

# Propiedades mecánicas de laminados estructurales con madera de encino

V. Rubén Ordóñez Candelaria <sup>1</sup>  
Arturo Quiroz Soto <sup>2</sup>  
Reyna Paula Zarate Morales <sup>1</sup>

## RESUMEN

Los encinos (*Quercus* sp.) de México son un recurso forestal que poco se explota. Con el fin de presentar alternativas viables para incrementar la utilización de la madera de encino, se experimentó con la fabricación de nueve laminados utilizando un proceso y equipo de carpintería que requiere de poca inversión. Para estimar la eficiencia del proceso de fabricación se determinaron las propiedades mecánicas en flexión de las vigas. Como información complementaria, se determinaron las propiedades mecánicas de las especies utilizadas para fabricar las vigas obtenidas mediante pruebas con pequeñas probetas libres de defectos. Para este trabajo se colectaron cuatro árboles del Cofre de Perote, tres de la especie *Quercus laurina* y uno de *Quercus crassifolia*.

## PALABRAS CLAVE:

Encinos, madera laminada, esfuerzos de diseño, flexión, ensayos a flexión, pequeñas probetas.

## ABSTRACT

Oakwood (*Quercus* sp) is a very important forest resource in México, but its use is very reduced. In order to provide options to increase the utilization of oakwood, this paper presents the procedures of fabrication of nine oakwood glue laminated beams, which were tested in bending and the mechanical properties obtained are presented. Two species were collected and sawn to make the glue-laminated beams, for both species their physical and mechanical properties were determined making tests on small clear specimens. Four trees were collected at the Cofre de Perote, three of *Quercus laurina* and one of *Quercus crassifolia*.

## KEY WORDS:

Oaks, glue-laminated beams, stress design values, bending, bending tests, small clear specimens.

1 Departamento de Productos Forestales y Conservación de Bosques. Instituto de Ecología, A.C. Apdo. Postal 63. Xalapa, Ver. 91000 México.

2 Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco. Av. San Pablo N/ 180, Col. Reynosa-Tamaulipas, Azcapotzalco. 02200 Mexico, D.F.

Manuscrito recibido para su publicación 29 de Septiembre de 1998.

## INTRODUCCION

En México, los encinos son un recurso forestal importante, las estadísticas oficiales presentan un volumen de esta madera en los bosques de  $347 \times 10^6 \text{ m}^3$ . Sin embargo oficialmente solo se extraen  $0.40 \times 10^6 \text{ m}^3$  de madera en rollo. El uso de la madera de encino en México es muy reducido, entre otras razones, porque la madera es muy difícil de aserrar y en el proceso de secado de la misma se producen una serie de defectos como rajaduras, torceduras, grietas, alabeos, etc. Consecuentemente la calidad de la madera y su precio son bajos en el mercado.

Por otro lado los estudios sobre la tecnología de la madera de encino en México se han enfocado principalmente a temas de secado, anatomía, aserrío y maquinado. Sin embargo el área de usos estructurales no ha sido analizada por los investigadores de la madera. En otros países como Estados Unidos esta especie llega a tener aplicaciones importantes en la construcción de estructuras, recubrimientos como duelas, parquet, y lambrines y se desarrollan continuamente trabajos de investigación para avanzar en el conocimiento y el mejoramiento en las aplicaciones de la madera de encino.

Manbeck *et al.* (1996) realizaron un estudio sobre el comportamiento en flexión estática de laminados de encino donde encontraron que es posible usar madera de baja calidad en la zona central de los laminados y madera de alta calidad en los cantos sin detrimento de los valores de diseño. Por el contrario, observaron valores de resistencia y rigidez de un 5% a un 8% más altos en los laminados de su experimento que los valores de diseño establecidos. En el mismo trabajo se hace una revisión del procedimiento utilizado para calcular el efecto del peralte en la resistencia de los laminados.

## OBJETIVOS

El objetivo principal de este trabajo consistió en determinar valores preliminares de diseño con base en pruebas estructurales realizadas con una muestra pequeña de vigas de madera laminada de encino. Otro de los objetivos fue ensayar el proceso de fabricación de las vigas y mediante los resultados de las pruebas de flexión determinar que tan eficiente resulta este proceso.

