

# Resistencia mecánica de pequeños arcos de madera laminada

Hernández Santiago, A.<sup>1</sup>, Dávalos Sotelo, R.<sup>2</sup> y Salomón Quintana, I.<sup>2</sup>

*Fecha de recepción: 26 de septiembre de 2008 – Fecha de aceptación: 8 de diciembre de 2008*

## RESUMEN

Se elaboraron y ensayaron especímenes de madera laminada-doblada de seis especies forestales de la madera con el fin de determinar sus características mecánicas para el ulterior desarrollo de prototipos de muebles. También se ensayaron especímenes de madera maciza de las mismas seis especies con el fin de poder comparar los resultados de los especímenes laminados. Las maderas para el estudio se consiguieron en el estado de Veracruz, en las regiones centro y norte del estado. Las especies seleccionadas son las siguientes: *Pinus patula Lamb* (pino) de la región de Huayacocotla, Ver. y del Cofre de Perote, *Quercus sp.* (encino), *Cedrela odorata Linn* (cedro rojo), *Swietenia macrophylla King* (caoba) *Piscidia Communis (Blake) L. M. Jchnst.* (chijol), y *Tabebuia rosae Bertol* (palo de rosa) de la región Totonaca. Se hicieron pruebas de flexión estática, de cortante paralelo a la fibra y de compresión perpendicular a la fibra. Únicamente se realizaron pruebas en condición seca. También se hicieron pruebas de flexión estática en arcos con madera laminada doblada. Los arcos fueron fabricados únicamente con madera de *Pinus patula* (Perote) y *Tabebuia rosae*. Los arcos que mayor carga soportaron fueron los de la especie *Tabebuia rosae*. Los arcos ensayados en posición horizontal tuvieron poca resistencia. La información generada en estas pruebas es de importancia para el diseño de las piezas que pueden estructurar mobiliario.

**Palabras clave:** Arcos, madera laminada doblada, *Pinus patula*, *Tabebuia rosae*, propiedades mecánicas

## Mechanical strength of small bended laminated-wood arches

## ABSTRACT

Bended laminated-wood specimens of six wood species were made and tested in order to determine their mechanical properties for the purpose of the eventual development of wood furniture. Solid wood specimens of the same woods were also tested in order to compare the properties of the laminated wood. The wood species were sampled from the central and northern regions of Veracruz State, Mexico. The wood species selected for this study were: *Pinus patula Lamb* (pino) from Huayacocotla, Ver. and the 'Cofre de Perote', *Quercus sp.* (oak), *Cedrela odorata Linn* (red cedar), *Swietenia macrophylla King* (mahogany), *Piscidia Communis (Blake) L. M. Jchnst.* ('chijol'), and *Tabebuia rosae Bertol* (rosewood) from the Totonaca region. Tests were made in static bending, shear parallel-to-grain and compression perpendicular-to-grain. Tests were made only in dry condition. Tests were also made in static bending of small arches made of bended laminated wood. The arches were made only with wood of *Pinus patula* (Perote) and *Tabebuia rosae*. The arches that supported the greater load were those of the *Tabebuia rosae* species. The arches tested horizontally had little strength. The information generated in these tests is of importance for the design of the pieces that can form the structure of furniture.

**Keywords:** Arches, bended laminated wood, *Pinus patula*, *Tabebuia rosae*, mechanical properties

<sup>1</sup> Facultad de Arquitectura, Universidad Veracruzana Campus Poza Rica

<sup>2</sup> Instituto de Ecología, A.C., Xalapa, Ver. Km 2.5 carretera antigua a Coatepec No. 351, Congregación "El Haya", Xalapa, Ver. E-mail: [raymundo.davalos@inecol.edu.mx](mailto:raymundo.davalos@inecol.edu.mx)

## **INTRODUCCIÓN**

El proceso de laminado-doblado de la madera tiene en la actualidad gran aceptación para la elaboración de mobiliario y productos como raquetas, barriles, bastones, embarcaciones y otros. El proceso consiste en unir varias láminas delgadas de madera con pegamento, colocarlas en un molde que tiene la forma de la pieza deseada, doblarlas y prensarlas hasta que la pieza quede constituida (Kelsey, 1985). Con el proceso de laminado-doblado se pueden lograr piezas curvas de madera de una especie dada con radios más pequeños que los que se alcanzan con cualquier otro método de doblado. Esto se debe al reducido grosor de cada lámina, que permite un fácil doblado sin que se generen grandes tensiones en las curvas de las piezas. La calidad de la materia prima puede no ser tan alta como la necesaria para doblar madera sólida y no es indispensable poseer herramienta y equipo especializado. Con la aplicación de los conceptos de diseño adecuados, los productos resultan con un número reducido de ensambles, ya que algunas uniones, que normalmente se requerirían cuando la fabricación de los productos se hace a base de piezas rectas, se pueden eliminar usando piezas curvas, obteniéndose así productos con calidad, estéticos y de buena resistencia. Los pasos a seguir para llevar a cabo el proceso son: selección y preparación del material, fabricación de moldes, pegado de las láminas, colocación en moldes y prensado, fraguado del pegamento y el maquinado final.

