

**Proyecto de
Tecnología de Ensayo
de Productos Forestales
LATU-JICA
(1998-2003)**

**Propiedades Mecánicas y Resistencia de
Uniones Encoladas de Vigas Laminadas**

Ing. Agr. OF Alvaro Pérez del Castillo

Sr. Luciano Benites

**Informe de Investigación N°10
2002**



PRÓLOGO

El presente trabajo es el décimo de la serie: “Informes de Investigación”, que reunirá estudios realizados como parte del “Proyecto de Tecnología de Ensayo de Productos Forestales” entre el Sector Productos Forestales del LATU y JICA (Agencia de Cooperación Internacional del Japón) en Montevideo, Uruguay desde 1998 hasta 2003.

Con esta serie el LATU pretende la difusión tecnológica como una contribución al desarrollo de la industria forestal.

AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Hiroshi Wada y al Dr. Hiromu Kajita por su apoyo técnico invaluable y su permanente colaboración.

Al Ing. Quím. Raúl de Castro, Jefe del Sector Producto Forestales, por su supervisión.

A URUFOR S.A. por el apoyo recibido en la realización de esta investigación.

Al Sr. Kasuo Shiono por su apoyo constante.

Al equipo técnico del Sector Productos Forestales del LATU.

TABLA DE CONTENIDOS

	Página
1. <u>INTRODUCCIÓN</u>	2
2. <u>MATERIALES Y METODOS</u>	3
2.1. HISTORIA.....	3
2.2. VENTAJAS DE LA MADERA LAMINADA.....	3
2.3. ENCOLADO DE MADERAS.....	5
2.3.1. <u>Consideraciones generales</u>	5
2.3.2. <u>Tipos de adhesivos</u>	7
2.4. MADERA UTILIZADA PARA LA FABRICACIÓN DE LAS VIGAS.....	8
2.5. DIMENSIONES DE LAS VIGAS.....	8
2.6. SECADO DE LAS LÁMINAS.....	8
2.7. DETERMINACIÓN DEL MOE DE LAS LÁMINAS.....	9
2.8. CLASIFICACIÓN VISUAL DE LAS LÁMINAS.....	11
2.9. ARMADO DE VIGAS LAMINADAS.....	12
2.9.1. <u>Momento de inercia de las láminas según ubicación en la viga</u>	12
2.9.2. <u>Armado de vigas en laboratorio</u>	13
2.10. FABRICACIÓN DE LAS VIGAS Y ADHESIVO UTILIZADO.....	13
2.11. MÉTODOS PARA ESTIMACIÓN DEL MOE Y MOR DE VIGAS.....	14
2.11.1. <u>Estimación teórica del MOE de las vigas</u>	14
2.11.2. <u>Otros métodos no destructivos de determinación del MOE en vigas</u>	14
2.11.3. <u>Flexión estática para determinación del MOE y el MOR</u>	14
2.12. ENSAYOS DE EVALUACIÓN DE LA UNIÓN ENCOLADA DE VIGAS.....	16
2.12.1. <u>Ensayo de esfuerzo cortante sobre línea de encolado</u>	16
2.12.2. <u>Ensayos de delaminación</u>	18
3. <u>RESULTADOS</u>	19
3.1. MOE DE LÁMINAS Y MOE DE VIGAS.....	19
3.1.1. <u>Comparación entre el MOE de láminas y el MOE Teórico de vigas</u>	19
3.1.2. <u>Comparación entre el MOE de vigas obtenido por diferentes métodos</u>	20
3.2. MÓDULO DE ROTURA (MOR) DE VIGAS LAMINADAS.....	21
3.3. ENSAYOS DE EVALUACIÓN DE LA UNIÓN ENCOLADA.....	22
3.3.1. <u>Ensayo de esfuerzo cortante sobre línea de encolado</u>	22
3.3.2. <u>Ensayos de delaminación</u>	24
4. <u>CONCLUSIONES</u>	25
5. <u>BIBLIOGRAFÍA</u>	26

