó el material aleatoriamente a cada espécimen de las pruebas. Previo a los ensayos, se determinaron las dimensiones de las espigas, las secciones de la unión, y de los orificios. Las pruebas de uniones buscaron obtener información base para los diseños subsecuentes de marcos. Los ensayos de las uniones incluyeron flexión y cortante lateral. También se emplearon tres especies (melina, laurel, y teca), y dos tipos de sección. La primera, una sección sólida y, la segunda, una sección donde se empleó el sistema de encolado descrito en un estudio previo (Serrano, 1999).

Para la realización de los ensayos, fue necesario diseñar y fabricar un apoyo

lateral para sujetar los especímenes. Los ensayos a flexión se llevaron a cabo con piezas cuadradas de sección nominal 3,5" x 3,5". Se consideraron dos condiciones: la espiga totalmente inserta en el apoyo u orificio, y la espiga salida del orificio unos cinco centímetros. Lo anterior procuraba estudiar el efecto en la resistencia de la unión de partes (espiga y orificio) que

por el uso o mala colocación no quedan totalmente acopladas.

Los ensayos de cortante lateral se llevaron a cabo para determinar tanto la resistencia lateral a cortante de la espiga como la distancia mínima de apoyo necesaria para desarrollar la resistencia máxima. Las figuras 4, 5 y 6 muestran la forma de aplicación de la carga para cada tipo de ensayo.

### Fabricación y ensayo de marcos pequeños

Se fabricaron marcos modulares de 1,22 x 2,44 metros que responden a las dimensiones de los tableros de cerramiento disponibles en el país. La sección transversal de las piezas fue de 8,90 x 8,90 cm (3,5" x 3,5"). Los marcos se ensayaron para evaluar su comportamiento a carga lateral. Se observó como norma de referencia la especificación ASTM E-564.

Para lograr las condiciones de sujeción de los marcos que recomienda la norma anterior, fue necesario diseñar y fabricar elementos especiales. Con miras a determinar el efecto rigidizador de los materiales de forro, se elaboraron marcos adicionales con láminas de madera contra chapada (*plywood*) de 12 x 1222 x 2440 mm y con láminas de fibrocemento de 11 x 1219 x 2438 mm. Se emplearon los tornillos recomendados por el fabricante de las láminas de fibrocemento (tipo PL8-100 de punta aguda N.º 6x1)". Estos se colocaron según lo indicó el fabricante. Al no obtener recomendaciones del fabricante de la madera contrachapada, al respecto, se empleó la misma distribución. Los ensayos se realizaron empleando un sistema de pistón manual, en combinación con una serie de medidores de desplazamiento para determinar las deformaciones que experimentaba cada marco ante la aplicación de la carga lateral. Los datos de carga y deformación se emplearon para elaborar los gráficos correspondientes.

