

Resistencia a la flexión de vigas laminadas con tres especies de madera tropical mexicana

Omar Araujo Molina¹, Miguel Cerón Cardeña¹, Mario Chan Martín², Manuel Azueta García².

Recibido el 7 de enero de 2005 - Aceptado el 1 de abril de 2005

RESUMEN

La madera aserrada tiene un comportamiento estructural adecuado; sin embargo, hay factores que influyen negativamente en su uso; tales como, los defectos anatómicos, la escasez de piezas grandes y la extracción de volúmenes insuficientes. Para subsanar estas limitaciones, se puede considerar como alternativa la fabricación de *vigas laminadas*, las cuales se forman con láminas de madera pegadas con algún tipo de adhesivo. Además, en las vigas de madera laminada es posible reducir la influencia negativa de los defectos anatómicos distribuyéndolos en las zonas menos esforzadas del elemento. Otro aspecto a considerar es que las vigas de madera laminada siempre podrán fabricarse en dimensiones mayores que las de las vigas aserradas de madera maciza, y por último, con el uso de especies de crecimiento rápido, se puede garantizar una explotación forestal rentable. Las especies maderables estudiadas fueron: Pich (*Enterolobium cyclocarpum*), Chacah (*Bursera simaruba*) y Pucté (*Bucida buceras*). Las vigas laminadas ensayadas se formaron con cinco piezas de 1 x 5 x 76 cm, unidas con adhesivo de acetato de polivinilo, formando vigas de 5 x 5 x 76 cm, las cuales se probaron a flexión con carga al centro del claro y simplemente apoyadas en los extremos. Se ensayaron 15 vigas con láminas de Pich, 10 vigas con láminas de Pucté, 12 vigas con láminas de Chacah, 11 vigas con láminas de Pich y Chacah combinadas y 12 vigas con láminas de Pucté y Pich. Aún cuando los valores promedio del módulo de ruptura y del módulo de elasticidad fueron similares entre las vigas macizas y laminadas, las vigas laminadas tuvieron una desviación estándar más pequeña, lo que incrementó sus valores del 5° Percentil.

Palabras clave: vigas laminadas, madera tropical, módulo de ruptura, módulo de elasticidad, adhesivo.

ABSTRACT

Sawn lumber has an adequate structural behavior; nevertheless, there are factors that influence negatively on its applications; such as, anatomical defects, shortage of large pieces and the insufficient extraction of wooden volumes. To rectify these limitations, glued laminated beams have been considered as an interesting alternative. These beams are formed by thin boards joined by some type of adhesive. Furthermore, glued laminated timber beams reduce the negative influence of those anatomical defects, distributing them in zones less stressed. Another aspect to consider is the possibility that glued laminated timber beams can be manufactured in larger sizes than sawn beams, and finally, with the use of fast growth species, profitable forest exploitation can be guaranteed. The species studied were: Pich (*Enterolobium cyclocarpum*), Chacah (*Bursera simaruba*) and Pucte (*Bucida buceras*). The specimens were formed of five pieces of 1 x 5 x 76 cm, joined using polyvinyl acetate emulsion, forming beams of 5 x 5 x 76 cm. They were tested in static bending with loads at the center of the length. 15 Pich beams, 10 Pucte specimens and 12 Chacah specimens were tested. Also, the test series included, 11 beams manufactured with Pich and Chacah and 12 beams with Pucte and Pich. Although the average values of the modulus of rupture and the modulus of elasticity were similar in both laminated and sawn beams, laminated beams had a smaller standard deviation that increased their 5th Percentile values.

Keywords: glued laminated timber beams, hardwood, modulus of rupture, modulus of elasticity, adhesive.

¹ Profesor-Investigador del Cuerpo Académico de Estructuras y Materiales de la FIUADY

² Técnico Académico del Laboratorio de Materiales de la FIUADY

INTRODUCCIÓN

Los estudios científicos y tecnológicos de la madera se iniciaron a principios del siglo XX principalmente con especies de climas templados de Norteamérica y Europa. Posteriormente, estos estudios se extendieron a las maderas tropicales de alta resistencia y actualmente se van orientando a las maderas tropicales menos resistentes de crecimiento rápido. El objetivo de las investigaciones ha sido conocer las potencialidades de uso de las especies maderables tropicales en la industria de la construcción y establecer criterios de diseño así como de utilización, de acuerdo con las características de las especies.

