

# DETERMINACIÓN DE LOS ESFUERZOS DE DISEÑO DE VIGAS LAMINADAS ENCOLADAS DE TECA (*Tectona grandis*) Y ADHESIVO MDI

Determination of stress parameters of *glue-laminated beams of teak (Tectona Grandis)* and adhesive (MDI)

Wilver Contreras M.<sup>1,2</sup>, Styles Will Valero<sup>2</sup>, Edward Thomson<sup>3</sup>,  
Mary Elena Owen de C.<sup>2,4</sup>, Eric Barrios<sup>5</sup> y Rolando Betancourt<sup>2</sup>

Universidad de Los Andes, Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales, <sup>1</sup>Centro de Estudios Forestes y Ambientales de Postgrado, <sup>2</sup>Laboratorio Nacional de Productos Forestales, <sup>3</sup>Facultad de Ingeniería Postgrado de Cálculo Estructural, <sup>4</sup>Facultad de Arquitectura y Arte, Escuela de Diseño Industrial (EDI), Mérida, Venezuela.

Email: wilvercontrerasmiranda@yahoo.es; wilconmi@aaa.upv.es; styles@ula.ve; marowde@doctor.upv.es;

<sup>5</sup>Universidad Nacional Experimental de Guayana, Centro Biotecnológico de Guayana, Upata, Edo. Bolívar. Universidad Central de Venezuela, Doctorado de Arquitectura y Urbanismo. Caracas. ericbarrios@latinmail.com

## RESUMEN

La madera de teca (*Tectona grandis*), es una especie que no tiene más de 23 años de haber sido introducida en Venezuela, con notable éxito en la demanda del mercado nacional de la oferta de madera sólida. Por ello, y con el fin de ampliar la oferta de nuevos productos forestales estructurales de madera laminada encolada, a través del Laboratorio Nacional de Productos Forestales (Mérida, Venezuela), se realizaron los ensayos de flexión estática, según la Norma ASTM D-198-84, para la determinación de los esfuerzos de diseño de 9 vigas de madera laminada de teca encoladas con adhesivo metil di-isocianato (MDI). Las vigas fueron manufacturadas por Industrias Kondor, Puerto Ordaz, estado Bolívar. El grupo venía constituido por dos tipos de técnicas de manufactura, 6 fabricadas por láminas completas de madera, y las otras 3, constituidas por medio de la técnica del *finger joint*. Al comparar los resultados obtenidos del Módulo de Elasticidad (MOE) de las vigas ensayadas, con los valores del Grupo B de la clasificación de maderas estructurales venezolanas y de las vigas laminadas de pino radiata de Chile, se logró determinar que los valores estaban muy por debajo de lo recomendado. Por esta razón, si no se mejoran los procesos de fabricación en la segunda fase de consolidación de la industria fabricante, entre otros, el buen uso de la técnica de uniones dentadas (*finger joint*), la calidad del aserrado y la eliminación de defectos propios de la madera de teca, no se recomienda su uso para elementos estructurales de vigas y viguetas.

**Palabras clave:** vigas laminadas encoladas, teca, ensayos, esfuerzos de diseño, ensayos de flexión.

## ABSTRACT

Teak (*Tectona grandis*) is a species of wood that has had remarkable success after its introduction, less than 23 years ago, in the Venezuelan national market of solid wood. Due to its success and to the need to expand the supply of new structural forest products of glue-laminated timber (GLULAM) by the National Laboratory of Forest Products (Mérida, Venezuela), static flexion tests of 9 glue-laminated beams of teak glued with Methylene diphenyl diisocyanate adhesive (MDI) were carried out following ASTM D-198-84 standards. The beams were manufactured by Industrias Kondor, in Puerto Ordaz, Bolivar state. This test group was comprised of two manufacturing techniques: The first consisted of 6 whole beams of GLULAM timber that were made from whole beams of wood, while the second one was comprised by 3 beams that were made from sectioned wood that had been finger-joined and later made into GLULAM beams. By comparing the values obtained for the elasticity modulus (MOE) of all the studied beams with the values of the group B of the classification of Venezuelan structural timber and with those of glued-laminated timber from Chilean radiata pine, it was determined that the test values were below recommended. For this reason, if production processes are not improved in the second phase of consolidation of the manufacturing industry, such as, the good use of the finger joint technique, the sawn quality, and the elimination of teak intrinsic defects, among others, its use is not recommended for beam structural elements.

**Keywords:** laminated beams, teak, wood tests, stress parameters, flexion tests.

## INTRODUCCIÓN

Venezuela se encuentra en los últimos años, y aún en la actualidad, atravesando por una dinámica social y política bastante compleja. Esta realidad se proyecta con fortalezas o debilidades al aparato productivo nacional. La Industria Forestal Venezolana no escapa a ese contexto, denotándose una mayor dinámica en los últimos años, en el sector de la industria mecánica y de la industria de la pulpa y papel, que planta, aprovecha (cosecha) y transforma la madera de pino caribe (*Pinus caribaea* var. *hondurensis*) de la Orinoquia.

En el ámbito de la industria mecánica, la cual transforma las maderas provenientes de bosque natural, es decir las maderas latifoliadas, existen claras dificultades en el suministro de materia prima, especialmente para la zona centro occidental del país, producto de las grandes explotaciones forestales realizadas en los últimos tres decenios, ya sea por la ampliación de la frontera agrícola, incendios, obtención de madera para leña y la industria, y más recientemente, las invasiones. Esto ha hecho que muchos aserraderos hayan cerrado sus instalaciones, y los que quedan, apenas cubren su capacidad productiva con remanentes de madera provenientes de cortas ilegales, madera del norte de Colombia, de las haciendas, etc. Otros aserraderos, caso de la Empresa CONTACA S.A., ubicado en Ticoporo, estado Barinas, y que actualmente no se encuentra en funcionamiento, aprovechaba la madera proveniente de las plantaciones de teca (*Tectona grandis*) y melina (*Gmelina arborea*).