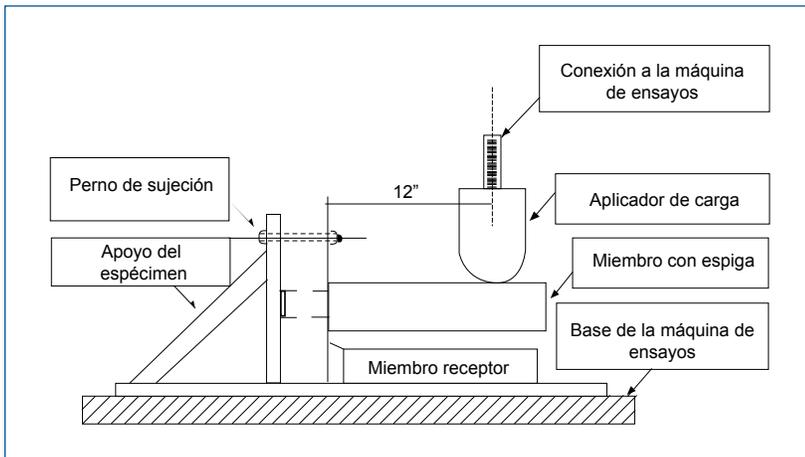


Figura 4. Esquema del ensayo a flexión

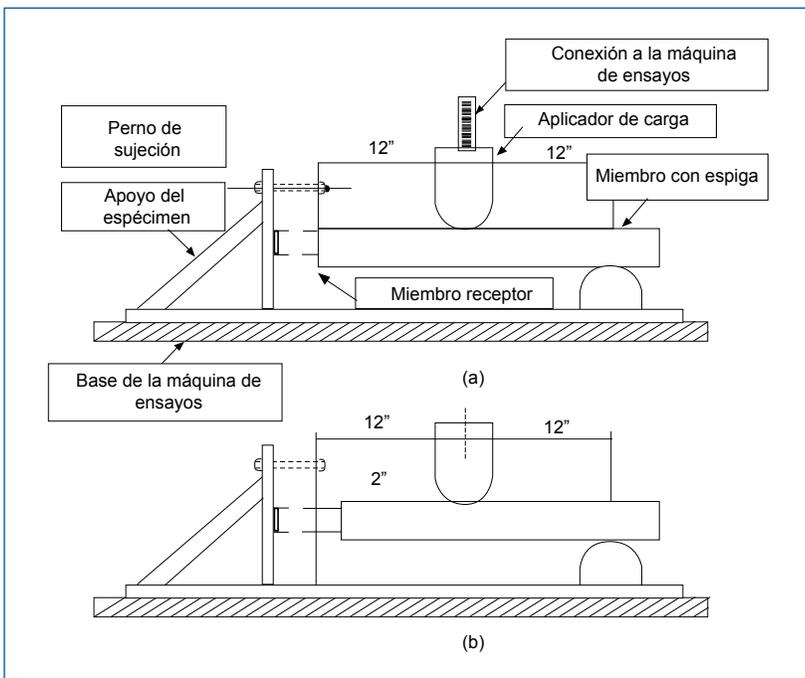


Figura 5. Esquema del ensayo a cortante. En (a) con espiga totalmente apoyada en la unión. En (b), la espiga sobresale 5 cm



Figura 6. Ensayo de una unión

Se emplearon dos especies de madera, pino y teca, y se realizaron cuatro repeticiones por combinación. El total de ensayos realizados fue de 24 marcos. Durante los ensayos se hicieron anotaciones para determinar el comportamiento, para comprobar cuán bien se distribuyen las cargas a los miembros y uniones y, la capacidad de los miembros individuales y



Figura 7. Vista de frente de la estructura modelo fabricada

uniones para resistir esas cargas. Asimismo, una vez suspendida la prueba, se anotó la deformación después de cinco minutos. Lo anterior para calcular la recuperación del marco una vez removida la carga. Por las dimensiones del material empleado, se ensayaron uniones con tamaño de espiga de 2 pulgadas. Previo a los ensayos se determinaron las dimensiones de las espigas, las secciones de la unión, y de los orificios. Este conjunto de ensayos procuró también determinar la rigidez de la estructura y verificar si fuese necesario darle mayor apoyo por medio de elementos colocados diagonalmente hechos de madera u otro material.

### Montaje de una estructura modelo

Se consideraron varios marcos basados en conceptos modulares con piezas estandarizadas y se llevó a cabo el montaje de una estructura modelo (figura 7). Para esta etapa, por limitaciones en la disponibilidad de material de ensayo, se emplearon piezas de madera de pino radiata (*Pinus radiata*) disponible en el mercado nacional. Estas, sin embargo, fueron de una sección mayor a las piezas empleadas en los ensayos de laboratorio dado que los distribuidores no contaban con piezas de menor sección. La estructura modelo resultante, claro está, resultó estar sobre diseñada.

Se estima que por medio del método de fabricación las partes se podrán enviar al sitio y la estructura levantada con facilidad. Una vez optimizado el proceso, se podrán colocar unas cuantas estructuras tipo refugio en varios parques nacionales para llevar un control de su desempeño con el tiempo. Esto último se llevará a cabo en una segunda etapa del proyecto.