PROPIEDADES MECÁNICAS Y RESISTENCIA DE UNIONES ENCOLADAS DE VIGAS LAMINADAS

RESUMEN

En el marco del Proyecto de “Tecnología de Ensayo de Productos Forestales” entre el LATU y JICA, se realizaron diversos ensayos mecánicos y de resistencia de uniones encoladas sobre vigas laminadas de distintas especies. Se estudiaron vigas laminadas de *Eucalyptus grandis*, *Pinus taeda* y *Pinus elliottii* de 100 x 140 x 2900 mm, compuestas de 5 láminas de madera maciza de 28 milímetros de espesor (sin uniones finger-joint).

Se determinó el módulo de elasticidad (MOE) y se realizó clasificación visual siguiendo normas JAS de cada una de las láminas que constituían las vigas. Posteriormente se procedió al armado de las vigas teniendo en cuenta el MOE y la clasificación visual.

Sobre las vigas se determinó el MOE por diferentes métodos y el módulo de rotura (MOR).

Por último se realizaron ensayos de resistencia de la unión encolada. Estos ensayos fueron: esfuerzo cortante en unión encolada (esfuerzo unitario máximo y porcentaje de rotura de madera) y delaminación.

PALABRAS CLAVE: vigas laminadas, módulo de elasticidad, módulo de rotura, esfuerzo cortante, delaminación.

SUMMARY

Within the activities of the “Forest Products Testing Technologies” project between LATU and JICA, several mechanical and adhesive resistance tests were performed over glulam beams made from different species. *Eucalyptus grandis*, *Pinus taeda* and *Pinus elliottii* glulam beams were studied (100 x 140 x 2900 mm).

Modulus of elasticity (MOE) was estimated and visual inspection of the laminations was performed following JAS standards. After that, glulam beams were built, having in mind MOE and visual inspection.

Different methods for estimating MOE were analyzed and modulus of rupture (MOR) was calculated over glulam beams.

Finally, adhesive resistance tests were performed. These tests consists of shear strength of each glue line, wood failure and delamination tests.

KEY WORDS: gluelam beams, Modulus of elasticity, Modulus of rupture, shear strength, delamination.

1. INTRODUCCIÓN.

A partir del año 1987, en el cual el gobierno uruguayo estableció un Plan de Forestación, distintas especies pertenecientes a los géneros *Pinus* y *Eucalyptus* han sido plantadas en grandes áreas y con gran éxito. Son especies que se adaptan con facilidad a diferentes sitios de plantación y crecen rápidamente bajo condiciones óptimas.

Hasta el presente, aproximadamente 600.000 hectáreas han sido plantadas con diferentes especies de *Pinus* y *Eucalyptus*. Parte de estos montes está siendo cortada por lo que nuevos productos comenzarán a ser fabricados a partir de la madera obtenida.

Los elementos encolados de madera maciza son productos de ingeniería de la madera que ya se están fabricando y con muy buen éxito en nuestro país. El progreso de la tecnología de fabricación de productos compuestos por láminas de madera encolada, representa un gran avance en el desarrollo de las aplicaciones de la madera sólida. Esto permitiría obtener piezas de calidad normalizada, en un amplio rango dimensional y con un mejor aprovechamiento de la materia prima.

Las vigas laminadas se definen como un material formado por piezas de madera adecuadamente seleccionados y preparados de forma recta o curva, con el grano de todas las piezas esencialmente adheridas en forma paralela al eje longitudinal del miembro. El tamaño de una viga laminada solo está limitado por la capacidad de la máquina que la produce.

Durante la fabricación de estos elementos es posible sanear los defectos presentes en la madera maciza (principalmente nudos), para posteriormente, reconstituir mediante encolado las piezas obtenidas hasta alcanzar productos con dimensiones inimaginables para madera sólida.