## METODOLOGIA

### **Colecta, aserrío y secado de la madera.**

La madera utilizada en este trabajo se colectó en los bosques del Cofre de Perote, en el Ejido Ingenio el Rosario se colectaron tres árboles de la especie *Quercus laurina* y uno de la especie *Quercus crassifolia*, efectuando la colecta conforme al procedimiento establecido en el Departamento de Productos Forestales y Conservación de Bosques, con la diferencia que los árboles se cortaron en trozas de 250 cm de largo en vez de 120 cm, por convenir así a la fabricación de los laminados.

Las trozas se aserraron en tablas de 30 mm de espesor y 75 mm de ancho. Cada tabla se marcó con el número de árbol y la troza de donde se obtuvo. Adicionalmente se cortaron tablonces de 65 mm de espesor para la elaboración de las pequeñas probetas.

La madera se mantuvo en pilas de secado bajo cubierta para evitar la exposición directa a los rayos solares y en un lugar con flujo de aire lento para reducir los problemas del secado. Estas pilas se prensaron con un sistema de varillas y piezas de madera con el fin de reducir las deformaciones. Cuando la madera alcanzó un contenido de humedad del 20% en el secado al aire, se metió a la estufa de secado solar hasta bajar su contenido de humedad al 15%.

**Tamaño de la muestra.** Las pruebas de resistencia en flexión de las vigas laminadas se apegaron a las normas ASTM D198-84. En estos métodos no se establece el tamaño de la muestra lo que obliga a establecerlo por argumentos estadísticos; en este caso como el estudio puede considerarse piloto se estableció un tamaño de muestra de 10 elementos laminados rectos de los cuales solamente se pudieron fabricar nueve piezas.

Las pruebas con pequeñas probetas se apegaron a la metodología establecida en el Departamento de Productos Forestales y Conservación de Bosques, la cual se basa en la norma ASTM D143-83. Se utilizaron, en este trabajo, los métodos secundarios.

**Fabricación de laminados y pruebas en flexión.** Para la fabricación de los laminados se utilizaron láminas de 25 mm de espesor, 75 mm de ancho y de 5400 mm de largo (utilizando la madera obtenida del aserrío de 30 x 75 x 2500mm). La longitud total de las láminas se logró uniendo por sus extremos varias piezas de 250 cm de largo, mediante uniones en diagonal ("scarf-joint") con una pendiente de 1:10 como se ve en la figura 1, utilizando para su elaboración una sierra radial y los aditamentos que se observan en la figura 2a. El proceso consiste en cortar los extremos de los tramos por unir en diagonal con la sierra radial y posteriormente perforarlos para colocar un perno de madera que evite el deslizamiento entre piezas cuando se realice el prensado de las uniones. Después de cortar y perforar los extremos por unir se les aplicó adhesivo y se prensaron varias uniones juntas, como se observa en la figura 2b dejando fraguar el adhesivo por 24 hr.

Una unión más eficiente consiste en hacer el corte en diagonal mediante un cepillo eléctrico, pero requiere de equipo especial. En el caso de usar el corte con sierra es recomendable tener el equipo bien afilado y ajustado para obtener cortes

limpios que permitan un contacto mayor en el área de unión.

El siguiente paso consistió en cepillar las láminas al grosor requerido, en este caso 25 mm; después se ordenaron las laminas según la configuración de las uniones que se muestra en la figura 3a. Se aplicó el adhesivo (urea-formaldehído) y se prensó dejando fraguar el adhesivo por 24 hr. Los laminados se cepillaron por sus caras para obtener la sección final quedando sus dimensiones en 5.4 x 24.5 x 540 cm. La madera de las dos especies colectadas se mezcló para la fabricación de los laminados, tal como ocurre en la práctica, en donde resulta difícil hacer una separación de especies para la fabricación de éstos elementos.

Los adhesivos estructurales más utilizados en la fabricación de laminados son los de urea-formaldehído y los de resorcinol-fenol-formaldehído. Los primeros no tienen una resistencia alta al intemperismo ni a la exposición prolongada con el agua, a diferencia de las resinas de resorcinol-fenol que son aptas para elementos utilizados a la intemperie o en contacto con el agua y altas temperaturas. Ambas resinas se utilizan en procesos de curado a temperatura ambiente, sin llegar a condiciones de temperaturas muy bajas (<10/C) bajo las cuales el fraguado de la resina es muy lento.