Un aspecto importante de estos componentes de madera laminada doblada es la resistencia que presentan a las cargas de diseño. No se conoce información acerca de las propiedades mecánicas de madera laminada de estas especies, por lo que se hace necesario efectuar una serie de pruebas para obtener esos valores que permitan más adelante, diseñar prototipos de muebles (sillas) que tengan la rigidez y resistencia necesaria. Para valorar el resultado del proceso de laminado, se harán pruebas con madera sólida de las mismas especies y así, poder comparar ambos valores para precisar si el laminado y pegado resultó efectivo. Los tipos de esfuerzo que un prototipo como estos puede experimentar son flexión, cortante y compresión perpendicular a la fibra, principalmente.

### **Objetivo**

Determinar las características mecánicas en flexión estática, cortante paralelo a la fibra y compresión perpendicular a la fibra en especímenes de madera maciza y laminada de seis especies para obtener información que sea útil para el ulterior desarrollo de prototipos de muebles.

## **METODOLOGÍA**

### **Material y métodos**

La generación de los especímenes para las pruebas requiere cumplir con una serie de aspectos indispensables, con el propósito de que las pruebas den los resultados buscados. Los trabajos preliminares para la generación de especímenes son: la selección y adquisición de la madera de las diferentes especies en función de las medidas comerciales y su localización en los mercados regionales, habilitado de las piezas de madera para la obtención de láminas, proceso de obtención de las láminas con medios mecánicos artesanales, registro de los contenidos de humedad de las láminas de las diferentes especies al momento de obtenerlas, preparación del equipo mecánico, herramienta y maquinaria para la obtención de las láminas, análisis del adhesivo utilizado para unir las láminas con sus diferentes técnicas: a boca de sierra (unir las láminas como salen de la sierra después de su habilitado), lijadas, y cepilladas, proceso necesario para definir con que superficie se comportan mejor las láminas en las diferentes pruebas, y así realizar los especímenes definitivos. Otro aspecto importante que se realizó previo a la obtención de dichos especímenes fue el secado, aspecto de gran importancia para el éxito de las pruebas; con la intención de definir los radios mínimos alcanzados por cada una de las especies seleccionadas, se realizaron las pruebas necesarias, partiendo desde el espesor de las láminas, y sometiénolas hasta su deformación a diferentes radios, para lo cual se construyeron diversos moldes de madera, con el radio al cual se iban a someter (Hernández Santiago, 2004).

Una vez realizados los aspectos mencionados, se está en disposición para realizar las pruebas mecánicas en los diferentes especímenes de cada una de las especies. Lo anterior permitirá verificar que especie reúne las mejores características físicas, mecánicas y estéticas para el desarrollo de los prototipos de mobiliario, en este caso una silla multiusos.

### **Selección de la madera para las pruebas**

La obtención de la madera en sus diferentes especies se realizó directamente en la zona donde se produce, con las dimensiones y especificaciones del productor; en ningún momento se localizó madera seca, ya que este procedimiento lo realizan con medios naturales, otro aspecto que vale la pena destacar, es que la madera no era libre de defectos. Se eligió aquella que tuviera menos defectos, en ningún aserradero se localizaron las láminas de madera que se requerían, ni chapa de las diferentes especies para su utilización, motivando con esto la adquisición de madera en

forma de piezas prismáticas, para que a partir de allí se obtuvieran las láminas necesarias.

Las maderas para el estudio se consiguieron en el estado de Veracruz, en las regiones centro y norte del estado. Las especies seleccionadas son las siguientes:

Coníferas: *Pinus patula Lamb* (pino) de la región de Huayacocotla, Ver. y *Pinus patula Lamb*, (pino) de la región del Cofre de Perote y de las Vigas de Ramírez, Ver..

Latifoliadas: *Quercus sp.* (encino), *Cedrela odorata Linn* (cedro rojo), *Swietenia macrophylla King* (Caoba) *Piscidia Communis (Blake) L. M. Jchnst.* (Chijol), y *Tabebuia rosae Bertol* (palo de rosa) de la región Totonaca.

Las especies estudiadas se muestran en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Especies estudiadas.