En este estudio se realizaron cuatro vigas laminadas de *Eucalyptus grandis*, cuatro de *Pinus taeda* y cuatro de *Pinus elliottii*. Se estimó el MOE de las láminas que formaron las vigas y el MOE y MOR de las vigas. Una vez finalizado el ensayo destructivo para cálculo del MOR, se realizaron ensayos de resistencia de la unión encolada sobre probetas obtenidas de cada una de las vigas ensayadas.

2. MATERIALES Y MÉTODOS.

2.1. HISTORIA.

El empleo de elementos encolados de madera tiene una larga tradición. Las primeras referencias históricas existentes provienen de las civilizaciones china y egipcia, que ya elaboraban tableros alistonados mecanizando cajas y espigas en sus cantos y empleando adhesivos de origen animal.

Para la construcción, la madera laminada fue usada inicialmente en Europa en un auditorio en Basel, Suiza, en 1893. Esta construcción es comúnmente citada como la primera vez que se utilizó madera laminada y encolada a gran escala. Se utilizaron adhesivos que según las normas de hoy en día serían no resistentes al agua. Mejoras en los adhesivos durante y posteriormente a la Primera Guerra Mundial, estimularon un interés adicional en Europa para utilizar madera laminada en la fabricación de aeronaves y marcos para construcción.

En Estados Unidos, una de las primeras construcciones con madera laminada y encolada data del año 1934.

La Segunda Guerra mundial renovó nuevamente el interés en la madera laminada y encolada provocando el desarrollo de adhesivos de resina sintética resistente al agua. Esto permitió el uso de madera laminada y encolada en puentes y otras aplicaciones exteriores que requerían tratamiento de preservación. A principios de los años 50, había por lo menos 12 fábricas de madera laminada y encolada en Estados Unidos (Wood Handbook, USDA; 1999).

2.2. VENTAJAS DE LA MADERA LAMINADA.

Comparada con la madera sólida, así como con otros materiales estructurales, la madera laminada y encolada tiene importantes ventajas (Wood Handbook, USDA; 1999). Estas son:

a) Dimensiones

La madera laminada y encolada ofrece la ventaja de fabricar elementos estructurales de madera, mucho mas grandes que los mismos árboles de los que la madera proviene. En el pasado, era común que los aserraderos tuvieran acceso a árboles de grandes diámetros de los cuales se podían obtener grandes vigas de madera sólida. La tendencia mundial actual, es cosechar árboles de menores diámetros en rotaciones mucho más cortas, por lo que los aserraderos son construidos para trabajar con este tipo de trozas. Mediante la combinación y el encolado de la madera obtenida en estos aserraderos, es posible la producción de elementos estructurales de gran tamaño.

b) Formas arquitectónicas

Mediante el curvado de la madera durante el proceso de fabricación, una variedad de formas arquitectónicas se pueden obtener que serían muy difíciles o imposibles de obtener con otros materiales. El grado de curvatura es limitado, entre otras cosas, por el espesor de las láminas que componen el elemento.

c) Ventajas en el secado

La madera utilizada en la fabricación de vigas laminadas debe ser secada antes de construir la pieza, por lo que los problemas de rajado y otros defectos de secado se minimizan en relación a los defectos de una viga de madera sólida. Esto tiene una doble e importante incidencia en el costo de secado por:

- a) se reduce el tiempo de secado.
- b) se reduce el porcentaje de descarte o rechazo.

d) Variación de la sección transversal

Un mismo elemento estructural puede ser diseñado con diferentes secciones transversales a lo largo de su dimensión longitudinal, dependiendo de la resistencia y rigidez requerida.

e) Ambientalmente amigable

Mucho se ha escrito y discutido acerca de los efectos ambientales de diversos productos. Se ha demostrado que la madera ofrece ventajas ambientales frente a otros productos por el bajo costo energético del proceso de transformación, ser un recurso renovable, la capacidad de almacenar carbono y la posibilidad de ser reciclable.