En la actualidad, existen pocas referencias que indiquen la totalidad de hectáreas plantadas de estas especies de madera de rápido crecimiento. Las plantaciones forestales más grandes de teca se encuentran en el estado Barinas, aunque también se ensayaron plantaciones reducidas en los estados Aragua, Monagas, Portuguesa, Trujillo y Táchira (Díaz, 1976). Duque (2001) expuso que para el año 1998, en la Unidad III de la Reserva Forestal de Ticoporo la superficie plantada de teca era de 3.444 ha., y las de melina alcanzaban las 1.773 ha. Mientras que Contreras *et al.* (2002), expusieron que existían aproximadamente unas 14.000 ha. de esas especies plantadas en el occidente de Venezuela.

Las plantaciones de teca del occidente del país presentan una gran variación morfológica, en cuanto a la calidad de fuste, inclinación del fuste, bifur-

cación, ángulo de ramas, conicidad, calidad de copa, aletones y estado fitosanitario; también se reporta que presentan una buena adaptación biológica a la zona, y a su vez se recomienda hacer estudios de procedencia de la especie para probar su comportamiento, donde se destaca la de Tailandia, por ser a nivel mundial una de las mejores maderas en su especie (Dulhoste, 2001; Ninin, 1997).

De ahí que se procure mejorar la calidad de la madera de cualquier especie, y en el caso de la teca, todo el esfuerzo realizado con el desarrollo de plantaciones forestales antes mencionado no debe quedar estático, sino que se debería aumentar en calidad y cantidad, ya que la realidad de oferta y demanda de la madera es totalmente contraria para la zona sur y oriental del país. Es en ésta, donde se tiene un recurso forestal estimado en más de 11 millones de hectáreas de bosque natural, ubicado mayoritariamente en el estado Bolívar, más de 500 mil hectáreas de plantaciones de pino caribe de la Orinoquia (Contreras, 2003). Lo importante es que la Industria Forestal se encuentra en una situación de altas exigencias de proveedor de materia prima de madera y de sus productos forestales derivados, para poder suplir las grandes necesidades de la Industria de la Construcción y la Industria del Mueble de Venezuela (CVG Proforca, 2007).

En la temática de fabricación de madera laminada encolada, la única empresa instalada en el país, al momento de la realización de estos ensayos, se encontraba localizada en la Zona Industrial de Matanzas en la Ciudad de Puerto Ordaz, estado Bolívar. Se debe reconocer que ha sido una proyección positiva que esta industria haya intentado fabricar madera laminada encolada a partir de madera de teca, donde el mercado nicho sería la comercialización de vigas, columnas y viguetas para edificaciones residenciales y comerciales. Actualmente la teca se comercializa en forma de rolas y productos forestales diversos, con fines constructivos de estructuras, cerramientos y muebles. Por ser una madera noble, de gran belleza y excelente trabajabilidad, una vez sometida a los procesos de aserrío, labrado mecanizado y acabados superficiales, presenta notables ventajas de resistencia y marketing respecto a otras maderas, como el caso del pino caribe. De ahí que se abra la posibilidad de aumentar sus usos como producto forestal de valor agregado, a partir de la fabricación de madera laminada encolada con calidad estructural, hecho que requiere la definición de

su resistencia mecánica, especialmente los esfuerzos de flexión estática a escala natural.

En ese sentido, para poder conocer cual es la calidad de resistencia mecánica de esas vigas laminadas encoladas, se desarrolla en el presente trabajo la determinación de los esfuerzos de diseño para las pruebas mecánicas de flexión de las vigas a escala natural, según lo referenciado en la Norma ASTM D-198-84.

Cabe señalar que la necesidad de madera y de productos forestales tradicionales y alternativos, caso de la madera laminada encolada con calidad estructural, crece continuamente en Venezuela y el mundo. Además la creciente destrucción y agotamiento de bosques nativos, así como de las restricciones a la explotación de los bosques, incrementa la necesidad de fomentar y desarrollar plantaciones forestales. En ese caso, la propuesta de aumentar las plantaciones de tecla, y otras especies de rápido crecimiento, son una alternativa a estudiar por la Administración central para el establecimiento de un plan nacional a mediano plazo en el occidente del país.

Expone Franco (2001), que las plantaciones forestales de rápido crecimiento, como la tecla de los llanos occidentales, Venezuela, por su ubicación geográfica al Norte de Sudamérica y su fácil acceso del eje Orinoco-Apure a los océanos Atlántico y Pacífico, tiene ventajas comparativas de gran significación para la comercialización de productos forestales, una vez cubierta la demanda nacional. Además, el clima tropical permite tasas de crecimiento superiores a las registradas en los climas templados. De ahí, que los ingresos por concepto de venta de madera y sus derivados en países como Suecia y Finlandia son superiores a los de Venezuela por concepto de ventas de petróleo. En estos países los turnos de corta son de 60 a 120 años, mientras que en Venezuela, se puede llegar a cosechar un árbol de tecla de las plantaciones del estado Barinas, según su uso, entre los 7 a 10 años, lo cual representa una ventaja competitiva.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Localización de la industria y características de la materia prima

Las vigas de madera laminadas encoladas fueron manufacturadas por la única industria de este ramo,

hasta el presente en Venezuela, la cual se encuentra localizada en la Zona Industrial de Matanzas de la Ciudad de Puerto Ordaz, estado Bolívar. Estas vigas fueron fabricadas paralelamente y haciendo uso del mismo proceso técnico que las vigas laminadas encoladas manufacturadas con pino caribe (*Pinus caribaea* var. *hondurensis*) de la Orinoquia, reportadas por Contreras *et al.* (2007).