### Discusión de resultados

#### Diseño y fabricación de equipo

El diseño y construcción de la máquina y sus aditamentos respondió a las

necesidades del proyecto. Este es sencillo, de línea limpia y de fácil operación. Por las limitaciones de presupuesto, no se procedió a un diseño automatizado de corte. Sin embargo, este se le podrá adaptar en un futuro.

### Diseño, fabricación, y prueba de uniones

El análisis de los resultados muestra que no se presentaron diferencias estadísticas significativas según el tipo de sección. Los tipos de falla más comunes fueron por cortante, aplastamiento y deformación de la espiga.

En cuanto a la resistencia a flexión, tanto para los resultados de los ensayos con espiga apoyada como no apoyada, la especie melina presentó valores menores. No se presentaron diferencias

significativas entre las especies de teca y laurel. Esta situación se presentó también para las pruebas de cortante con espiga apoyada. Sin embargo, no se presentaron diferencias significativas a cortante entre las tres especies para espiga no apoyada.

La necesidad de que la espiga quede bien colocada (la espiga debe penetrar por completo) se hace manifiesta en los resultados. Se obtuvieron resistencias menores en las uniones donde la espiga no estaba totalmente apoyada. El cuadro 1 muestra una comparación porcentual de la resistencia obtenida de uniones con espigas no apoyadas a la resistencia obtenida para uniones con espigas apoyadas. La reducción de resistencia puede ser un 15 a un 21%. Se observa la importancia de garantizar un acople adecuado entre las partes.

Cuadro 1. Relación porcentual entre las resistencias obtenidas para uniones con espiga no apoyadas y uniones con espigas apoyadas

Especie	Ensayo	Relación resistencia de espiga no apoyada a espiga apoyada (%)
Laurel	Flexión	77
	Cortante	58
Teca	Flexión	75
	Cortante	83
Melina	Flexión	128
	Cortante	91
Todas	Flexión	85
	Cortante	79

La comparación con las especies estadounidenses “yellow poplar” (*Liriodendron tulipifera*) y “southern white pine” (*Pinus sp.*) (Eckelman *et al.*, e.p.), muestra que los resultados son similares a los obtenidos en estos ensayos

(cuadro 2). Lo anterior se puede esperar dado que las especies empleadas en ambos estudios poseen características físicas muy similares. Con miras a verificar si las expresiones matemáticas desarrolladas en otros estudios se pudiesen aplicar a estas

Cuadro 2. Resultados comparativos de ensayos de uniones realizados con tres especies nacionales y dos foráneas

Condición del ensayo	Especie	Tipo de sección	Resistencia a flexión (kg.-cm)	n	Dev. est.	Resistencia a cortante (kg)	n	Dev. est.
Espiga totalmente apoyada en la unión	Laurel	Sólida	10265	3	2080	2224	3	424
		Apartada	8435	4	1726		3	667
	Teca	Sólida	8081	3	939	2967	2	209
		Apartada	12721	3	1581		3	325
	Melina	Sólida	4106	3	2158	1262	3	102
		Apartada	3886	4	2195		3	331
	Yellow Southern Pine	Sólida	9934	6	2452	1662	6	220
		Apartada	--	-	-		--	-
	Yellow Poplar	Sólida	9726	3	970	1580	6	217
		Apartada	--	-	-		--	-
Espiga sobresale 5 cm de la unión	Laurel	Sólida	6620	3	382	1263	3	266
		Apartada	7227	3	705		3	343
	Teca	Sólida	9653	3	644	2055	4	1459
		Apartada	5957	3	127		3	255
	Melina	Sólida	4525	4	1127	773	2	495
		Apartada	5899	3	1615		3	329
	Yellow Southern Pine	Sólida	5556	6	1427	1036	6	215
		Apartada	--	-	-		--	-
	Yellow Poplar	Sólida	5445	3	-	--	-	-
		Apartada	--	-	-		--	-