Especie	Nombre común	Clave
<i>Swietenia macrophylla</i>	Caoba	CAO
<i>Cedrela odorata</i>	Cedro	CED
<i>Piscidia communis</i>	Chijol	CHI
<i>Quercus sp.</i>	Encino	ENC
<i>Pinus patula</i> (Perote)	Pino	PIC
<i>Pinus patula</i> (Huayacocotla)	Pino	PIH
<i>Tabebuia rosae</i>	Palo de rosa	PRO

Las piezas de madera que se adquirieron en el aserradero, fueron piezas en escuadría, en el caso del *Pinus patula* (pino) de Huayacocotla y del *Pinus patula* (pino) del Cofre de Perote, las piezas fueron tabloncillos de 2" x 10" x 8 pies. Para el caso del *Quercus sp.* (encino), *Cedrela odorata* (cedro), *Swietenia macrophylla* (caoba), *Piscidia communis* (chijol) y *Tabebuia Rosae* (palo de rosa), las piezas fueron tabloncillos en diferentes medidas desde 2" de espesor hasta 6", el ancho también fue variable desde 4" hasta 14", el largo variaba desde 4 pies hasta 10 pies.

**Proceso de obtención de láminas de las diferentes especies seleccionadas.**

Inicialmente se pensó en obtener láminas delgadas que permitieran flexionarse y cerrar la curva en los diferentes radios planeados, en los moldes contruidos previamente para ese fin, para lo cual se habilitaron láminas de 2 mm de espesor, encontrando resistencia al corte en las especies de *Piscidia communis* (chijol) y *Tabebuia rosae* (palo de rosa) y sobre todo en la especie *Quercus sp.* (encino), madera de densidad muy alta y que presenta muy alta resistencia al corte, comparada con el resto de las especies. Otro problema presentado en el caso de las

láminas de *Quercus sp.* (encino), fue la deformación que presentaban las láminas inmediatamente después de habilitadas, en un ambiente normal de la zona a 32°C de temperatura, y con una humedad del 70%, sin exponerlas al sol o al secado artificial; las deformaciones presentadas eran en el sentido transversal y longitudinal, quedando muchas láminas inservibles para los propósitos del estudio, de obtener láminas sin deformaciones, con el espesor uniforme, y con el mismo ancho de lámina. Para el caso de la *Piscidia communis* (chijol) aunque de menor densidad, que el *Quercus sp.* también presentaba resistencia al corte, sin embargo dada la composición interna, los cortes se realizaban sin deformaciones morfológicas ni dimensionales, el medio ambiente no influía sobre las láminas habilitadas.

De pruebas preliminares de aserrado se concluyó que las láminas se deberán producir con un espesor mayor a los 2 mm, con la intención de someterlas a diferentes técnicas en el momento de pegado, las cuales son: habilitado directamente de la sierra, cepillado de las láminas una vez producidas, con la intención de lograr una superficie tersa de ambos lados y el espesor planeado, lijado de las láminas en ambas caras y con un espesor planeado. Lo anterior para determinar cual técnica presenta mayores ventajas para el adhesivo y lograr un elemento monolítico, con las mismas o mejores características que la madera maciza.

Con las pruebas realizadas en los especímenes realizados de las diferentes especies, se lograron resultados muy positivos en los especímenes que fueron realizados con la técnica del cepillado, logrando mayor adherencia el adhesivo, en superficies más tersas. Los especímenes subsecuentes en su totalidad fueron realizados con esta misma técnica, en cada una de las especies seleccionadas para el proyecto, con láminas habilitadas a 3.5 mm, posterior al cepillado quedaron de 2.5 mm.

En algunos casos, en los prismas de madera laminada se detectó ausencia de adhesivo en pequeñas partes de la superficie de pegado. El material no era libre de defectos. Los prismas laminados fueron fabricados con diferentes técnicas.

Los prismas de madera laminada fueron fabricados utilizando pegamento blanco acetato de polivinilo comercial como adhesivo y chapas con grosor de 2 mm aprox. Los prismas de madera maciza presentaban desviación de fibra y nudos. El material no fue acondicionado antes ni después de su recepción. El contenido de humedad de los prismas era variable.