La madera empleada para la fabricación de las vigas laminadas fue a partir de madera de tecla proveniente de Unidad III de las plantaciones establecidas de 15 años en la Reserva Forestal de Ticoporo del estado Barinas, y antiguamente administrada por la Empresa EMALLCA, que actualmente no se encuentra en funcionamiento. Después, los fustes fueron procesados en el Aserradero San Luís de la antigua Corporación Forestal Uverito, para ser transformados en láminas con dimensiones definidas en el Cuadro 1, y que finalmente conformarían las vigas laminadas encoladas. Se fabricaron seis (6) vigas conformadas por láminas enteras de 3,5 m cada una y tres (3) vigas fueron manufacturadas con láminas seccionadas y unidas por medio de *finger joint* (Cuadro 1). El adhesivo empleado fue metil diisocianato (MDI), identificado comercialmente bajo el nombre de Jowaton, y fabricado por la industria alemana Jowa.

Luego de la preparación y acondicionamiento de la materia prima, se procedió a la elaboración de los listones que conformarían las láminas de las vigas, bien sea en forma de lámina completa o con *finger joint*. Una vez preparados los listones y cumplidos los procesos de aserrado y labrado mecanizado, se encolaron aplicando el adhesivo MDI utilizando el método de brocha y rodillo manual. Posteriormente, sobre la prensa hidráulica, se dispusieron los listones uno sobre otro por su sección más ancha para el prensado en frío a una presión uniforme de 15 kg/cm<sup>2</sup> y un tiempo promedio de 2,5 horas, conformando con este proceso una viga recta de sección rectangular.

### Sitio de desarrollo de la investigación

La investigación se desarrolló en la Sección de Ensayos del Laboratorio de Propiedades Físicas y Mecánicas de la Madera del Laboratorio Nacional de Productos Forestales (LNPF-ULA-MPPA), adscrito a la Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales de la Universidad de Los Andes (ULA), Mérida,

Venezuela y al Ministerio del Poder Popular para el Ambiente (MPPA). Una vez recibidas la totalidad de vigas en el laboratorio, se dispuso de forma inmediata a su identificación y registro en planillas técnicas de las principales características de las vigas laminadas encoladas, las cuales se reportan detalladamente en el Cuadro 1. Dada la irregularidad de las dimensiones de las vigas, las mismas fueron sometidas a un proceso adicional de labrado mecanizado con la finalidad de darle mayor uniformidad dimensional a las vigas, y posteriormente ser ensayadas según las normas ASTM D-198-84. Luego se procedió a introducir las vigas laminadas al cuarto de acondicionamiento para llevar el contenido de humedad de las vigas a un 12%, el cual es requerido por dicha norma.

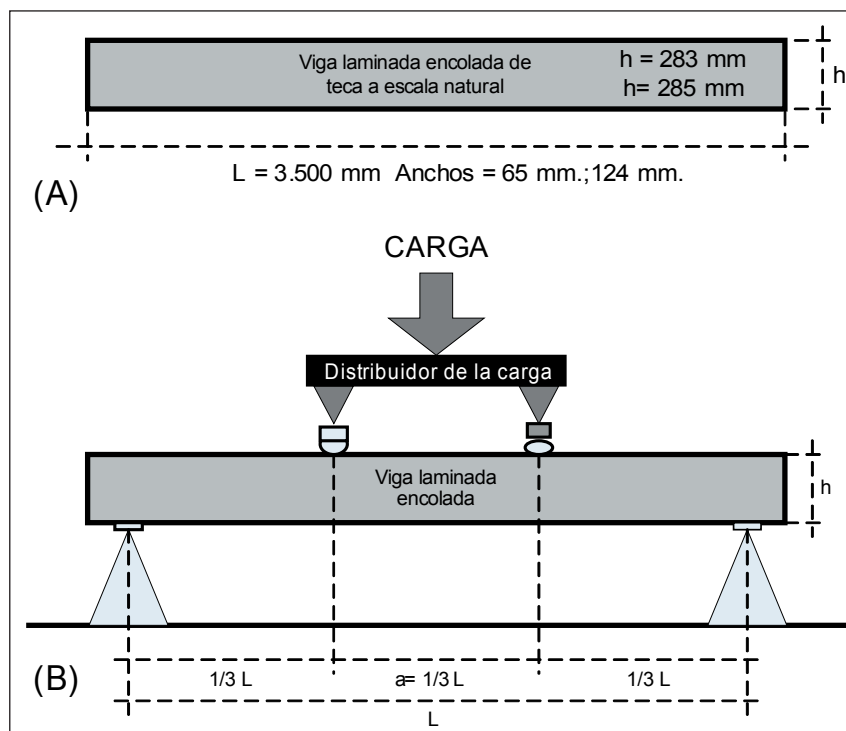
### Procedimientos técnicos para determinar los esfuerzos de diseño de las vigas laminadas encoladas a escala natural a partir de los ensayos de flexión, según la Norma ASTM D-198-84

El presente trabajo de investigación, resuelto de forma similar desde el punto de vista técnico a lo reportado por Contreras *et al.* (2007), consistió en ensayar a flexión las vigas laminadas encoladas según la norma (Figura 1), lo que permitió la determinación de los esfuerzos de diseño presentados en el Cuadro 2.

El procedimiento para el ensayo de la propiedad mecánica de flexión estática realizado a cada una de las vigas laminadas de teca encoladas con adhesivo de MDI, fue el someter, al momento del ensa-

**Cuadro 1.** Identificación de las principales características técnicas de las vigas laminadas encoladas de madera de teca encoladas con adhesivo de MDI, al momento de su llegada a las instalaciones del LNPF-ULA-MPPA.