especies, se llevó a cabo una estimación de los valores esperados. La resistencia a momento flexor de las uniones se puede estimar por medio de la ecuación:

$$f_4 = \frac{k\pi D^3 s_4}{12 \times 32}, \quad (1)$$

donde  $f_4$  se refiere a la resistencia a momento flexor, en pulg.-lb.;  $D$  se refiere al diámetro, pulgadas;  $s_4$  se refiere al módulo de ruptura del material, lb. por

pulgada cuadrada;  $k$  es un factor de forma para vigas redondas, 1,18; y 12 es una constante empleada para convertir pulg.-lb. a pie-lb. El empleo del factor de forma para vigas redondas de 1,18, ha sido cuestionado para la estimación de la resistencia a momento de espigas redondas como las de estos ensayos. Lo anterior, debido al aplastamiento (perpendicular al grano) que ocurre en la parte inferior de las espigas durante los ensayos. Debido

a esta incertidumbre, se recomienda usar un valor de  $k$  de 1 en los cálculos. El cuadro 3 muestra una comparación de los resultados obtenidos de los ensayos con los estimados por medio de esta ecuación.

La aplicación de fórmulas no parece adecuada, dado que para algunas especies sobreestiman la resistencia y en otras la subestiman.

**Cuadro 3.** Valor estimado, valor experimental, y su relación para resistencia a flexión

Especie	Valor estimado (kg-cm)	Valor experimental (kg-cm)	Relación
Laurel	6856	9219	0,7
Melina	8464	3980	2,1
Teca	12092	10401	1,2

### Fabricación y ensayo de marcos pequeños

Los resultados muestran una marcada diferencia en la resistencia y comportamiento de los marcos con forro o sin este. No se presentaron diferencias estadísticas significativas de resistencia entre especies y tipo de forro, pero sí se presentaron diferencias entre los marcos con forro o sin él. La resistencia de los marcos sin forro fue menor, presentándose mayores desplazamientos, que no fue posible continuar midiendo debido a las limitaciones del equipo de medición empleado. La figura 6 muestra algunas curvas de los ensayos realizados donde se observa el comportamiento dúctil de la mayoría de los marcos, que permite grandes deformaciones laterales antes de que se produjera alguna falla. Sin embargo, hasta donde fue posible conducir el ensayo, no se presentaron fallas que pudiesen comprometer la estabilidad estructural de los marcos. En el caso de los marcos con forro, el tipo de falla fue progresivo, mostrando

primero un levantamiento de las espigas más próximas al punto de aplicación de carga, seguido por levantamiento del forro, y perforación del panel por el tornillo (caso del fibrocemento), o por corte y también perforación del tornillo (caso del *plywood*).

La falla en los elementos inferiores y superiores del marco se evidenciaron al presentarse deformaciones laterales entre los 20 y 40 mm. No obstante, los marcos continuaron sosteniendo la carga máxima conforme se daban mayores deformaciones laterales.

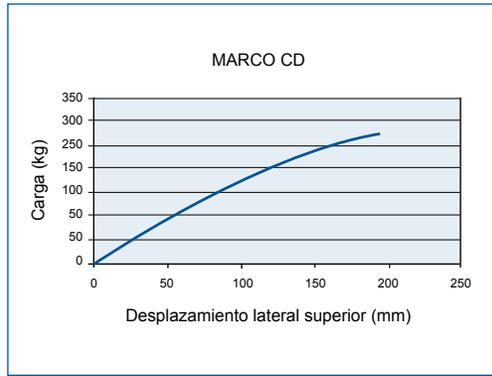
La rigidez a cortante aportada por los paneles es considerable; esta se ve aumentada en promedio hasta 10 veces.

Las figuras 9 y 10 muestran una modificación de las variables medidas, según la condición del marco. Se puede observar que aunque en términos de resistencia no se dan diferencias estadísticas significativas entre los paneles de fibrocemento y de *plywood*, la deformación a carga máxima de este último es menor y su recuperación relativa después de removida la carga es mayor. Esto es de esperarse dadas las características de la madera de poder soportar mayores cargas por periodos cortos de tiempo y a su capacidad de recuperarse mejor de deformaciones inflingidas.