**Determinación de la resistencia mecánica de piezas de madera maciza y laminada**

Las pruebas de flexión estática, de cortante paralelo a la fibra y de compresión perpendicular a la fibra se efectuaron conforme a los lineamientos básicos establecidos en la norma *ASTM D-143 – Standard methods of testing small clear specimens of timber – secondary methods* (1999) en una máquina universal de pruebas. La medición y registro de la carga aplicada a la pieza y las deformaciones se realizaron utilizando una celda de carga y un transductor de desplazamientos, respectivamente. El registro de datos se hizo en archivo de computadora e impreso en papel. Al término de cada lote de ensayos se cortó una porción cada espécimen para determinar el contenido de humedad del material y la densidad relativa básica en el caso de madera maciza,

únicamente. Se utilizó la misma norma para los ensayos con madera maciza y madera laminada. Únicamente se realizaron pruebas en condición seca. Los especímenes ensayados en compresión perpendicular a la fibra fueron de 5 cm de longitud en lugar de los 15 cm establecidos en la norma, para poder obtener el módulo de elasticidad del material.

**RESULTADOS**

**Pruebas de flexión estática en madera maciza y laminada**

Algunos aspectos de las pruebas de flexión estática se ilustran en la fig. 1. Los resultados de las pruebas se presentan en las tablas 2 y 3. Todos los valores de las propiedades mecánicas se ajustaron a un contenido de humedad uniforme de 12%, de acuerdo con los procedimientos estándar de la ASTM D-2915 (1999).



Figura 1. Algunos aspectos de las pruebas de flexión estática

**Pruebas de cortante paralelo a la fibra en madera maciza y laminada.**

Algunos aspectos de las pruebas de cortante paralelo a la fibra se ilustran en la fig. 2. Los resultados de las pruebas se presentan en las tablas 4 y 5.

Tabla 2. Pruebas de flexión estática en madera laminada

Especie	MOR 12	MOE12
	MPa	MPa
<i>Swietenia macrophylla</i>	61.2	6346
<i>Cedrela odorata</i>	51.9	4667
<i>Piscidia communis</i>	80.8	7258
<i>Quercus sp.</i>	99.9	10439
<i>Pinus patula</i> (Perote)	80.9	8525
<i>Pinus patula</i> (Huayacotla)	50.5	7170
<i>Tabebuia rosae</i>	75.6	8973

Tabla 3. Pruebas de flexión estática en madera maciza

Especie	MOR12	MOE12	DR
	MPa	MPa	PA/VV
<i>Swietenia macrophylla</i>	66.7	10588	0.398
<i>Cedrela odorata</i>	64.8	9208	0.471
<i>Piscidia communis</i>	82.6	9506	0.664
<i>Quercus sp.</i>	129.7	23528	0.891
<i>Pinus patula</i> (Perote)	93.8	12949	0.575
<i>Pinus patula</i> (Huayacotla)	64.7	10354	0.408
<i>Tabebuia rosae</i>	82.7	13477	0.451

Tabla 4. Pruebas de cortante paralelo a la fibra en madera laminada

Especie	f <sub>máx</sub>
	MPa
<i>Swietenia macrophylla</i>	5.76
<i>Cedrela odorata</i>	6.73
<i>Piscidia communis</i>	7.53
<i>Quercus sp.</i>	8.95
<i>Pinus patula</i> (Perote)	---
<i>Pinus patula</i> (Huayacotla)	---
<i>Tabebuia rosae</i>	6.52



Figura 2. Algunos aspectos de la prueba de cortante paralelo a la fibra

Tabla 5. Pruebas de cortante paralelo a la fibra en madera maciza

Especie	$f_v$ máx	DR
	MPa	PA/VV
<i>Swietenia macrophylla</i>	7.18	0.378
<i>Cedrela odorata</i>	9.37	0.484
<i>Piscidia communis</i>	12.06	0.608
<i>Quercus sp.</i>	17.70	0.887
<i>Pinus patula</i> (Perote)	---	---
<i>Pinus patula</i> (Huayacocotla)	---	---
<i>Tabebuia rosae</i>	8.73	0.452

**Pruebas de compresión perpendicular a la fibra.**

Algunos aspectos de las pruebas de compresión perpendicular a la fibra se ilustran en la fig. 3. Los resultados de las pruebas se presentan en las tablas 6 y 7.



Figura 3. Algunos aspectos de la prueba de compresión perpendicular a la fibra

Tabla 6. Pruebas de compresión perpendicular a la fibra en madera laminada

Especie	$P_{1mm}$	MOE12
	N	MPa
<i>Swietenia macrophylla</i>	14533	530.8
<i>Cedrela odorata</i>	13896	484.6
<i>Piscidia communis</i>	35196	1148.8
<i>Quercus sp.</i>	48464	1533.3
<i>Pinus patula</i> (Perote)	17770	561.0
<i>Pinus patula</i> (Huayacocotla)	6129	171.9
<i>Tabebuia rosae</i>	14033	428.3