Viga N°	Características de las vigas								
	Especie	Medidas promedios de las vigas al momento de llegar al LNPF-ULA-MPPA			Tipo de laminación de la Viga	Número de láminas de madera en la sección transversal	Espesor promedio de las láminas (mm)	Ancho final de cada viga (mm)	Altura final (mm)
		Ancho (mm)	Altura (mm)	Longitud (mm)					
1	Teca	65	285	3.500	<i>Finger joint</i>	7,0	40	65	283
4	Teca	97	283	3.500	<i>Finger joint</i>	7,0	40	65	283
5	Teca	99	285	3.500	<i>Finger joint</i>	7,0	40	65	283
2	Teca	65	283	3.500	Elemento Completo	7,0	40	65	283
3	Teca	65	285	3.500	Elemento Completo	7,0	40	65	283
6	Teca	98	284	3.500	Elemento Completo	7,0	40	65	283
7	Teca	127	287	3.500	Elemento Completo	7,0	40	124	285
8	Teca	127	285	3.500	Elemento Completo	7,0	40	124	285
9	Teca	124	285	3.500	Elemento Completo	7,0	40	124	285



**Figura 1.** (A) Esquema dimensional de las vigas. (B) Esquema de la distribución de cargas sobre las vigas laminadas de teca encoladas con de adhesivo MDI, según la Norma ASTM D-198-84.

**Cuadro 2.** Determinación de los esfuerzos de diseño a partir de la Norma ASTM D-198-84, de las vigas laminadas de pino caribe encoladas con adhesivo de MDI.

Viga N°	Especie de madera	Luz entre apoyos (mm)	Longitud Eje de Carga - Punto de Apoyo (mm)	Carga Máxima (kg)	Carga al Esfuerzo al Límite Proporcional (kg)	Deformación (cm)	Esfuerzo al Límite Proporcional ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )	Módulo de Ruptura ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )	Módulo de Elasticidad ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )
1	Teca-FJ	2.500	845	5000,00	6000,00	2,27	288,09	384,12	58979,98
4	Teca-FJ	2.500	845	12500,00	9000,00	2,68	293,68	407,89	51286,60
5	Teca-FJ	2.500	845	13750,00	9000,00	2,86	283,72	433,47	46103,50

2	Teca -EC	2.500	845	7300,00	6000,00	2,51	292,17	355,48	54479,37
3	Teca -EC	2.500	845	7400,00	5400,00	2,20	259,28	355,31	54770,96
6	Teca -EC	2.500	845	11000,00	6000,00	2,04	192,43	352,78	43991,34

7	Teca - EC	2.500	845	13250,00	9000,00	2,25	218,10	321,09	44734,00
8	Teca - EC	2.500	845	18500,00	12000,00	3,42	294,89	454,63	40072,28
9	Teca - EC	2.500	845	17750,00	13500,00	3,38	339,78	431,65	46718,48

FJ = Lámina de madera formada con finger joint.  
EC = Lámina de madera completa.

yo en flexión, a cargas simétricas perpendiculares a la dirección del grano. La zona de la viga donde fue aplicada la carga generó un momento flector uniforme libre de corte (Figura 1). Cada una de las vigas, fueron ensayadas a una velocidad aproximada de 2,5 mm/min. Paralelamente se desarrollaron y registraron las observaciones coordinadas de las cargas y deflexiones, por parte de los técnicos del Laboratorio de Ensayos y los investigadores responsables del proyecto. Este procedimiento se realizó hasta que se produjo la ruptura o falla en la viga. Los equipos empleados para el desarrollo de este ensayo fueron los siguientes:

- *Máquina de ensayo*. RIEHLE – Prensa universal. Capacidad 60 toneladas.
- Aparatos de soporte (platos de apoyos o reacciones y soporte lateral).
- *Aparato de carga*. La carga se aplicó a través de bloques de madera sobre el ancho total de la sección de cada una de las vigas, siendo ésta de suficiente espesor para evitar la concentración de altos esfuerzos en los puntos de contacto entre la viga y el bloque de madera, asegurando un radio de curvatura, en la cara de contacto del bloque de madera con la viga, entre 2 a 4 veces la altura de la viga. La carga total fue aplicada por igual en dos puntos equidistantes de las reacciones. Los dos puntos de aplicación de la carga estaban a una distancia igual de 1/3 de la luz (Figura 1).
- *Aparato para medir la deflexión (deflectómetro) del eje axial de la viga*. Marca CSE con una precisión de 0,01 mm.
- *Descripción técnica de las vigas de prueba*.

Al momento de la llegada de las vigas al LNPF-ULA-MPPA, se procedió a registrar para cada una de las muestras su contenido de humedad y sus dimensiones, tomándose tres de cada una para luego obtener el promedio de las mismas, tal como lo exige la norma (Cuadro 1). Luego se procedió a describir, con el mayor detalle posible, cada una de las vigas anotando con la mayor precisión el tipo y orientación de las fibras de las piezas de madera en cada una de las vigas.

Para el ensayo a flexión, las vigas tenían una relación de  $a$  (ancho)/ $h$  (altura) que se ubica entre

5:1 y 12:1, es decir, la distancia entre la reacción y el punto de aplicación de la carga es relativamente larga, siendo según la norma, la relación más deseada. De igual modo se realizó un diagnóstico técnico a fin de identificar la procedencia del material, especie, historia, características de procesamiento mecánico y de los tratamientos de conservación que pueden llegar a afectar la resistencia de la madera o de las líneas de cola. Una vez ubicadas las vigas de madera laminada de teca en el Laboratorio de Ensayos del LNPF-ULA-MPPA, se procedió al registro de las principales imperfecciones o de cualquier modificación intencional efectuada sobre la composición física de las vigas (Figura 2), para lo que se desarrollaron planillas individuales indicando todas estas características.