f) Adecuada utilización de maderas de diferentes calidades

Una gran ventaja de la madera laminada es que se puede utilizar madera de baja resistencia en zonas donde el esfuerzo no será importante. Generalmente las maderas de calidad superiores se utilizan en las zonas de las vigas donde se producirá mayor esfuerzo (zonas externas), mientras que la madera de menor resistencia se utiliza en la zona central de la viga. En la Figura N°1, se observa un esquema de los distintos esfuerzos que se producen en una viga cuando es sometida a un esfuerzo de flexión. Debido a esta deformación, las capas de fibras ubicadas en la parte superior se acortan, mientras que las capas inferiores se alargan. Existe una capa de fibras que se deforma sin variar la longitud, dicha capa recibe el nombre de línea neutra. En dicha zona se puede utilizar material de baja resistencia.

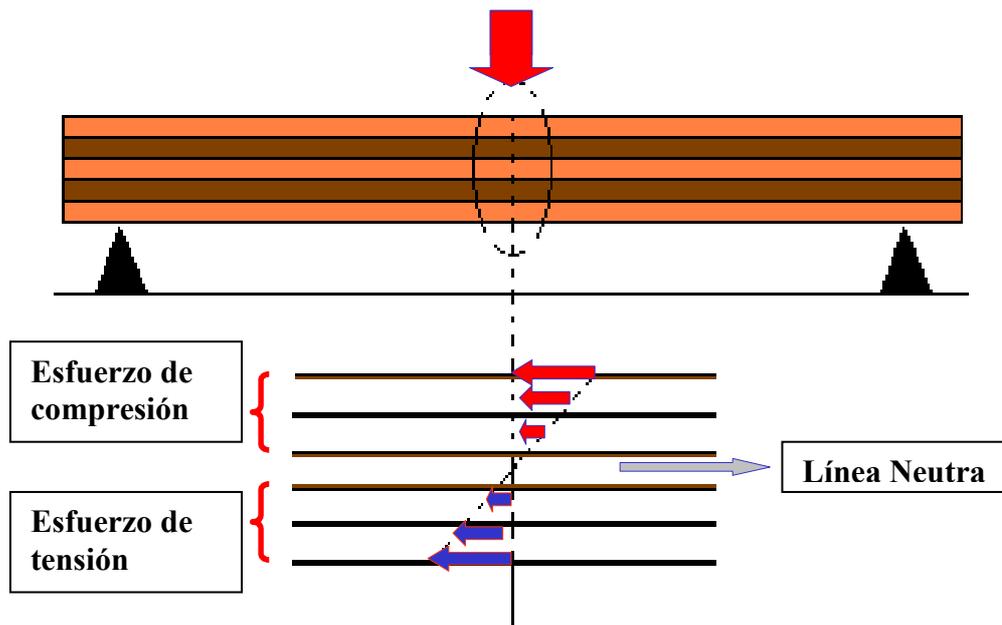


Figura N°1: Esfuerzos provocados en las distintas láminas que componen la viga.

2.3. ENCOLADO DE MADERAS.

2.3.1. Consideraciones generales.

Las uniones con adhesivos de componentes de madera han jugado un rol esencial en el desarrollo y crecimiento de la industria de productos forestales y ha sido un factor clave en la utilización eficiente de los recursos madereros. Dónde más se utilizan adhesivos es en la industria de la construcción.

En toda unión encolada hay que distinguir las siguientes fases:

a) Adherente o substrato:

Es cada uno de los cuerpos que es unido a otro.

b) Adhesivo:

Es la sustancia capaz de unir los adherentes mediante uniones superficiales.

c) Interfase:

Superficie común adhesivo-adherente.

d) Junta encolada:

Conjunto de dos substratos unidos mediante un adhesivo.

El comportamiento de una unión encolada depende de tres factores: la madera, el adhesivo y la interfase madera adhesivo.

Muchos autores explican el fenómeno físico de la adhesión a través de dos conceptos fundamentales: la “adhesión mecánica” y la “adherencia específica” (Revista de la Sociedad de Productores Forestales, Marzo 1999).