Tabla 7. Pruebas de compresión perpendicular a la fibra en madera maciza

Especie	$P_{1mm}$	MOE12	DR
	N	MPa	PA/VV
<i>Swietenia macrophylla</i>	11523	389.6	0.371
<i>Cedrela odorata</i>	20349	1023.4	0.496
<i>Piscidia communis</i>	26342	1061.1	0.604
<i>Quercus sp.</i>	39746	12359.8	0.889
<i>Pinus sp.</i> (Perote)	---	---	---
<i>Pinus sp.</i> (Huayacocotla)	---	---	---
<i>Tabebuia rosae</i>	15161	550.6	0.462

En el caso de flexión estática, las especies que presentaron valores importantes, tanto en el módulo de ruptura, como en el módulo de elasticidad, fueron: *Pinus patula* (Perote) y *Tabebuia rosae*. En las pruebas de corte paralelo a la fibra la especie de madera laminada que más resistió la carga aplicada fue el *Pinus patula* (Pino de Perote), le siguió *Quercus sp.* (Encino), *Piscidia communis*, *Cedrela odorata*, *Tabebuia rosae*, y *Swietenia macrophylla*. Las especies a considerar para las pruebas con arcos, siempre y cuando se revise, que la humedad sea constante en todas las láminas son el *Pinus patula* (pino de Perote), *Cedrela odorata*, y *Tabebuia rosae*.

De las pruebas con madera maciza y laminada en de compresión perpendicular a la fibra, las especies en madera laminada que mejores resultados obtuvieron en la capacidad de carga en 1mm de deformación fueron en orden descendente: *Quercus sp.*, *Piscidia communis*, *Pinus patula* (pino del Cofre), *Swietenia macrophylla*, *Tabebuia rosae*, *Cedrela odorata*, *Pinus patula* (pino de Huayacocotla). Los resultados del módulo de elasticidad, establecen que las especies con mejores resultados en orden descendente son: *Quercus sp.*, *Piscidia communis*, *Pinus patula* (pino del Cofre), *Cedrela odorata*, *Swietenia macrophylla*, *Tabebuia rosae*, y el *Pinus patula* (pino de Huayacocotla).

**DISCUSIÓN**

De los resultados descritos anteriormente es conveniente mencionar que en estas pruebas realizadas, los especímenes de las especies *Piscidia*

*communis* y *Quercus*, tuvieron dificultades desde el habilitado de las láminas; su secado, requiere un proceso distinto comparado con las otras especies, ya que el secado es lento y a bajas temperaturas. Otro aspecto donde se tuvo dificultades, es en el proceso de pegado, el pegamento utilizado no funcionó como con otras especies, seguramente por el contenido de humedad de las láminas que no era uniforme, aunado a lo anterior la superficie de las láminas no era absorbente, por lo que se requería mayor tiempo de fraguado del pegamento, así mismo el pegamento no es el ideal, ya que las superficies de las láminas a unir deben estar cepilladas, sin embargo el pegamento no penetra debido a la composición anatómica de la madera, cuyos vasos se encuentran muy cerrados.

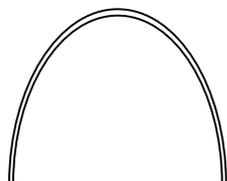
Estas dificultades técnicas en el procesamiento, derivadas de las características propias de las especies estudiadas, condujeron a que los valores de las propiedades mecánicas de la madera laminada fueran, en general, menores que los valores correspondientes de la madera maciza. La experiencia obtenida de estas pruebas condujeron a mejoras en el proceso que se pusieron en práctica en la manufactura de los arcos que fue la fase final de esta parte de los estudios.

De las pruebas realizadas a los especímenes de las diferentes especies, con el propósito de determinar

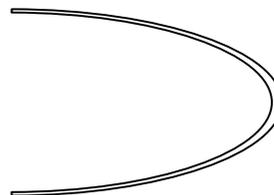
cuáles son las especies más idóneas para llevar a cabo las pruebas con los arcos y eventualmente, prototipos de mobiliario (Hernández Santiago, 2004), se puede concluir lo siguiente: por las características físicas que presenta, por la facilidad de su industrialización, por su apariencia, por los valores obtenidos en las pruebas, por la existencia forestal, y por la poca explotación que existe de la especie, y por su alto valor comercial, la especie más adecuada para llevar a cabo las pruebas con arcos es *Tabebuia rosae* (palo de rosa). Esta madera presenta una apariencia agradable, su habilitado no requiere mayor esfuerzo, presenta menos desperdicio y su composición fibrosa es uniforme; en el proceso de secado la madera resiste temperaturas hasta de 100°C. Por todos estos motivos se consideró para las pruebas finales en arcos, junto con el *Pinus patula* (de Perote) que también tiene características importantes de capacidad de carga y resistencia.