La construcción de estructuras con elementos de madera maciza resulta cada vez más difícil debido fundamentalmente a las limitaciones en las dimensiones comerciales de la madera. La madera laminada encolada constituye una de las opciones más versátiles y su éxito se ha enfatizado en los últimos años, principalmente en Norteamérica y Europa.

El uso actual de la madera laminada en México está restringido a los tableros de madera contrachapada. Además, los elementos estructurales laminados que se han hecho para la construcción de algunas estructuras, fueron fabricados con madera conífera proveniente de los Estados Unidos. Lamentablemente, no se tiene experiencia en sistemas estructurales con vigas laminadas de maderas tropicales mexicanas y la investigación en este campo ha sido prácticamente nula en nuestro país.

En este trabajo se identifican las especies maderables tropicales que presentan la mejor interacción con los adhesivos, con las que se logra un comportamiento estructural satisfactorio.

Con el desarrollo de esta investigación se detectaron problemas inherentes a la laminación y los resultados que se presentan son los valores de resistencia y rigidez de las vigas laminadas de las especies estudiadas, en probetas del método primario, según la Norma ASTM-D143.

METODOLOGÍA

Existe en la Península de Yucatán una gran variedad de especies maderables de crecimiento rápido. La madera de estas especies es susceptible de ser usada en la industria de la construcción, si se acondiciona a las necesidades de la función estructural.

Las tres especies seleccionadas para fabricar las vigas laminadas fueron: Pich (*Enterolobium cyclocarpum*), Chacah (*Bursera simaruba*) y Pucté (*Bucida buceras*). Únicamente las dos primeras pueden considerarse de crecimiento rápido. Estas tres especies fueron consideradas por su abundancia, facilidad de corte y disponibilidad en los aserraderos de la región. Además, el Laboratorio de Materiales y Estructuras de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán cuenta con datos físicos y mecánicos, de estas especies maderables, obtenidos de proyectos anteriores.

El aserradero seleccionado obtuvo las trozas de madera de sus proveedores que por lo general son ejidatarios de la Península de Yucatán. Los troncos tuvieron diámetros promedios aproximadamente de 40 cm para el Chacah, 60 cm para el Pich y 80 cm para el Pucté. La madera fue almacenada en las bodegas del aserradero por aproximadamente unos dos meses para que posteriormente fuera aserrada, en las dimensiones que se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Cantidad y dimensiones nominales de las piezas de madera adquiridas en el aserradero.

Especie nombre común	Cantidad pieza	Grosor cm	Ancho cm	Longitud cm
Pich	20	6.35	6.35	91.44
Pich	30	6.35	7.62	91.44
Chacah	20	6.35	6.35	91.44
Chacah	25	6.35	7.62	91.44
Pucté	20	6.35	6.35	91.44
Pucté	25	6.35	7.62	91.44

La madera aserrada tenía un porcentaje de humedad, de más del 30%, por lo que se apiló al aire libre y bajo techo por un periodo de dos meses para reducir el Contenido de Humedad (CH) al 30%. Posteriormente se aceleró el secado, de manera controlada, en un horno eléctrico para lograr que las

piezas tuvieran un CH del 12%. Estabilizado el CH de la madera en estudio se procedió a maquilarla para dejarla a las dimensiones y geometría requeridas en el ensaye a flexión. Las dimensiones finales de las piezas se muestran en la tabla 2.

Tabla 2. Dimensiones de las piezas utilizadas para elaborar los especímenes.

Especie nombre común	Cantidad pieza	Grosor cm	Ancho cm	Longitud cm
Pich	19	5.00	5.00	76.00
Pich	133	1.00	5.00	76.00
Chacah	15	5.00	5.00	76.00
Chacah	93	1.00	5.00	76.00
Pucté	15	5.00	5.00	76.00
Pucté	74	1.00	5.00	76.00

De la cantidad original de madera, una pequeña parte se perdió en los procesos de secado, aserrado, canteado y cepillado. Para las piezas de 5 x 5 x 76 cm únicamente fueron seleccionadas aquellas que estaban libres de defectos visuales. Las probetas fueron ensayadas a flexión estática por el Método Primario de la Norma ASTM D – 143, la cual especifica que las probetas no deben contener defectos visuales.