Las pruebas de flexión estática con las vigas laminadas se realizaron conforme a los lineamientos establecidos por la norma ASTM D198-84. Uno de los puntos importantes por cumplir de esta norma es que la relación  $a/h$  (Fig. 3b) debe tener un valor entre 5:1 y 12:1, que son los valores adecuados para evaluar las propiedades en flexión de los elementos en estudio. Se ensayaron las vigas con un claro de 510 cm aplicando las cargas a los tercios del claro. El promedio de contenido de humedad en las vigas fue del 11%. Los ensayos de las vigas se efectuaron en las instalaciones del

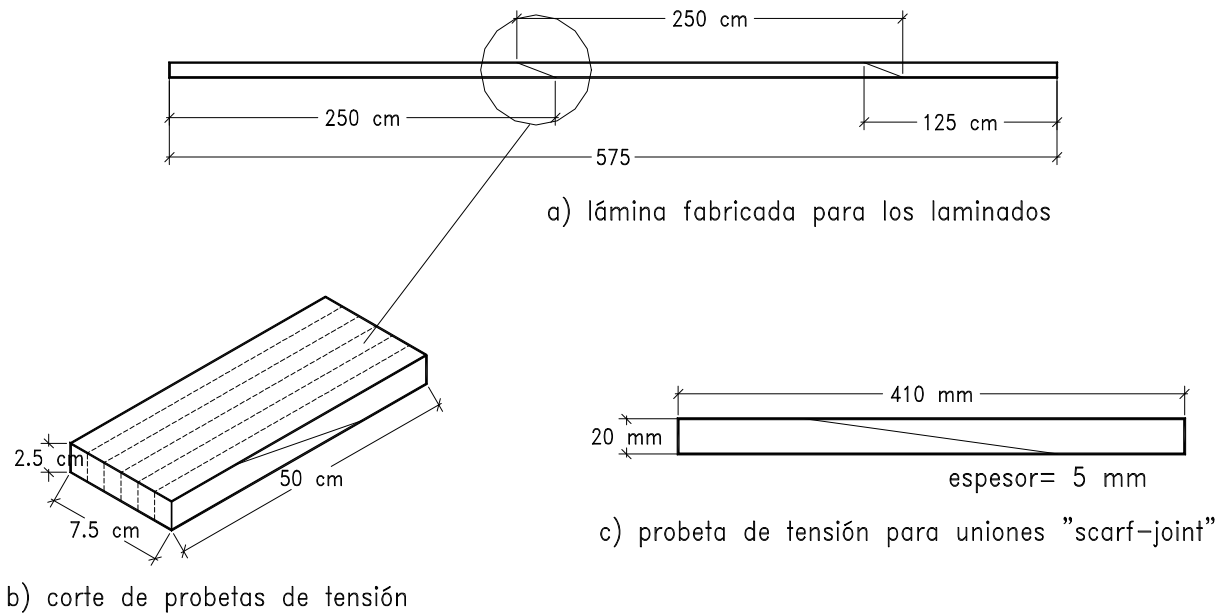


Figura 1. a) Configuración de una lamina para las vigas. b) Esquema de corte para obtener probetas de tensión de la union "scarf-joint". c) Dimensiones de la probeta de tensión