Desde el punto de vista de procedimiento se siguieron cada una de las principales exigencias técnicas propuestas por la Norma ASTM D-198-84, en referencia a:

#### **Procedimiento:**

Una vez que las vigas alcanzaron el CH %  $12 \pm 2$  en el cuarto de acondicionamiento se procedió al desarrollo de los ensayos mecánicos. Se identificó el tamaño de cada sección, la luz, la distancia entre reacción y el punto de aplicación de la carga de cada una de las muestras (Cuadro 1). Las pruebas de flexión fueron desarrolladas a una velocidad constante para poder alcanzar la carga máxima aproximadamente a los 10 minutos; sin embargo, la carga máxima se alcanzó, según lo recomienda la norma, entre los 6 y 20 minutos. Posteriormente se anotaron cada uno de los datos de la carga y de la deflexión en la primera falla, en la carga máxima y en los puntos donde ocurrieron cambios repentinos.

De igual modo, por cada ensayo de flexión se describieron los principales detalles de las fallas según su tipo, manera y orden de ocurrencia y en la posición en la viga. Una vez obtenidos los resultados finales de cada uno de los valores de las cargas máximas, se procedió al cálculo de los esfuerzos de diseño para flexión según lo planteado en el apéndice X2 de la norma (Anexo X 2.1 Formulas de flexión). De este modo se pudo determinar los valores del Esfuerzo Límite Proporcional (ELP), Módulo de Ruptura (MOR), Módulo de Elasticidad (MOE) (Cuadro 2).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Determinación de los esfuerzos de diseño de las vigas laminadas de madera de teca y adhesivo MDI

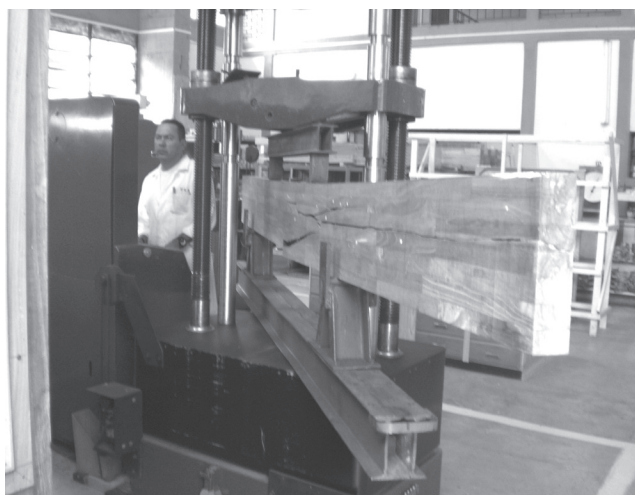
Previo al análisis de los resultados obtenidos de los esfuerzos de diseño expuestos en la Cuadro 2, es importante resaltar que se determina en Venezuela, la factibilidad de fabricación de elementos estructurales de teca, a partir de la tecnología de la madera laminada encolada. Hasta la presente fecha, este tipo de experiencia es única en el país. De ahí, que se deba resaltar que la presente investigación, es una inquietud técnica de la empresa fabricante, por tratar de ofrecer al mercado venezolano de la madera estructural, nuevos e innovadores productos forestales de valor agregado, a partir de la técnica de madera laminada encolada.

Con ello se pudiera establecer, a mediano plazo, una nueva forma de promocionar el aumento de las plantaciones forestales de teca en el occidente del país, además de incorporar al mercado nacional, el uso de esta madera como un producto forestal de valor agregado. De ahí que la fabricación de elementos laminados de teca, es una proyección técnica de la experiencia de la industria fabricante, a partir de la manufactura de vigas laminadas de pino caribe y adhesivo MDI.

Se puede apreciar en la Cuadro 1, que se fabricaron un total de 9 vigas. También se debe acotar que el Cuadro 2 permite analizar que las vigas N° 1, 4 y 5, fueron elaboradas a partir de la técnica de *finger joint*, mientras que el resto de vigas fueron realizadas en láminas de madera con la longitud completa del elemento estructural.

La mayoría de las vigas ensayadas presentaron notables diferencias entre sí, dado que su proceso de fabricación mostró limitaciones en la calidad técnica, y la misma se ve reflejada en las principales características morfológicas o análisis anatómicos macroscópicos de las vigas fabricadas. Estas diferencias se refieren a la totalidad de las vigas, respecto a sus dimensiones finales, los brotes de cola en los planos laterales, los defectos visuales de la estructura macroscópica de la madera, como grietas, ataques de pudrición y presencia de médula. Por todo ello, las vigas fueron nuevamente sometidas a proceso de re-aserrado a fin de poder lograr su uniformidad dimensional. En el Cuadro 1 se exponen, por igual, las dimensiones finales de cada viga.

Resalta desde el punto de vista anatómico en el análisis macroscópico de las vigas, la apreciación en el caso de la viga N° 1, defectos propios de la formación del fuste de la teca, como se denota el caso de la presencia de médula atacada por agentes xilófagos (Figura 3), y la colocación de uniones dentadas en plena zona de los esfuerzos de tracción de la viga al



**Figura 2.** Proceso de ensayo de flexión después de ocasionada la falla en una de las vigas laminadas, caso específico de la viga N° 5, manufacturada con la técnica de *finger joint*. Foto: Mary Owen de Contreras.



**Figura 3.** Vista de uno de los defectos naturales de la madera de teca, caso de médula atacada por agentes xilófagos, la cual fue encontrada en la viga N° 5 manufacturada con la técnica de *finger joint*. Foto: Wilver Contreras.

ser sometida a ensayos de flexión (Figura 4). Esto es uno de los errores técnicos más resaltantes del proceso de manufactura, el mal uso de la técnica de *finger joint*, el cual permite, previa inspección, eliminar los pedazos de madera con defectos, reforzar las uniones dentadas con adhesivos de mejor calidad, y aumentar las longitudes de los pedazos de madera a un mínimo de 0,90 centímetros, como lo recomiendan Freas y Selbo (1954), pudiendo aumentar así la resistencia de los elementos estructurales laminados.