Para la fabricación de las vigas laminadas, fueron unidas las tablillas de madera con adhesivo a base de acetato de polivinilo (Resistol 850 Blanco) que fragua a temperatura ambiente, formando vigas de 5 x 5 x 76 cm. Se utilizaron tablillas de la misma especie o

combinada con otra especie maderable utilizando el siguiente criterio, primero se clasificaron las tablillas de madera según la magnitud de sus defectos anatómicos y aquellas tablillas libres de defectos se situaron en la capa extrema de la viga sometida a esfuerzos máximos de tensión, las tablillas con magnitud intermedia de defectos se situaron en la capa extrema de la viga sometida a esfuerzos máximos de compresión y aquellas en las cuales los defectos eran mayores, con relación al lote de tablillas que correspondía a la muestra, fueron ubicadas cerca del eje neutro de la viga laminada. Ver Figura 1.

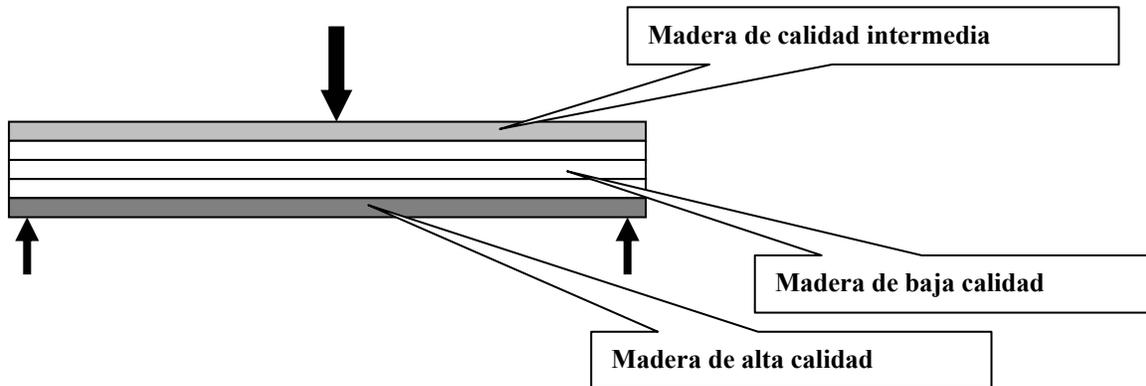


Figura 1. Disposición de la calidad de las tablillas de madera en la viga laminada.

En el caso de las vigas laminadas de especies combinadas, las tablillas exteriores correspondieron a especies más resistentes a flexión, Pich para la combinación Pich – Chacah y Pucté para la

combinación Pucté – Pich. Ver Figura 2. La cantidad de vigas de madera maciza y de vigas laminadas para cada caso se presentan en la tabla 3.

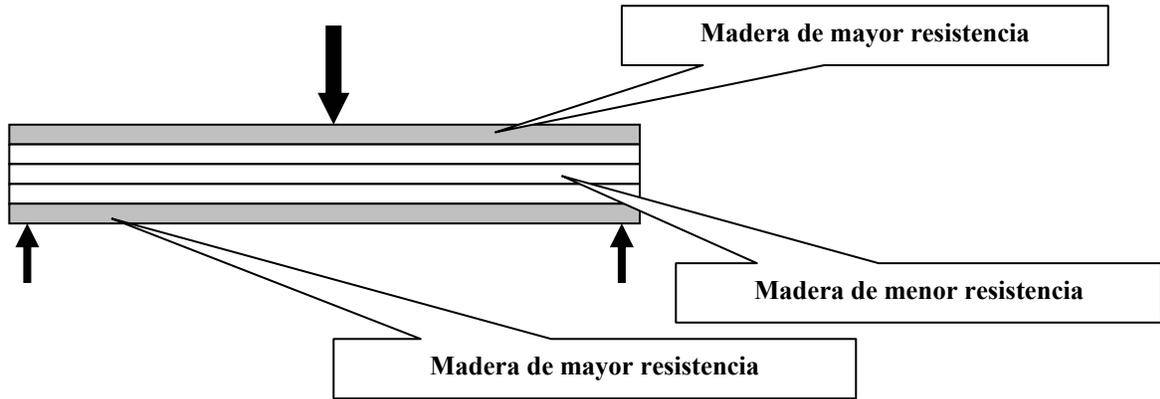


Figura 2. Disposición de las especies de mayor resistencia en la viga laminada.

Tabla 3. Cantidad y tipo de viga de las especies ensayadas a flexión.