La adhesión mecánica implica que las superficies se mantienen unidas por el adhesivo que ha penetrado en la superficie porosa cuando estaba en estado líquido, para luego anclarse al solidificar. La adhesión mecánica es probablemente el primer mecanismo de adhesión de los materiales porosos como la madera. Si un adhesivo penetra suficientemente profundo en la madera y queda suficientemente rígido luego de curado, la resistencia de la adhesión puede esperarse que sea superior a la resistencia de la madera.

La adherencia específica se debe a las fuerzas de atracción molecular entre el adhesivo y las superficies unidas, y que es independiente de que el adhesivo penetre o no en los cuerpos que se van a unir.

En el caso de la madera, existe una combinación de ambos tipos de adherencia que, evidentemente, es más resistente que la de cada tipo tomado independientemente.

Para que dos piezas se puedan mantener unidas con máxima resistencia, el adhesivo líquido debe mojar y propagarse libremente para mantener un contacto íntimo entre los adherentes. Las moléculas del adhesivo deben difundirse sobre y dentro de los adherentes. Así hacen contacto con la estructura molecular de la madera posibilitando que las fuerzas de atracción intermoleculares entre la madera y el adhesivo se hagan efectivas. Por esto, el adhesivo líquido debe tener alta mojabilidad, asociada a una viscosidad que pueda producir un alto flujo capilar que pueda penetrar la estructura de la madera, mientras desplaza y absorbe aire, agua y contaminantes en la superficie.

El mojado de una superficie ocurre cuando el ángulo de contacto (ángulo entre el borde de la gota del adhesivo y la superficie de la madera) se aproxima a cero. El ángulo de contacto se aproxima a cero cuando la superficie tiene alta energía de atracción, el adhesivo tiene afinidad por la superficie encolada y la tensión superficial del adhesivo es baja. Si una gota de adhesivo

se esparce en una capa delgada con un ángulo de contacto próximo a cero, el adhesivo se ha propagado bien y ha producido un contacto íntimo con la superficie. Las diferencias de mojabilidad de una simple gota de agua sobre distintas superficies de madera se pueden observar en la Figura N°2.

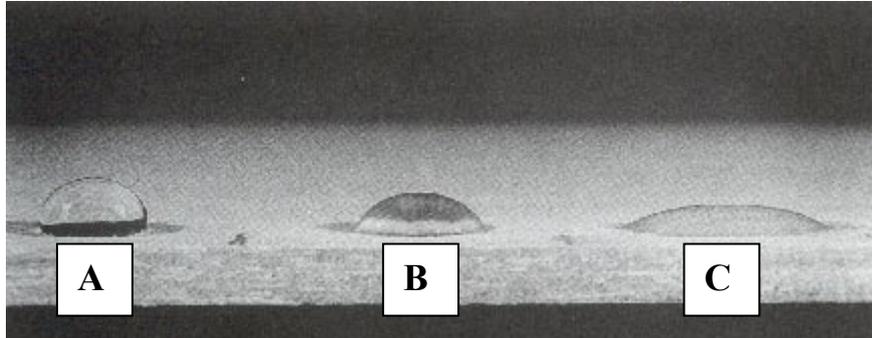


Figura 2: Diferencia de mojabilidad en superficie de madera (Wood Handbook, USDA).

A⇒ Superficie sin lijar (mayor ángulo de contacto)