De igual manera se visualizó al momento del ensayo, grietas internas por corte cerca de la zona de falla de la viga, por igual las conformadas tanto de láminas completas (N° 6 y 7), como de *finger joint* (N° 1). Se pudiera llegar a inferir que lo antes mencionado es una de las causas por las cuales estas vigas arrojaron los menores valores de resistencia en los esfuerzos de diseño de ELP y MOR, respecto al resto de vigas. Esto coincide con lo expuesto por Ninin (1993), debido a que en maderas venezolanas que tengan gran presencia de parénquima terminal y radial, son típicamente elementos de fallas para efectos de resistencia al corte, mostrando el mismo efecto si se trata de numerosas bandas finas, que si son escasas bandas gruesas.

Es importante señalar que el análisis técnico antes descrito de las características morfológicas de los elementos estructurales, se basó en el análisis visual de cada una de las nueve (9) vigas manufac-



**Figura 4.** Vista de la falla seca ocasionada a partir de una unión de *finger joint*, ubicada en la zona de tracción de la viga al momento del ensayo de flexión. Se puede apreciar de igual forma una grieta por corte de la madera. Foto: Wilver Contreras.

turadas. Se pudo percibir, en la primera etapa de consolidación de la industria de madera laminada venezolana estudiada, que los productos forestales de valor agregado de vigas laminadas encoladas de teca, pueden llegar a arrojar valores más altos en sus esfuerzos de diseño. Para ello se debe mejorar los siguientes aspectos técnicos: Proceso de selección y clasificación de la madera de teca; eliminación de nudos de gran tamaño; pudrición; eliminación de grietas y aristas faltantes; mejora de la calidad del proceso de aserrado y labrado mecanizado, especialmente en el buen uso de la técnica de *finger joint*, para la eliminación de los defectos naturales en las láminas de madera.

Logrando superar estos escollos técnicos, se tiene la certeza que en un futuro cercano, la industria de madera laminada podrá ofertar vigas laminadas de teca encoladas con adhesivo metil di-isocianato (MDI), para ser empleadas de manera confiable, segura y de distintas formas con fines estructurales, específicamente como vigas, columnas y viguetas. Además, éstas llevarían un valor agregado intrínseco del material, lo cual podría aumentar aún más su valor comercial, ya que tiene incorporada la gran belleza de las tonalidades y texturas propias de la madera de teca (Figura 5); así como lo expuso Valero (2001), la teca es una de las especies maderables más valiosas y de mejor calidad del mundo, ya que presenta propiedades que le permite una amplia gama de usos.

Por otro lado, todo el contexto anterior, permite llegar a comprender de una manera aproximada las posibles causas que repercutieron de manera negativa en la determinación de los valores expuestos en el Cuadro 2, de ahí que el análisis técnico reportó los siguientes aspectos:

- Se proyecta que los mejores resultados obtenidos en el esfuerzo de diseño ELP, es en las vigas fabricadas de láminas completas de madera de teca identificadas como N° 9 (339,78 kg/cm<sup>2</sup>) y la N° 8 (294,89 kg/cm<sup>2</sup>), las cuales presentaron a su vez los valores más altos de la deformación. A pesar de ello, es la viga N° 8 la que arrojó el menor valor de MOE (40072,28 kg/cm<sup>2</sup>).
- Del mismo modo, respecto a los valores más altos alcanzados en MOR es la viga N° 8 (454,63 kg/cm<sup>2</sup>) la que arrojó mejores resultados. La misma fue seguida por la viga manufacturada con *finger joint* N° 5 (433,47 kg/cm<sup>2</sup>), y en terce-



**Figura 5.** Vista de una sección transversal de una de las vigas laminadas encoladas de madera de teca, la cual deja apreciar su alto nivel estético. Foto: Mary Owen de Contreras.

ra posición, con una pequeña diferencia, el valor determinado en la viga N° 9 (431,65 kg/cm<sup>2</sup>).

- Los valores de MOE favorecieron los resultados de las vigas manufacturadas con finger joint. El valor más alto fue obtenido en la viga N° 1 (58979,98 kg/cm<sup>2</sup>). Le siguen las vigas del segundo grupo manufacturado con láminas completas N° 3 (54770,96 kg/cm<sup>2</sup>) y N° 2 (54479,37 kg/cm<sup>2</sup>).

Entonces, las valoraciones cuantitativas expuestas en el Cuadro 2, no permiten ser más rigurosos

técnicamente desde el punto de vista estadístico, en referencia a las posibles repercusiones que pudieron haber tenido los defectos anatómicos o de los niveles de calidad en el proceso de fabricación que presentan las vigas ensayadas, respecto a los valores de los esfuerzos de diseño expuestos en el Cuadro 2. Primero, porque existió un escaso número de replicas de vigas, lo cual no permitió desarrollar un análisis estadístico confiable. De ahí que este estudio presenta limitaciones respecto a los análisis estadísticos de los resultados obtenidos. Todo ello es el producto de las fuertes limitaciones técnicas y económicas de la industria, por encontrarse al momento del ensayo, en proceso de instalación. Esta es la razón por la cual no se pudieron fabricar mayor cantidad de vigas, lo cual conllevó a no desarrollar los estudios estadísticos antes comentados.

Segundo, todo ello puede influir en el hecho de que se denotan grandes diferencias e irregularidades en la calidad técnica de todas las vigas analizadas morfológicamente. Es decir, que los procesos de manufactura no han sido uniformes y con claras deficiencias en los controles de calidad de la fabricación de las vigas de madera laminada encolada con teca. Por ello, y como es lógico para el presente trabajo, y en razón de que las vigas N° 8 y 9 pertenecen a la categoría de mayores dimensiones (124mm X 285 mm X 3.500 mm), se puede llegar a enunciar, desde el punto de vista cuantitativo y del análisis morfológico, que son las vigas que mejores valores de resistencia arrojaron en ELP y MOR. La viga N° 7 de esta misma categoría, como ya se dijo anteriormente, presentó muchos defectos físicos, siendo esta la razón de dar menores valores en los esfuerzos de diseño respecto a las vigas antes mencionadas.