Especies nombre común	Cantidad y tipo de viga	
	Maciza	Laminada
Pich	17	15
Chacah	15	12
Pucté	15	10
Pich-Chacah		11
Pucté-Pich		12
totales	47	60

Los ensayos de las vigas, en total 107, se hicieron a flexión con carga concentrada al centro y apoyos libres en los extremos con un claro de 71 cm. La velocidad de carga fue de 2.5 mm/min en promedio, con base en a las especificaciones de la Norma ASTM D-143. El contenido de humedad de las vigas fue de 11.6% en promedio.

RESULTADOS

Los ensayos a flexión estática se realizaron en una máquina universal en la cual los datos de carga y deflexión al centro de la viga, se obtenían automáticamente a razón de 10 lecturas por segundo

mediante transductores eléctricos, grabándose éstos en una base de datos de la computadora.

Con los datos obtenidos se hizo la gráfica Carga-Deformación, figura 3, y mediante un programa de cómputo semiautomático se obtuvo el límite de proporcionalidad para cada probeta ensayada. Con los valores de los límites de proporcionalidad, las medidas geométricas de las vigas y con las fórmulas correspondientes, se procedió a determinar la resistencia y rigidez. Los resultados obtenidos se presentan en la tabla 4.

Las gráficas de las distribuciones estadísticas para los módulos de elasticidad y módulos de ruptura se presentan de las figuras 4 a la 7.

Figura 3. Gráfica Carga – Deformación de vigas laminadas. Pich (PPL), Chacah (CCL), Pich Chacah (PCL), Pucté Pich (PUPL) y Pucté (PUPUL).

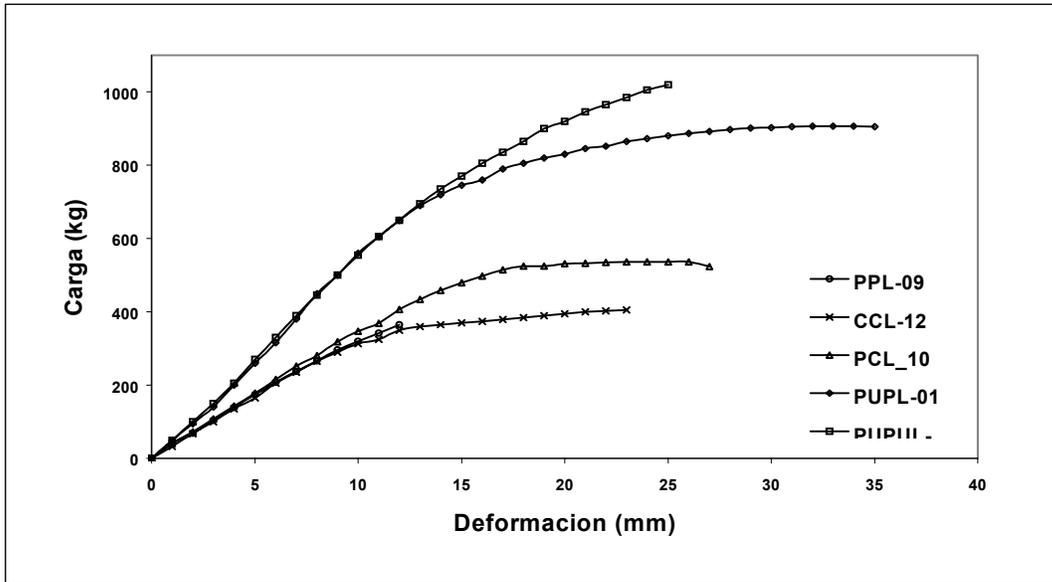


Tabla 4. Valores de MOR y MOE de las vigas ensayadas a flexión.

Nombre común y científico	Vigas							
	Macizas				Laminadas			
	MOR		MOE		MOR		MOE	
	Media	DS	Media	DS	Media	DS	Media	DS
Pich <i>Enterolobium cyclocarpum</i>	411	74	47089	11265	316	64	37288	3973
Chacah <i>Bursera simaruba</i>	318	48	44210	4844	350	48	42680	2721
Pucté <i>Bucida buceras</i>	957	221	104763	17114	1032	177	102877	16239
Pich-Chacah					433	43	53751	8458
Pucté-Pich					751	37	85641	6352