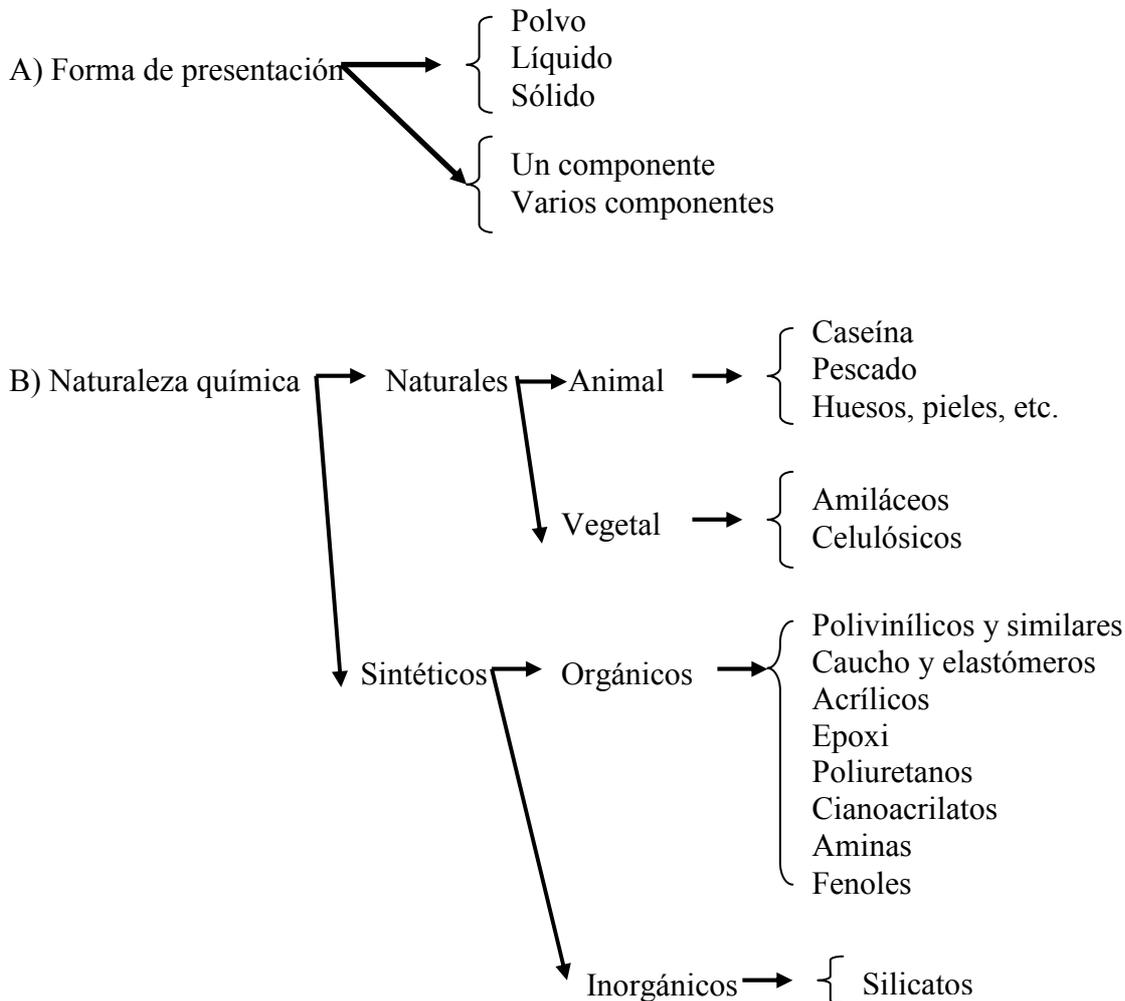
B⇒ Superficie con dos pasadas de lija

C⇒ Superficie con cuatro pasadas de lija (menor ángulo de contacto)

Por otra parte, son muy importantes las condiciones físicas y químicas de los adherentes para obtener una adhesión resistente. La superficie de la madera debe estar lisa, plana, libre de marcas producidas por las máquinas y otras irregularidades superficiales, incluyendo zonas no cepilladas y defectos en el grano. La superficie debe estar libre de barnices, exudados, aceites, suciedad, etc. El deterioro físico y la contaminación química interfieren en el mojado, el movimiento y la penetración del adhesivo, pero también pueden interferir con el curado y la resistencia de cohesión resultante del adhesivo.

2.3.2. Tipos de adhesivos.

En función de:



C) Forma de curar:

→ Por difusión en el sustrato y evaporación del agua de la emulsión (acetato de polivinilo o “cola blanca”).