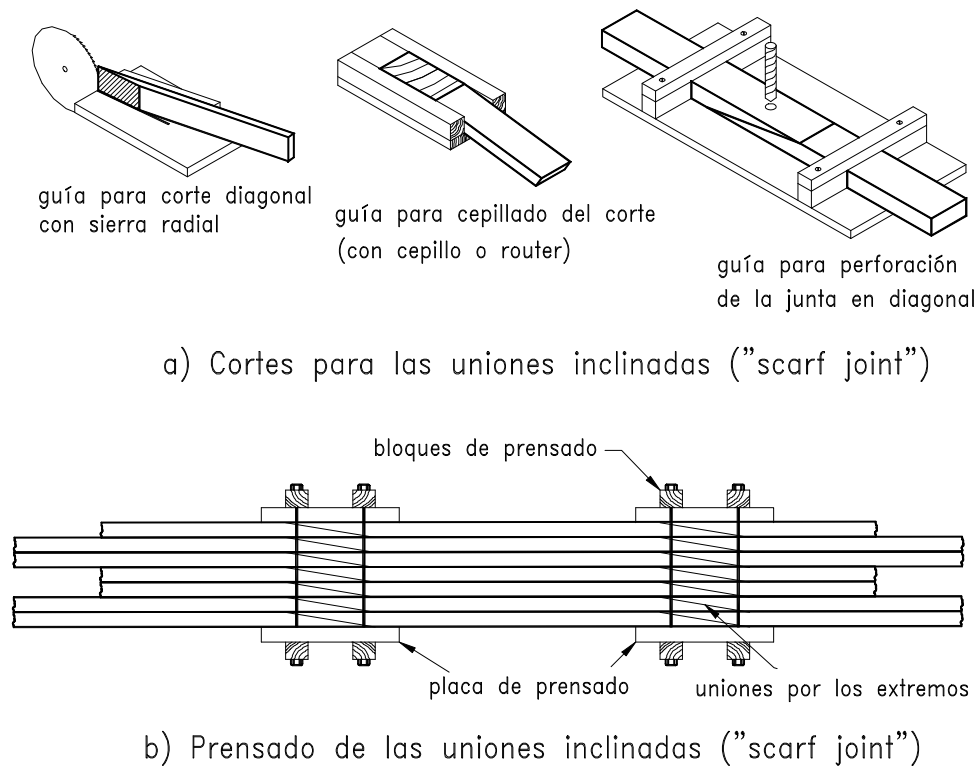
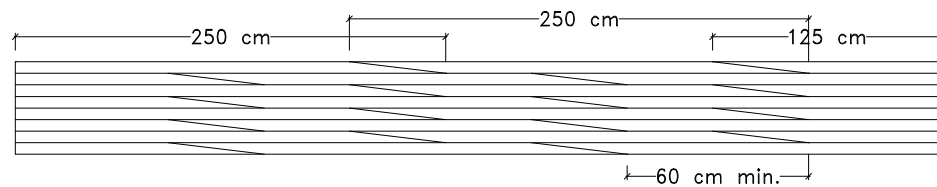


Figura 2. Corte de la madera para fabricar uniones inclinadas y prensado de las mismas.



a) configuración de uniones

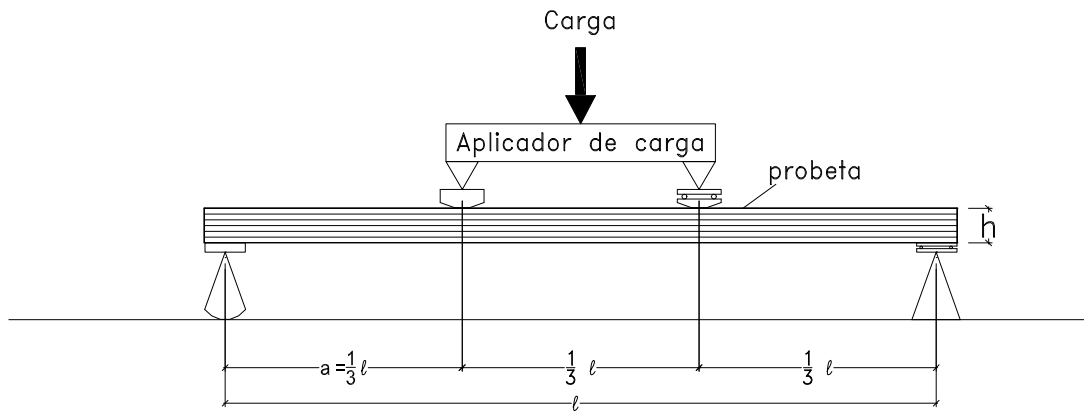


Figura 3. Configuración de uniones y esquema de las pruebas de flexión estática con vigas laminadas

Departamento de Materiales la Universidad Autónoma Metropolitana de Azcapotzalco.

**Pruebas con pequeñas probetas.** Se presentan los resultados de las pruebas de las propiedades mecánicas de la madera; de las propiedades físicas solamente se determinó la densidad relativa. Para una completa caracterización tecnológica de estas especies falta realizar las pruebas de propiedades físicas: velocidad de secado al aire libre y contracciones.

Para las pruebas se obtuvieron las probetas a partir del material correspondiente a tres trozas de cada árbol, excepto de un árbol de *Quercus laurina* del cual solamente se pudo obtener material de dos trozas. Por cada troza se elaboraron probetas para efectuar dos ensayos en condición seca y dos en condición verde de cada una de las pruebas siguientes: flexión, estática, compresión paralela a la fibra,

compresión perpendicular a la fibra, cortante paralelo a la fibra, dureza e impacto.