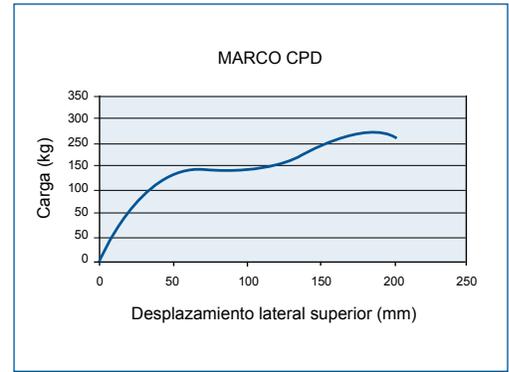
Al restringir la rigidez de los paneles a la deformación del marco, la carga actúa en parte sacando la espiga de la unión. No se registraron deformaciones laterales en la parte inferior del marco, por lo que la deformación se produjo por un desplazamiento lateral casi irrestricto de este, en el caso de los marcos sin paneles. En el causado de los marcos con paneles por una combinación de desplazamiento lateral y desplazamiento vertical. Esto se puede observar en la figura 11, donde la relación de desplazamiento vertical a desplazamiento lateral es mayor para los marcos cubiertos con paneles.



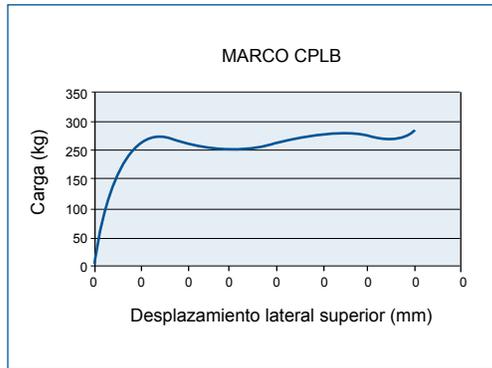
(a)



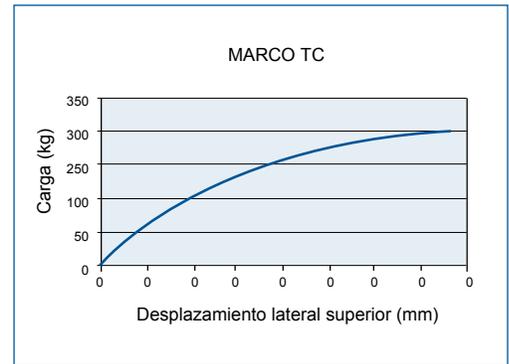
(b)



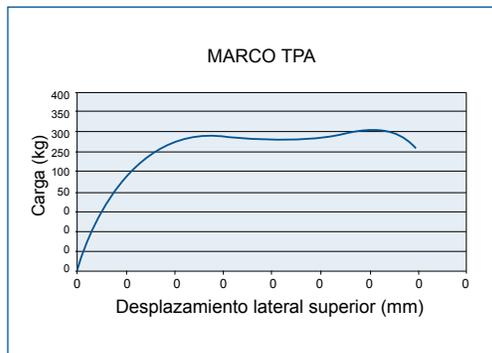
(c)



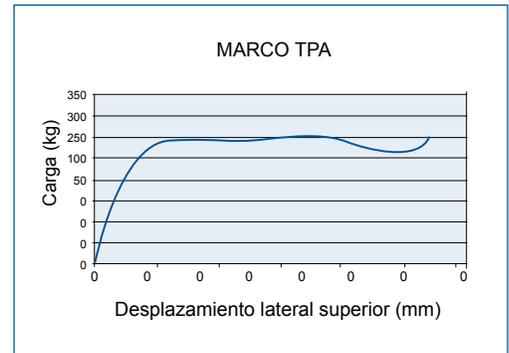
(d)



(e)



(f)



(g)