→ Termoendurecibles, o sea reacción química irreversible que sufre la mezcla encolante cuando se calienta (adhesivos de urea formaldehído, melamina formaldehído, fenol formaldehído, resorcina formaldehído).

→ Reacción entre dos componentes (adhesivos de epoxi y de poliuretano).

→ Termofusibles: Se presentan en estado sólido y con calor funden, siendo entonces aplicado sobre el sustrato. Una vez realizado el encolado, el adhesivo vuelve a solidificar por enfriamiento (adhesivos de etilvinilo-acetato).

2.4. MADERA UTILIZADA PARA LA FABRICACIÓN DE LAS VIGAS.

Se fabricaron en total 12 vigas laminadas de tres especies distintas:

- 4 vigas de *Eucalyptus grandis* procedente de Rivera.
- 4 vigas de *Pinus taeda* procedente de Río Negro.
- 4 vigas de *Pinus elliottii* de Río Negro.

Se seleccionaron tablas sin médula y sin defectos importantes como ser nudos superiores al 50% del ancho, grietas, rajaduras y pudrición.

2.5. DIMENSIONES DE LAS VIGAS.

Como se observa en la Figura N°3, las dimensiones de las vigas eran de 140 x 100 x 2900 mm. Cada viga estaba compuesta de 5 tablas ó láminas, cada una de ellas de 28 x 100 x 2900 mm.

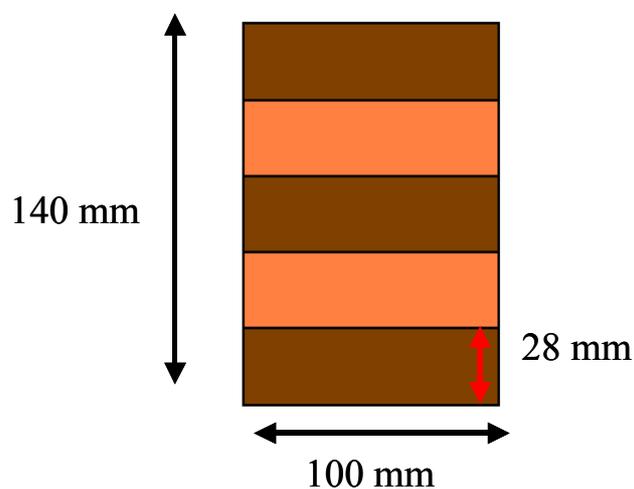


Figura N°3: Dimensiones de vigas ensayadas.

2.6. SECADO DE LAS LÁMINAS.

Las láminas fueron secadas a la intemperie protegiendo la estiba con un techo de chapa. El contenido de humedad de las láminas se controló con xilohigrómetro. Una vez que el contenido de humedad era menor al 15%, se realizó la determinación del módulo de elasticidad (ver 2.7.).

2.7. DETERMINACIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD DE LAS LÁMINAS.

Se cortaron un total de 60 láminas (20 por especie).

A cada una, se le determinó el módulo de elasticidad por dos métodos diferentes:

a) Flexión estática con pesas.

Con un comparador, se midió la deformación producida en las láminas una vez que se colocaba un peso determinado. Dicho peso fue de 15 kilos, midiéndose la flecha producida con un extensómetro de alta precisión. En la Figura N°4, se observa este ensayo.

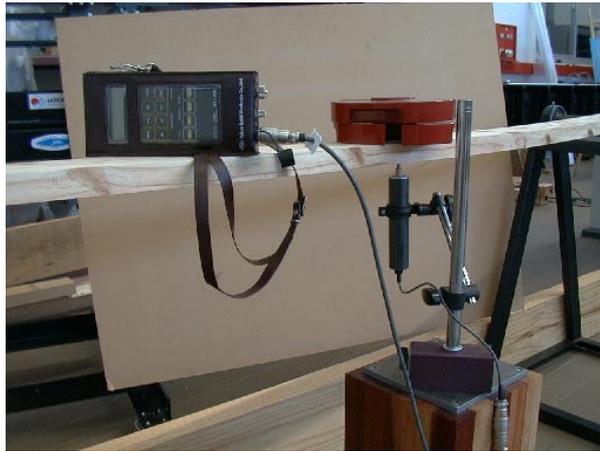


Figura N°4: Flexión estática de láminas (método de pesas)