nota: Los valores están dados en kg/cm², DS es la Desviación estándar

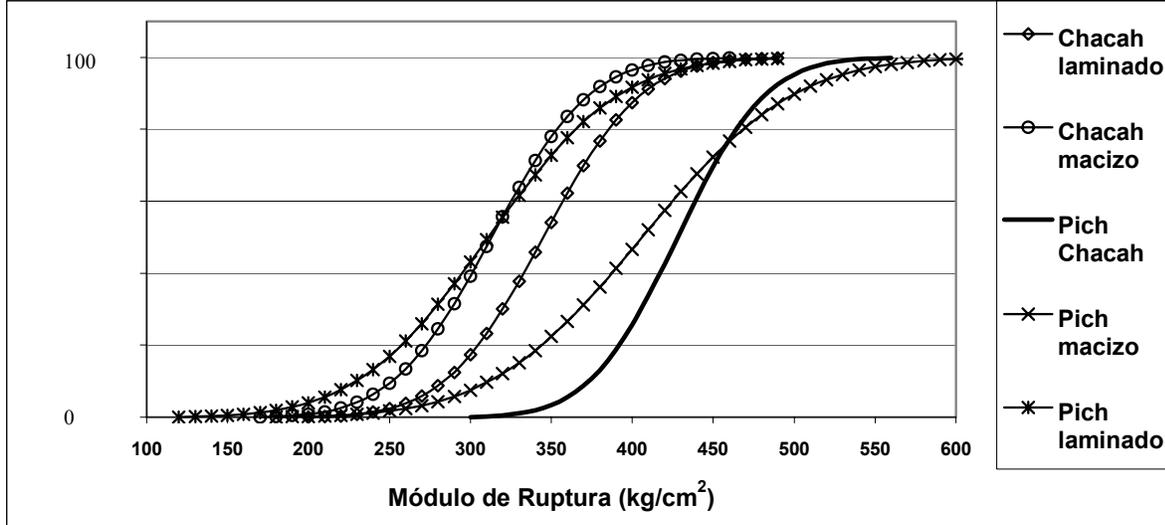


Figura 4. Polígono de frecuencias acumuladas de los valores del Módulo de Ruptura (MOR) para las especies de Pich y Chacah.

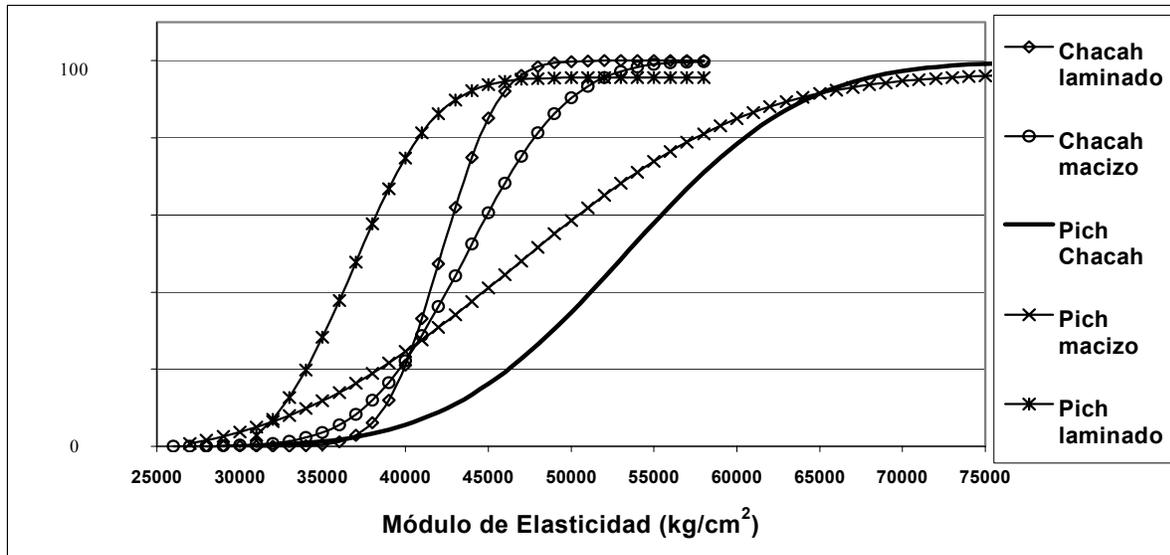


Figura 5. Polígono de frecuencias acumuladas de los valores del Módulo de Elasticidad (MOE) para las especies de Pich y Chacah.