Figura 8. Muestra de un ensayo por realizar (a) y, algunas curvas de desplazamiento lateral superior vs. carga para los marcos de: b) ciprés sin tableros, c) ciprés con tablero de fibrocemento, d) ciprés con tablero de madera contra chapada, e) teca sin tableros, f) teca con tableros de fibrocemento, y g) teca con tableros de madera contra chapada

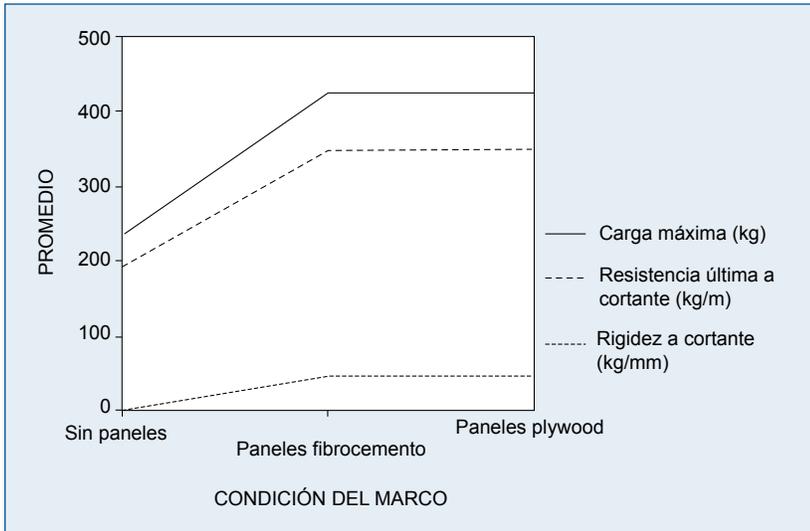


Figura 9. Variación de las variables carga máxima, rigidez a cortante y resistencia última a cortante, según la condición del marco

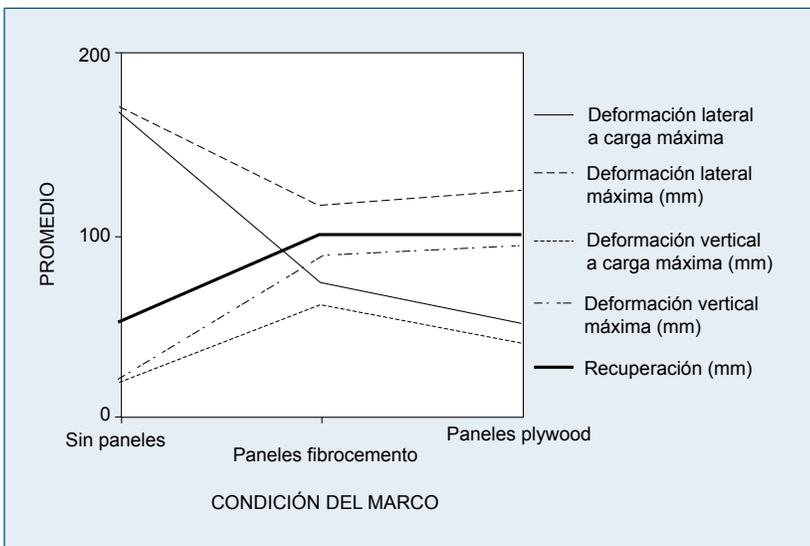


Figura 10. Variación de las deformaciones y recuperación, según la condición del marco