Retomando los análisis del Cuadro 2, resalta que los valores obtenidos en la categoría constructiva de las vigas manufacturadas con *finger joint*, especialmente las identificadas con el N° 4 y 5 han sido bastante buenos, ya que se aproximan a las vigas N° 8 y 9 de mayores secciones dimensionales y de mejores resultados de resistencia. Todo ello permite retomar lo expuesto por Freas y Selbo (1954), que con el uso de la técnica de madera laminada encolada, una viga pueden alcanzar valores de resistencia mayor de hasta 1,5 respecto a una viga de madera sólida. Eso en razón de la eliminación de los defectos más significativos de la madera en procura de la mejora de las propiedades mecánicas de un elemento estructural.

### Análisis comparativo del procedimiento de cálculo de los esfuerzos de diseño a partir de los ensayos de flexión estática, según la Norma ASTM D-198-84 y la Norma del JUNAC (1983), PADT-REFORT de vigas de madera a escala natural

Siguiendo las recomendaciones expuestas en la Norma ASTM D-198-84, se logró calcular los esfuerzos de diseño (ELP, MOR, MOE), a partir de los ensayos de flexión estática para las vigas laminadas (Cuadro 2). Se debe reconocer, tal como lo exponen Contreras *et al.* (2007), que en el contexto de los Países Andinos (Venezuela, Colombia, Ecuador, Bolivia y Perú), la Junta de Acuerdo de Cartagena (JUNAC), por medio de toda una serie de normas y manuales (PADT-REFORT), han sido excelentes guías desde el inicio de la década de los años ochenta, para el desarrollo, estandarización y promoción, en todo lo referente a la ciencia, tecnología y uso de la madera y los productos forestales.

De ahí que en el Cuadro 3, y dada la importancia antes planteada de la JUNAC, se exponga una comparación en los procedimientos de cálculo de los esfuerzos de diseño obtenidos a partir de la norma ASTM D-198-84 y la PADT-REFORT de la JUNAC (1983) de ensayos de vigas de madera a escala natural. La comparación denota que los valores determinados por la norma ASTM, es más rigurosa en el procedimiento de cálculo, razón por la cual los valores son más bajos, llegando a ser superados en casi un 50%. Similares resultados obtuvieron Contreras *et al.* (2007) al comparar los valores obtenidos en las vigas laminadas encoladas de madera de pino caribe y adhesivo MDI.

### Comparación de los esfuerzos de diseño, de las vigas estudiadas, con otros elementos estructurales de madera aserrada y vigas laminadas

A fin de validar la calidad estructural de las vigas manufacturadas, se procedió a comparar los valores obtenidos de los esfuerzos de diseño de las vigas laminadas encoladas de teca con otros trabajos similares. Esto permite inferir, en esta primera etapa, si las vigas laminadas encoladas pueden ser usadas de forma confiable en diferentes usos con fines estructurales.

Por ello, y considerando que la madera de teca a un contenido de humedad del 12% puede alcanzar los 0,69 gr/cm<sup>3</sup>, se comparan los resultados promedios obtenidos en la presente investigación y extraídos del Cuadro 2, con los valores correspondientes a los grupos de madera con calidad estructural, propuestos por Centeno (1983) citado por Cloquell *et al.* (2007) y expuestos en el Cuadro 4.

Al consultar el grupo estructural al cual corresponde la madera de teca, ésta se ubica en el Grupo B (0,56 gr/cm<sup>3</sup> < Densidad básica < 0,70 gr/cm<sup>3</sup>). En el Cuadro 4, también se comparan los esfuerzos de diseño de las vigas de madera laminada encolada de teca, respecto a las vigas laminadas encoladas de pino radiata de Chile.

De ahí que al relacionar los valores planteados respecto al MOE, como único valor referencial que permite comparar las vigas de teca evaluadas, las mismas están muy por debajo a lo que exige Centeno (1983), y de los valores de las vigas laminadas de pino radiata chileno. Y es que los valores determinados en el presente trabajo, son tan bajos, que las

**Cuadro 3.** Comparación de los resultados de la determinación de esfuerzos de diseño para las vigas laminadas encoladas de pino caribe, entre la Norma ASTM D-198-84 y la JUNAC PADT- REFORT (1983)

Propiedad	Métodos comparados	
	Normas ASTM kg/cm <sup>2</sup>	JUNAC kg/cm <sup>2</sup>
Esfuerzo al Límite Proporcional (ELP)	288,09	568,22
Módulo de Ruptura (MOR)	384,12	757,63
Módulo de Elasticidad (MOE)	58979,99	116796,44

**Cuadro 4.** Comparación de los resultados promedios de los esfuerzos de diseño de las vigas laminadas encoladas de madera de teca, manufacturadas con *finger joint*, respecto a las vigas laminadas encoladas de pino caribe (*Pinus caribaea* var. *hondurensis*) reportado por Contreras *et al.* (2007), el pino radiata (*Pinus radiata*) de Chile expuestos por la Cámara Chilena de la Construcción (2007).