## RESULTADOS

**Fabricación de las vigas laminadas.** La fabricación de los laminados fue aceptable, salvo las dos primeras vigas que se prensaron cuando el adhesivo había empezado a fraguar. Lo anterior se refleja en la baja resistencia de estas dos piezas, y sus resultados se tuvieron que desechar de los promedios finales de las pruebas. Se muestrearon 7 uniones, obteniendo de cada una de ellas un promedio de seis probetas de 5 mm de espesor, como se muestra en la Figura 1. Estas probetas se ensayaron en tensión, siguiendo el procedimiento presentado en AITC, 1973. También se ensayaron probetas de dos muestras de madera sin uniones para estimar eficiencia

de la unión. Los valores obtenidos de estas pruebas se presentan en la Tabla 1.

Según Chugg (1964), las uniones inclinadas con una pendiente de 1:10 deberán tener una eficiencia del 80%. En la tabla 1 se presentan datos de la eficiencia de la unión del 67 %; probablemente la diferencia que se presenta entre estos valores se deba a que las uniones de este trabajo se realizaron con cortes de sierra y los de Chugg son para uniones con cortes de cepillo.

Los resultados de las pruebas de flexión estática de las nueve vigas ensayadas se presentan en la Tabla 2. Los

valores de resistencia y módulo de elasticidad que se presentan se calcularon tomando la sección transversal completa de los laminados. Es decir que no se consideró en definir una sección transformada por la diferencia de rigidez entre las láminas, ya que estas solo se clasificaron visualmente y no se investigó la rigidez de las mismas. En la misma Tabla 2 se presentan los resultados de las pruebas sin ajustar por contenido de humedad. Un procedimiento que se puede utilizar para efectuar ajustes por contenido de humedad es el presentado por Ordóñez y Dávalos (1996), aunque con reservas ya que es aplicable a madera aserrada de pino.

Tabla 1. Resistencia a tensión de las uniones inclinadas de las laminas y resistencia de la madera de encino

ESPECIMENES	RESISTENCIA A LA TENSION (kg/cm <sup>2</sup> )	OBSERVACIONES
uniones	678	5 probetas fallaron en la madera 2 probetas con falla del adhesivo
madera sin unión	1 015	

Tabla 2. Resistencia en flexión de vigas laminadas de encino

VIGA	LAMINAS	MOR (kg/cm <sup>2</sup> )	MOE (x 10 <sup>3</sup> kg/cm <sup>2</sup> )	CH (%)
1*	10	328.17	160.8	8.60
2*	10	456.36	176.7	9.92
3	11	827.10	163.1	10.83
4	11	756.20	154.7	10.78
5	11	660.98	142.1	11.37
6	11	759.56	150.9	10.44
7	11	714.23	148.4	11.16
8	11	793.31	149.2	11.77
9	11	792.57	151.5	10.26
Promedio		757.71	151.39	10.94
Desv. estándar		51.48	9.70	0.88
Coef. de variación		6.80	6.40	8.00

\* No se incluyen en el cálculo del valor promedio del MOR

Como se ha comentado, las vigas 1 y 2 tuvieron un proceso de fabricación defectuoso y fallaron en las líneas de adhesivo. El resto de los elementos tuvo fallas por defectos de la madera como nudos o fibra desviada. En una de las vigas la falla se inició en la cara con esfuerzos de compresión.

Para definir un valor de diseño se utilizaron los datos de la Tabla 2. En primer lugar se definió el valor de resistencia y rigidez en el 5/ percentil; tomando en cuenta que es una muestra pequeña se utilizó una distribución *t* de Student y a este valor se le aplicó un factor de ajuste por duración de carga de 1.6. En segundo lugar considerando que los resultados de las pruebas presentados corresponden a madera con un contenido de humedad cercano al 11%, se aplicaron las recomendaciones de la norma ASTM D 3737-92 y se ajustaron las propiedades de madera para un contenido de humedad superior al 16%, ajustando los valores de MOR por un factor de 0.8 y los del MOE con un factor de 0.833. Esto se acepta como válido para los valores especificados de resistencia de las NTCM, 1987 del Reglamento de Construcciones del Distrito Federal; el cual define a la madera seca como la que tiene un contenido de humedad menor al 18%.