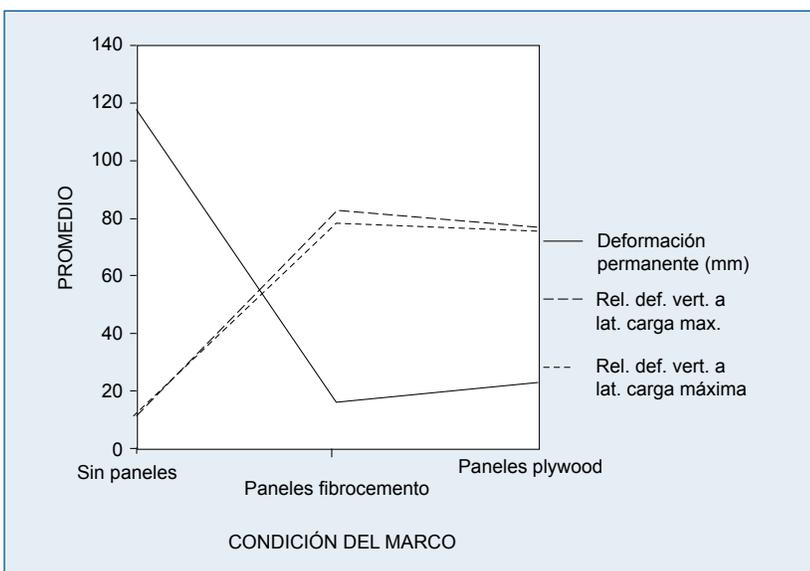


Figura 11. Deformación permanente y relaciones desplazamiento vertical a desplazamiento lateral (%), según la condición del marco

## Conclusiones y recomendaciones

### Conclusiones

Como resultado de esta investigación, se cuenta con una máquina adecuada para producir las espigas redondas por medio de brocas sierras. Se cuenta además con el sistema de afilado adaptado para la herramienta de corte. El desempeño y precisión de la máquina se consideran adecuados de acuerdo con las pruebas realizadas. En una segunda etapa es recomendable estudiar opciones para automatizar el proceso de corte de las espigas.

La resistencia de uniones con las especies nacionales es comparable a la de especies de Norteamérica utilizadas en los ensayos de la Universidad de Purdue. Se pudo comprobar que las ecuaciones recomendadas, ecuación (1), para tipos similares de uniones por otros estudios, no se ajustan adecuadamente al comportamiento de este tipo de unión. Por esta razón, los resultados obtenidos permitirán desarrollar una teoría de comportamiento de estas estructuras, en donde la especie de madera tenga poco efecto en los cálculos y diseño de las estructuras. Las especies nacionales, sin embargo, mostraron un comportamiento más dúctil que las de Norteamérica. El tipo de unión requiere ciertos ajustes a la hora de fabricación, de manera que se garantice en el lugar de la obra un ajuste apropiado, no demasiado suelto o demasiado ajustado.

Los marcos analizados muestran también un comportamiento bastante dúctil. El efecto de los paneles en la rigidez de estos es notable. Aunque no se produjo falla de los marcos a desplazamientos típicos de un sismo local, el empleo de los paneles sí ayuda a reducir los desplazamientos máximos que se puedan producir durante un sismo. El tipo de panel no tuvo efecto significativo en el comportamiento del marco. Sin embargo, debe procurarse el

uso de paneles no muy frágiles como los de fibrocemento por los daños no reparables que se producen en este tipo de material.

### Recomendaciones

Los resultados obtenidos en este estudio deberán emplearse en una segunda etapa, una vez concluidos otros estudios paralelos que se llevan a cabo en la Universidad de Purdue. Esto permitirá el establecimiento de criterios para el diseño y construcción de estructuras de este tipo en el país.

La estructura modelo fabricada y ensamblada permitió observar otras consideraciones por tomar en cuenta en una próxima etapa del proyecto; su ensamble fue relativamente fácil. Sin embargo, por no haber disponibilidad de piezas de menor sección en el mercado nacional, esta resultó ser relativamente pesada y sobrediseñada. Se espera solventar esto en una próxima etapa en la cual se emplearán secciones de menor tamaño acordes con los requerimientos de resistencia esperados con base en los diseños que se adopten.

### Reconocimientos

Este estudio se llevó a cabo paralelamente con la Universidad de Purdue, Indiana, EE.UU., donde se enfocan en otras especies y diseños. El proyecto dio inicio en agosto del 2002 y concluyó a finales de febrero del 2005. Durante el segundo semestre del año 2004, participó con la logística de preparación del material y con la asistencia en la realización de los ensayos de uniones la M.Sc. Beatriz González Rodrigo.