#### **Pruebas de flexión estática en arcos con madera laminada doblada**

El procedimiento de prueba utilizado no fue normalizado. Se diseñaron los apoyos para ensayar estos arcos en posición vertical y en posición horizontal. En la Figura 4 se muestran las dos posiciones en que se ensayaron los arcos.



a) Arco en posición vertical



b) Arco en posición horizontal

**Figura 4.** Posición en que fueron ensayados los arcos de madera laminada.

Los especímenes que fueron ensayados en posición vertical se fijaron en sus extremos mediante placas que simulaban un empotre. Sin embargo, durante las pruebas se observó que estos apoyos no ofrecieron una restricción completa a la rotación ya que permitían un pequeño giro. Los arcos probados en posición horizontal fueron fijados en sus extremos mediante apoyos que permitían el giro (articulaciones). La medición y registro de la carga aplicada a los arcos, así como las deformaciones, se realizaron utilizando una celda de carga y un transductor de desplazamientos. El registro de datos se hizo en archivo de computadora e impreso en papel. Al término de cada lote de ensayos se cortó una porción de cada espécimen para determinar el

contenido de humedad del material.

Los especímenes contruidos para estas pruebas fueron arcos cuyo radio es de 15 cm, con un ángulo de 30 °, el claro del arco fue variado entre 37 cm y 41 cm, la altura de 47 cm, el ancho nominal del arco laminado es de 4 cm y el espesor nominal de 2 cm. Las dimensiones fueron determinadas en base a la altura disponible en la maquina universal de pruebas. Se utilizaron para la fabricación de los arcos, dos especies: *Tabebuia rosae* y *Pinus patula* (pino del Cofre). El número de arcos utilizados fueron 12, 6 de la especie *Tabebuia rosae* y 6 de la especie *Pinus patula* (pino del Cofre). El perfil de un arco típico se presenta en la figura 5.

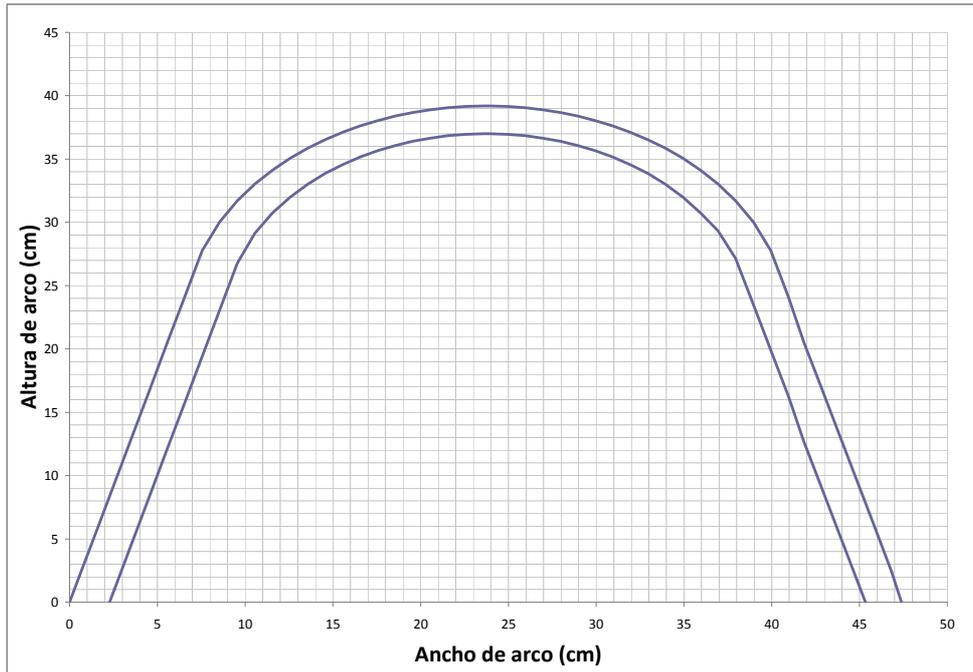


Figura 5. Perfil típico de los arcos ensayados

El proceso de obtención de las láminas de ambas especies fue similar al proceso de obtención de las muestras de las pruebas anteriores, sin embargo con base en las experiencias anteriores, se cuidó el contenido de humedad de las láminas, aunque no fue igual en todas las láminas, el porcentaje fue en el rango de 8 al 14%. Otro aspecto que se cuidó, derivado de las experiencias pasadas, fue, el proceso de pegado. Ahora se realizó de manera cuidadosa, con mucha limpieza; para unir las láminas se tuvieron que cepillar de ambas caras, no dejando pasar un tiempo muy prolongado o para el día posterior, ya que las láminas se contaminaban con el medio ambiente existente; si existía contaminación el pegamento no cumplía su función adecuadamente. De ahí la necesidad de que previamente al pegado era necesario que las láminas estuvieran libres de polvo.