Para establecer el valor de resistencia estándar en flexión que corresponde a un elemento ensayado con carga uniformemente distribuida los valores obtenidos se ajustaron por un factor de 0.97, aplicable a pruebas de flexión con vigas cargadas a los tercios del claro con dos cargas concentradas. Así que los valores de diseño se obtuvieron de la siguiente manera:

Obtención del 5/ percentil y ajuste por duración de carga:

$$\begin{aligned} \text{MOR}_{0.05} &= (757.71 - 1.943 \times 51.48) / 1.6 \\ &= 411 \text{ kg/cm}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{MOE}_{0.05} &= (151.39 - 1.943 \times 9.7) \times 10^3 \\ &= 132.54 \times 10^3 \text{ kg/cm}^2 \end{aligned}$$

$$\text{MOE}_{0.50} = 151,400 \text{ kg/cm}^2$$

Para el caso del módulo de elasticidad no se ajusta por el factor de duración de carga y el valor promedio se toma tal cual de los datos. Finalmente los valores de diseño se obtuvieron por el ajuste por contenido de humedad y por condiciones de carga como sigue:

$$f'_{fu} = 411 \times 0.80 \times 0.97 = 318.9 \text{ kg/cm}^2$$

$$E_{0.05} = 132,540 \times 0.833 = 110,405 \text{ kg/cm}^2$$

$$E_{0.50} = 151,400 \times 0.833 = 126,107 \text{ kg/cm}^2$$

Se sugiere redondear los valores anteriores a los siguientes:

$$f'_{fu} = 300 \text{ kg/cm}^2$$

$$E_{0.05} = 110,000 \text{ kg/cm}^2$$

$$E_{0.50} = 125,000 \text{ kg/cm}^2$$

Es importante remarcar que los valores propuestos para la resistencia de diseño y módulo de elasticidad son válidos para las siguientes condiciones: duración de carga normal, contenido de humedad igual o menor al 18%, vigas con un peralte menor o igual a 30 cm. El diseño bajo condiciones diferentes requiere de los ajustes pertinentes como los establecidos por la norma ASTM D3737-92.

En la Tabla 3 se presentan los valores obtenidos en este trabajo y los valores de un estudio similar en Estados Unidos. También se presentan los valores de diseño de la madera de encino correspondientes al grupo estructural I de la madera de latifoliadas (DDF, 1987).

**Pruebas con pequeñas probetas.** Como se ha mencionado, sólo se presentan los resultados de las propiedades mecánicas de las especies colectadas. Las pruebas efectuadas con la muestra son: flexión estática, compresión paralela a la fibra, compresión perpendicular a la fibra,

cortante paralelo a la fibra, impacto, dureza "Janka" y densidad relativa.

En la Tabla 4 se presentan los resultados de estas pruebas con pequeñas probetas en condición "verde" y en condición seca.

Tabla 3. Comparación de las propiedades en flexión de laminados estructurales con madera de encino

	$f'_{fu}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$E_{0.5}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$E_{0.05}$ (kg/cm <sup>2</sup> )
S Vigas laminadas con encinos del Cofre de Perote <sup>1</sup>	300	125 000	110 000
S Valores de diseño de las NTCM del Reglamento del D.F. <sup>1</sup>	300	160 000	120 000
S Laminados con encinos de E.U.A. (Shedlauskas et al., 1996)	--	131 000	--

<sup>1</sup> Valores para un CH = 18%

Tabla 4. Propiedades mecánicas de madera de encino libre de defectos

ESPECIE	<i>Quercus crassifolia</i>		<i>Quercus laurina</i>		<i>Quercus crassifolia</i> *		
	CH	verde	CH	verde	CH	verde	
DR (pa/vv)	0.66	0.66	0.67	0.66	0.68	---	
FLEXION ESTÁTICA	ELP (kg/cm <sup>2</sup> )	580	371	669	380	769	427
	MOR (kg/cm <sup>2</sup> )	1 232	605	1 394	691	1 289	762
	MOE (kg/cm <sup>2</sup> )	143 197	85 613	159 500	104 635	140 000	118 000
	TLP (cm-kg/cm <sup>3</sup> )	0.132	0.092	0.158	0.079	0.211	0.086
COMPRESION PARALELA	$E_{max}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	489	219	563	261	662	299
COMPRESION PERPEND.	ELP (kg/cm <sup>2</sup> )	84	51	84	50	102	65
DUREZA	Lateral, (kg)	969	538	819	603	980	562
	Extremos, (kg)	1 049	588	934	668	1 143	587
CORTANTE	kg/cm <sup>2</sup>	155	112	166	116	178	73
TENACIDAD	cm-kg/cm <sup>3</sup>	2.641	2.032	3.564	2.455	5.130	3.020