Especie	Tipo de unión de las láminas en las vigas	Valores Promedios		
		Esfuerzo al Límite Proporcional-ELP (Kg/cm <sup>2</sup> )	Modulo de Ruptura-MOR (Kg/cm <sup>2</sup> )	Módulo de Elasticidad-MOE (Kg/cm <sup>2</sup> )
Viga laminada encolada de madera de teca del presente estudio	Finger joint (*)	288,09	384,12	58.979,99
Valores de esfuerzos de diseño según Centeno (1983) para el Grupo estructural de madera B	Madera sólida	X	X	120.000,00
Madera laminada de madera de pino radiata chileno	Finget joint	X	X	Grado A (112.200,00) Grado B (91.800,00)
(*) Valores reportados para las vigas de finger joint de ancho 6500 mm. X = Valores no reportados en el ensayo				

vigas ensayadas entran en la categoría del Grupo D, cuyos rangos de densidad están entre los 0,32 gr/cm<sup>3</sup> < Densidad básica < 0,39 gr/cm<sup>3</sup>, con un MOE de 80.000 kg/cm<sup>2</sup>.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se determinó que los valores de esfuerzos de diseño obtenidos a partir de los ensayos de flexión y el uso de las fórmulas propuestas por la Norma ASTM D-198-84, para las vigas laminadas encoladas de madera de teca (*Tectona grandis*) proveniente de las plantaciones forestales establecidas en el estado Barinas, Venezuela, no cumplieron con lo exigido para el Grupo B según la clasificación de maderas venezolanas con calidad estructural. De igual forma, los valores reportados están muy por debajo a los reportados para las vigas laminadas de pino radiata chileno. Todo ello se debió a la mala calidad de las vigas manufacturadas. De ahí que se recomiende para la segunda fase de consolidación, mejora y desarrollo de los procesos de manufactura y diseño de productos forestales con calidad estructural de

la industria de madera laminada evaluada, considerar la mejora continua de cada uno de los puntos reportados en el presente trabajo, para la comercialización exitosa y segura en el tiempo de este tipo de producto en el ámbito nacional e internacional.

Por todo ello, se recomienda que la industria venezolana que manufactura estas vigas laminadas de madera de teca, no pueden llegar a comercializarlas, si continua haciendo uso de similares procesos de fabricación caracterizados por una baja de calidad. Y es que el tipo de vigas estudiadas, una vez puestas en uso y sometidas a mayores exigencias estructurales en cualquier edificación, pudieran poner en riesgo la estabilidad, rigidez y seguridad de la misma, especialmente al momento de una mayor solicitud en la resistencia estructural, caso de un sismo.

## AGRADECIMIENTOS

Al Laboratorio Nacional de Productos Forestales (LNPF-ULA-MPPA).

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CÁMARA CHILENA DE LA CONSTRUCCIÓN. 2007. Esfuerzos de diseño del pino radiata. En: <http://www.registrocdt.cl/> [Consultado: 10 de marzo 2007].
- CENTENO, J. 1983. *Normas para la clasificación de madera estructural*. Instituto Forestal Latinoamericano (IFLA). Mérida, Venezuela. p. 45.
- CLOQUELL, V., W. CONTRERAS y M. OWEN DE CONTRERAS. 2007. *La madera y los productos forestales en sistemas estructurales. Aspectos técnicos y medioambientales*. Editorial Fundación Politécnica Antiguos Alumnos. Universidad Politécnica de Valencia (UPV).
- CONTRERAS W., W. VALERO, E. THOMSON, M. OWEN DE C. y E. BARRIOS. 2007. Determinación de los esfuerzos de diseño de vigas laminadas de pino caribe (*Pinus caribaea* var. *hondurensis*), encoladas con adhesivo de isocianato (MDI). *Revista Maderas. Ciencia y Tecnología*. 9(3).
- CONTRERAS, W. 2003. *Tres prototipos de viviendas de bajo costo con madera y acero para el medio rural venezolano*. UFORGA- ULA. CEFAP-ULA. Universidad de Los Andes. Mérida, Venezuela. p.145.
- CONTRERAS W., M. OWEN DE C. y J. VARGAS. 2002. Empleo de maderas no comerciales de alta densidad de los llanos occidentales, Barinas, Venezuela, para el establecimiento de un programa masivo de estructuras para viviendas de clase media. *Revista Forestal Venezolana* 46 (2): 29-38.
- CVG PROFORCA. 2007. Inversiones. En: <http://www.cvgproforca.com> [Consultado: 13 de marzo 2007].
- DIAZ, J. 1976. *Monografía sobre la especie Tectona grandis*. Universidad de Los Andes, Facultad de Ciencias Forestales. Mérida, Venezuela.
- DUQUE, D. 2001. Informe sobre la Unidad III de la Reserva Forestal Ticoporo. *Revista Recursos* 64:9-10.
- DULHOSTE, R. 2001. Caracterización Morfológica y de crecimiento de la teca en el Occidente de Venezuela. *Revista Forestal Venezolana* 45(2): 25-34.
- FRANCO, G. 2001. El sector forestal es alternativo de desarrollo social y económico sostenible. *Revista Recursos* 66:18-20.
- FREAS A. D., and M. L. SELBO. 1954. *Fabrication and design of glued laminated wood*. Structural members. Forest Products Laboratory. Wisconsin. USA. p. 346.
- JUNAC. 1983. *Manual de diseño y normas para ensayos de madera*. Junta del Acuerdo de Cartagena (JUNAC). Lima, Perú. p.175.
- NININ, P. 1997. *Calidad de trozas y madera de teca de diferentes densidades arbóreas, provenientes de la Unidad Experimental de la Reserva Forestal de Ticoporo, Bum – Bum, Estado Barinas*. Universidad de Los Andes, Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales, Escuela de Ingeniería Forestal. Mérida, Venezuela.
- NININ, L. 1993. La Anatomía de la madera y la resolución de problemas tecnológicos. *Revista Forestal Venezolana* 37:107-116.
- NORMA ASTM D-198-84.
- VALERO, S. 2001. *Relación entre anatomía y propiedades físico-mecánicas de la especie Tectona grandis, proveniente de los Llanos Occidentales*. Universidad de Los Andes, Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales, Centro de Estudios Forestales y Ambientales de Postgrado, Maestría en Tecnología de Productos Forestales. Mérida, Venezuela.