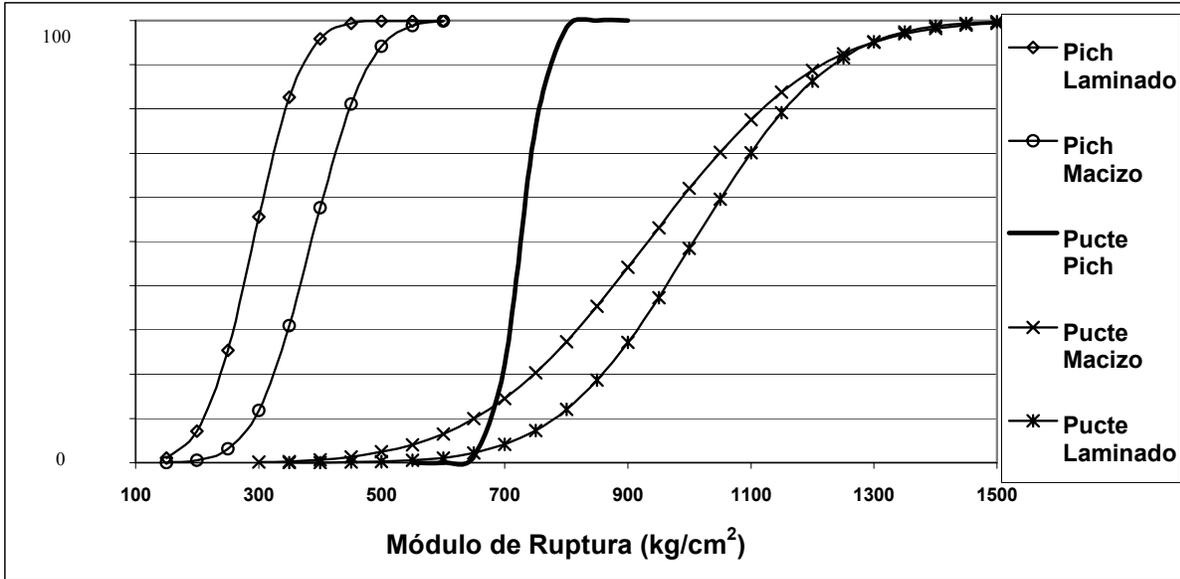


Figura 6. Polígono de frecuencias acumuladas de los valores del Módulo de Ruptura (MOR) para las especies de Pucté y Pich.

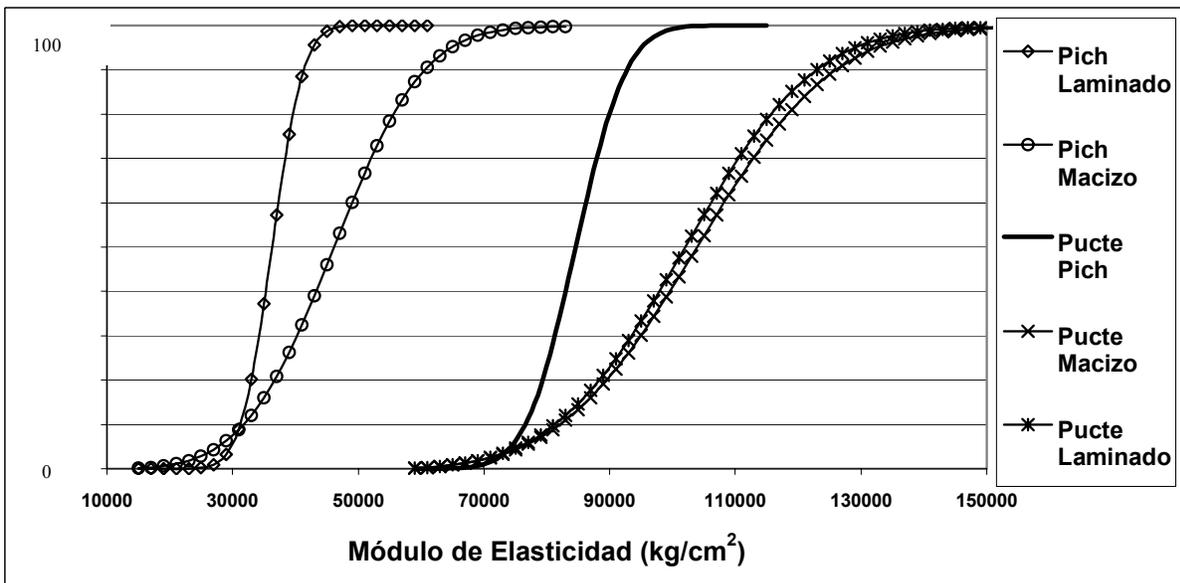


Figura 7. Polígono de frecuencias acumuladas de los valores del Módulo de Elasticidad (MOE) para las especies de Pucté y Pich.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Los valores promedio de resistencia y rigidez obtenidos en las vigas laminadas con tablillas de la misma especie son similares a los de las vigas macizas, pero la desviación estándar es menor en las