Los autores agradecen el apoyo de las siguientes entidades, empresas, y personas. A la Vicerrectoría de Investigación del Instituto Tecnológico de Costa Rica, por el financiamiento que hizo posible su realización. A las empresas BARCA S. A., ENVACO S. A. y al proyecto REDES II del CIIBI, por el suministro de una parte del material de ensayo. Al asistente de taller Adrián Gutiérrez Hernández por

*La resistencia de uniones con las especies nacionales es comparable a la de especies de Norteamérica utilizadas en los ensayos de la Universidad de Purdue. Se pudo comprobar que las ecuaciones recomendadas, ecuación (1), para tipos similares de uniones por otros estudios, no se ajustan adecuadamente al comportamiento de este tipo de unión. Por esta razón, los resultados obtenidos permitirán desarrollar una teoría de comportamiento de estas estructuras, en donde la especie de madera tenga poco efecto en los cálculos y diseño de las estructuras.*

la preparación de las probetas de ensayo y el material para la elaboración de la estructura modelo. A los técnicos de laboratorio Carlos Fabián Coto Calvo y Juan Carlos Coto, por su colaboración con la realización de los ensayos de uniones y marcos respectivamente.

## Bibliografía

- Akçay, H., Eckelman, C. and Haviarova, E. *Withdrawal, Shear, and Bending Moment Capacities of Round Mortise and Tenon Timber Framing Joints*. En proceso.
- ASTM. *Standard Method of Static Load Test for Shear Resistance of Framed Walls for Buildings*. E 564.
- Eckelman, C., Haviarova, E., and Erdil, Y. 2001. "Considerations in the Design and Development of School Furniture for Developing Regions Based on Local Resources". *Forest Products Journal* 51(6):56-63.
- Eckelman, Carl A., Erdil, Y. X., and Haviarova Eva. *The Withdrawal Strength of Pinned Round Mortise and Tenon Joints*. En proceso
- Haviarova, E., Eckelman, C. and Erdil, Y. 2001a. "Design and Testing of Environmentally Friendly Wood School Chairs for Developing Countries". *Forest Products Journal* 51(3):58-64.
- Haviarova, E., Eckelman, C. and Erdil, Y. 2001b. "Design and Testing of Wood Desk Frames Suitable for Production by Low Technology Methods from Waste Residues". *Forest Prod. J.* 51(5):79-88.
- Jensen, Ralph; Bjørndal, Bo. and Fuentes Meléndez, Federico . 1990. *Low-Income Housing Building Systems in Costa Rica*. CIVCO, ITCR, Cartago. 113 pp.
- Ramírez, Aldo; Eckelman, Carl; y Wolf, Ronald. 1998. "Inorganic-bonded composite wood panel systems for low-cost housing: A Central American perspective". *Forest Products Journal* 51(4):62-68.
- Ramírez C., A.; Serrano M., R. 2005. *Estructuras livianas de madera a partir de piezas menores de madera de plantación*. Informe Final de Proyecto. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Cartago. 68 pp.
- Reid, E.H. 1999. *Behavior of Wood Pegs in Traditional Timber Frame Connections*. M.Sc. Thesis, Mich. Tech. Univ., Houghton, Mich.
- Serrano, Rafael. 1999. *Longitudinal Growth Strain Effect on Lumber Warp from Small Yellow-Poplar Logs*. Ph.D. Thesis. 296 pp. Purdue Univ. W. Lafayette, Indiana.
- Sloane, Eric. 1967. *An Age of Barns*. Ballantine Books. New York.
- Stern, E. George. 2001. "Construction with Small-Diameter Round Wood". *Forest Products Journal* 51(4):71-82.
- Wolfe, Ron. 2000. "Research Challenges for Structural Use of Small-Diameter Round Timber". *Forest Products Journal* 50(2):21-29.
- Wolfe, Ron, and Moseley, Cassandra. 2000. "Small-Diameter Log Evaluation for Value-Added Structural Applications". *Forest Products Journal* 50(10):48-29.