Otro aspecto que se consideró de mucha importancia fue el prensado que debe ser de manera uniforme

sobre el arco, para lo cual se realizaron moldes que permitieran el doblado correctamente y los puntos de mayor flexión fueran prensados adecuadamente; el sistema de contra moldes se realizó mediante bandas tensadas de plástico, controladas con un tensor, con el apoyo de prensas complementarias sobre los puntos de mayor tensión. Lo anterior se realizó con la intención de simular el comportamiento que tendrían las piezas de madera laminada curvada, cuando se sometieran a las cargas provocadas por los usuarios. Los especímenes curvos se sometieron a dos tipos de pruebas, por un lado las piezas laminadas curvadas en forma de arcos se probarían con el suministro de carga vertical, y se apoyaron sobre placas que impidieron la rotación de los extremos de los especímenes; las otras pruebas fueron en forma horizontal, cuyos extremos estuvieron restringidos en forma de articulaciones. En la figura 6 se ilustran algunas etapas del prensado de los arcos. En la figura 7 se muestran los moldes y el arco libre de presión.

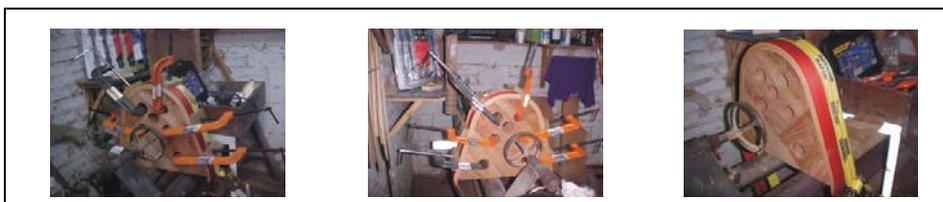


Figura 6. Algunas etapas en el prensado de los arcos laminados

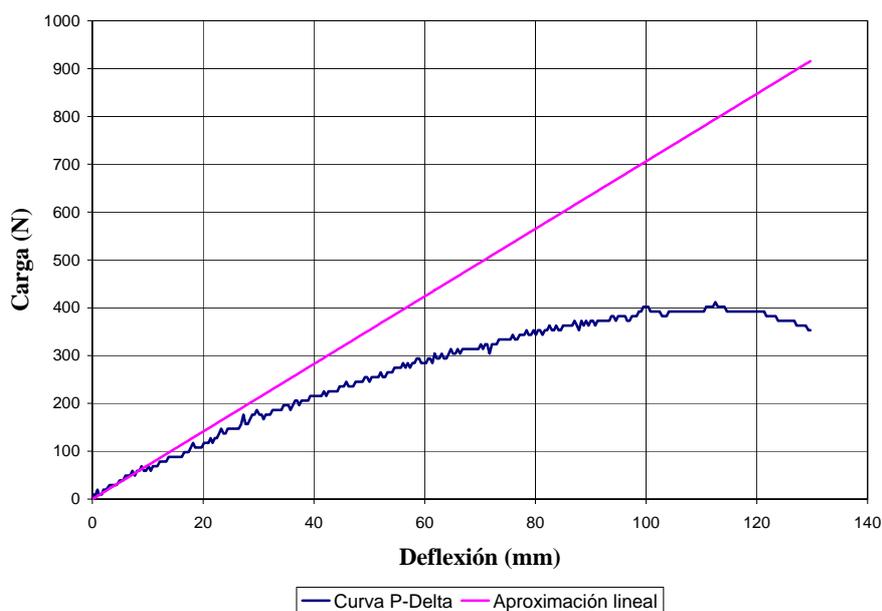


**Figura 7.** Moldes y arco laminado

Para el caso de los arcos no se hicieron cálculos analíticos, ya que se requería la obtención de una solución “cerrada” para el cálculo del momento actuante o bien el uso de un programa de análisis estructural. Solamente se determinó la carga que soportaba, en forma vertical y horizontal. Las curvas carga-deflexión obtenidas muestran un comportamiento no lineal casi desde el principio (figura 8), por lo que se deduce que el comportamiento de estos arcos puede ser descrito analíticamente con un método de análisis

geométricamente no lineal, lo que es motivo de otro estudio posterior.