vigas laminadas de madera de crecimiento rápido por lo que el valor percentil lo compensa. Ver figuras 4, 5, 6 y 7. La relevancia del laminado radica en que las vigas laminadas provinieron de madera con defectos como nudos y desviación de fibra principalmente, a diferencia de las vigas macizas que fueron de madera libre de defectos por lo que se puede concluir una

mejora en la resistencia en el laminado y además una menor variabilidad.

Las fallas últimas en las vigas macizas se dieron en la zona de tensión y las fallas en las vigas laminadas ocurrieron en la zona de compresión por lo que son menos frágiles, es otra ventaja que se obtiene con los elementos estructurales laminados en madera.

Cuando se dan las combinaciones entre especies, la resistencia de la viga laminada mejora en el aspecto de los valores percentiles, por ejemplo en la combinación Pich (60% volumen de madera) y Pucté (40% volumen de madera) se tiene una resistencia percentil mayor que en las vigas laminadas solamente de Pich o Pucté.

Con respecto al comportamiento madera-adhesivo se observaron fallas de cortante longitudinal únicamente en tres vigas laminadas de Pucté; sin embargo, cuando la unión fue entre Pucté y Pich no hubo problema alguno, y lo mismo ocurrió con Chacah y Pich. Esto indica que las uniones pegadas con madera de crecimiento rápido son estructuralmente adecuadas.

RECONOCIMIENTOS

Este trabajo de investigación fue financiado por el PROGRAMA DE IMPULSO Y ORIENTACION A LA INVESTIGACION (**PRIORI**) con número de proyecto PRIORI-FING-02-005.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AITC (1987). Checking in Glued Laminated Timber. AITC 11. En “Timber Construction Manual”, American Institute of Timber Construction. Fourth Edition. Englewood, Colorado.
2. AITC (1994). Design of Glued Laminated Timber Beams. En “Timber Construction Manual”, 5 – 141 a 5 - 164. American Institute of Timber Construction. Fourth Edition. Englewood, Colorado.
3. AITC (1994). Structural Glued Laminated Timber Design Values. En “Timber Construction Manual”, 3 – 68 a 3 - 70. American Institute of Timber Construction. Fourth Edition. Englewood, Colorado.
4. ASTM Designation D 3737 – 85, (1986). “Standard Method for Establishing Stresses for Structural Glued Laminated Timber (GLULAM)”, American Society for Testing and Materials, 1986 Annual Book of ASTM Standards, Section 4 Construction, Volume 04.09 Wood.
5. Echenique – Manrique R. (1971). “Características de la Madera y su Uso en la Construcción”, Primera edición. Cámara Nacional de la Industria de la Construcción. México, D.F.
6. Hernández R., Dávalos J. F., Sonti S. S., Kim Y., Moody R. C. (1997). Strength and Stiffness of Reinforced Yellow – Poplar Glued Laminated Beams. Forest Products Laboratory, FPL–RP – 554. United States Department of Agriculture, Forest Service.
7. Jordahl R. A. (2000). Structural Glued Laminated Timber and the Forest Service. Minneapolis, MN. United States Department of Agriculture, Forest Service.
8. Martínez P. E. (1990). Laminado – Doblado de la Madera. “La Madera y su Uso”, Boletín Técnico del Laboratorio de Ciencia y Tecnología de la Madera, del Instituto de Ecología, A.C.
9. Robles F-V.; Echenique M. R. (1983). Usos Estructurales de la Madera Laminada Encolada. En “Estructuras de Madera”, 253 – 263. Editorial LIMUSA. México, D.F.
10. “Wood Handbook”, Forest Service Agriculture Handbook No.72, U, S, Department of Agriculture, Forest Products Laboratory, Washington, D.C., 1974.