\* Ordóñez et al., 1989



## DISCUSION Y CONCLUSIONES

Con los resultados de este trabajo se considera que la fabricación de vigas laminadas, se puede realizar mediante un proceso simple, de fácil adopción por por pequeñas industrias forestales, lo que les ayudaría a incrementar la comercialización de la madera de encino. Las uniones inclinadas ("scarf-joint") se pueden elaborar mediante una sierra radial aunque se obtienen mejores resultados con una unión elaborada con cepillo. Una mejor forma de hacer las uniones de los extremos es utilizando la unión de dedos ("finger-joint") pero requiere de una inversión mayor en maquinaria.

Las propiedades mecánicas de las vigas laminadas que se estudiaron son comparables con los datos encontrados en otros trabajos similares, por lo que se puede confiar en el uso de estos elementos en estructuras permanentes. Como se observa en la Tabla 3 los valores de diseño obtenidos en este estudio son comparables a los valores de las NTCM, correspondientes a madera aserrada del Grupo I de las especies de latifoliadas, al que pertenecen los encinos rojos; igualmente son comparables con los datos obtenidos por Shedlauskas *et.al.* (1996).

Por los resultados de este trabajo se considera que la madera de las especies de *Quercus* sp. se puede utilizar en aplicaciones estructurales y se tendría un comportamiento adecuado de las vigas laminadas como se puede observar en los valores de resistencia obtenidos con las vigas estudiadas.

## RECONOCIMIENTOS

Este trabajo se realizó con los recursos del Departamento de Productos Forestales y Conservación de Bosques con la clave 902-13. Así mismo se agradece la participación y el apoyo proporcionado por la Universidad Autónoma Metropolitana de

Azcapotzalco y al personal del Laboratorio de Materiales, en especial al Sr. Leopoldo Quiroz Soto.

## REFERENCIAS

- AITC. 1985. Standard specifications for hardwood glued laminated timber. AITC 119-85 Englewood CO. AITC. American Institute of Timber Construction
- AITC. 1973. Inspection Manual. AITC. Englewood CO. American Timber Construction
- ASTM. 1997. Static Tests of Timbers in Structural Sizes. ASTM D198.94. Phyladelphia, PA. American Society for Testing and Materials.
- ASTM. 1997. Standard Methods of Testing Small Clear Specimens of Timber. ASTM D143-94. Philadelphia, PA. American Society for Testing and Materials.
- ASTM. 1997. Standard Practice for Establishing Stresses for Structural Glued Laminated Timber (Glulam). ASTM D 3737-96. Philadelphia, PA. American Society for Testing and Materials.
- Chugg, W.A. 1964. Glulam. The theory and practice of the manufacture of glued laminated timber structures. Ernest Benn Limited. London 1964.
- DDF. 1987. Normas Técnicas Complementarias para el Diseño y Construcción de Estructuras de Madera. Gaceta Oficial del Departamento del Distrito Federal. Quinta Epoca N° 48. México, D.F. 43 pp
- Manbeck, H.B. J.J. Janowiak, P.R. Blankenhorn, P. Labosky, Jr., R.C. Moody y R. Hernandez. 1996. Efficient

- Hardwood glued-laminated beams. Proceedings of the International WoodEngineering Conference. New Orleans LA. USA. Vol.1:283-290
- Ordóñez C., V.R., G. Bárcenas P. y A. Quiroz S. 1989. Características Físico-mecánicas de la madera de diez especies de San Pablo Macuilianguis, Oaxaca. La Madera y su Uso N/ 21. Instituto de Ecología A.C. UAM-Azcapotzalco.
- Ordóñez C., V.R. y R. Dávalos S. 1996. Ajuste de las propiedades mecánicas de la madera estructural por cambios del contenido de humedad. Madera y Bosques 2(2):43-51. Instituto de Ecología A.C., Xalapa, Ver. México.
- Shedlauskas, J.P., H.B. Manbeck, J.J. Janpwiak, R. Hernandez, R.C. Moody, P. Labosky, Jr. y P.R. Blankenhorn. 1996. Efficient use of red oak for glued-laminated beams. Transactions of the ASAE 39(1):203-209.