En la figura 9 se ilustran algunas de las etapas en los ensayos de los arcos ensayados en posición vertical y en la Figura 10 se muestran algunas etapas de los arcos ensayados en posición horizontal. Los resultados de las pruebas realizadas a los especímenes en forma de arcos son enunciados en la tabla 8.



**Figura 8.** Curva carga-deflexión de arco ARHS-PIC-LA-03



Figura 9. Etapas durante la prueba de flexión con arcos en posición vertical

Tabla 8. Pruebas de flexión estática en arcos con madera laminada doblada

Probeta	Ancho láminas mm	Peralte mm	P <sub>máx</sub> N	Ancho arco cm	Alto cm
ARS-PIC-LA-01	40.22	19.27	4060	47.5	41.0
ARS-PIC-LA-02	40.33	23.45	4491	47.5	37.0
ARS-PIC-LA-03	40.12	23.26	4727	47.5	37.0
ARS-PRO-LA-01	41.06	21.96	5217	47.5	40.0
ARS-PRO-LA-02	41.11	20.88	4697	47.5	39.5
ARS-PRO-LA-03	41.36	21.91	5070	47.5	41.0
ARHS-PIC-LA-01	39.93	22.28	451	40.3	46.9
ARHS-PIC-LA-02	39.96	20.18	382	40.5	46.9
ARHS-PIC-LA-03	39.99	21.45	422	40.5	47.0
ARHS-PRO-LA-01	40.22	21.84	530	39.2	47.0
ARHS-PRO-LA-02	41.33	20.35	431	39.0	46.6
ARHS-PRO-LA-03	40.09	22.20	579	36.7	47.0

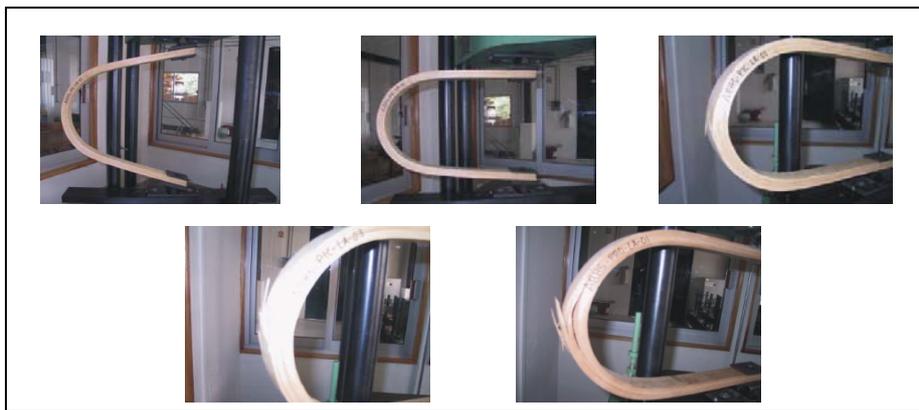


Figura 10. Secuencia del ensayo con arcos en la posición horizontal

### CONCLUSIONES

Los arcos que mayor carga soportaron fueron los de la especie *Tabebuia rosae*; en el sentido vertical la máxima carga soportada fue de 5217 N; para *Pinus patula* la máxima carga soportada fue de 4727 N. Los arcos ensayados en posición horizontal tuvieron poca resistencia. En el caso de la especie *Tabebuia rosea*,

la carga máxima fue de 579 N; para la especie *Pinus patula* la carga soportada fue de 451 N. El arco en posición vertical es el que más ventajas tiene, en cuanto a capacidad de carga. La información generada en estas pruebas es de vital importancia para el diseño de las piezas que pueden estructurar mobiliario como sillas multiusos.

**REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

ASTM D143 (1999). Standard methods of testing small clear specimens of timber - secondary methods. ASTM, Philadelphia, PA.

ASTM D2915 (1999). Standard practice for evaluating allowable properties for grades of structural lumber. ASTM D2915-90. Vol. 04-09 Phil., PA, EUA.

Hernández Santiago, A (2004). El diseño industrial y el aprovechamiento de los recursos maderables en la producción de mobiliario para la vivienda en el Estado de Veracruz. Tesis de Maestría en Diseño Industrial y Producción en la Unidad de Estudios de Posgrado de la Universidad Veracruzana

Kelsey, J. (1985). Fine Woodworking on Bending Wood. The Taunton Press, Newtown, CT. 122 p.

---

Este documento se debe citar como:

Hernández Santiago, A., Dávalos Sotelo, R. y Salomón Quintana, I. (2008). **Resistencia mecánica de pequeños arcos de madera laminada**. Ingeniería, Revista Académica de la FI-UADY, 12-3, pp. 43-52, ISSN: 1665-529X.