La fórmula utilizada para estimar el MOE por el método de las pesas fue la siguiente:

$$MOE_{\text{pesas}} = \frac{(\Delta P \cdot s^3)}{(4 \cdot \Delta y \cdot b \cdot h^3)}$$

Donde:

MOE_{pesas} = módulo de elasticidad

ΔP : carga de las pesas

s : distancia entre los apoyos de la tabla

Δy : deformación medida para ΔP

b : ancho de lámina

h : altura de lámina

b) Método de frecuencia de vibración longitudinal (FFT Analyzer).

Mediante un golpe con un martillo en uno de los extremos, el FFT Analyzer (Figura N°5) capta por medio de un micrófono la frecuencia de vibración longitudinal de la lámina. Una vez que se obtiene dicha frecuencia y la densidad, se puede determinar el módulo de elasticidad (MOE).



Figura N°5: FFT Analyzer

La fórmula utilizada para estimar el MOE con el FFT Analyzer fue la siguiente:

$$E_f = \frac{4 \cdot L^2 \cdot f_l^2 \cdot \rho}{g}$$

Donde:

- E_f : MOE por vibración longitudinal
- L : Largo de la tabla
- f_l : Frecuencia de vibración longitudinal
- g : Constante de aceleración gravitacional
- ρ : Densidad corriente de la madera
(peso corriente/ volumen corriente)

2.8. CLASIFICACIÓN VISUAL DE LAS LÁMINAS.

Además de la determinación del MOE de cada lámina, también se realizó una clasificación visual según las normas JAS para fabricación de madera laminada. Se midió ancho y espesor en tres zonas distintas de cada lámina. Luego se trazaron dos líneas longitudinales en cada cara (ver Figura N°6), a 5 mm del canto. Se midieron los diámetros de todos los nudos que se encontraron entre la línea trazada y el canto (ejemplo: nudo “a”) y los nudos que estaban en contacto con la línea (ejemplo: nudo “b”).

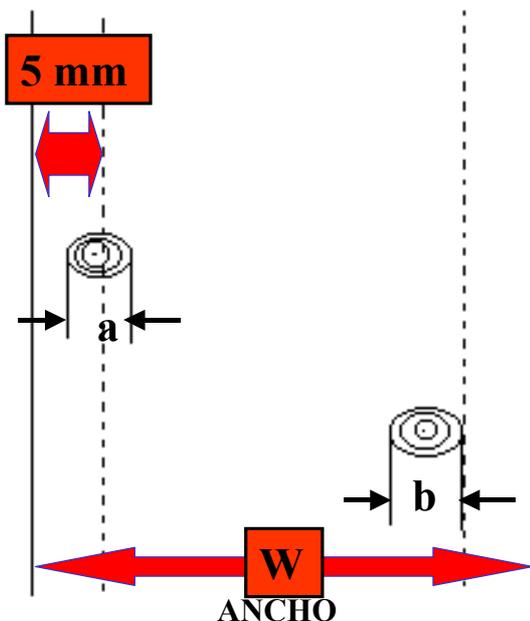


Figura N°6: Clasificación visual de láminas.

Posteriormente, se seleccionó el nudo de mayor diámetro y se calculó la “Razón del Diámetro Nudoso” según la fórmula siguiente:

$$\text{“Razón del Diámetro Nudoso”} = \frac{\text{Diámetro del nudo Mayor (a ó b)}}{W} \times 100$$

Donde:

w : ancho de la lámina

Según esta clasificación visual, se obtuvieron cuatro categorías diferentes de tablas que luego se tomaron en cuenta en la fabricación de las vigas, siendo dichas categorías:

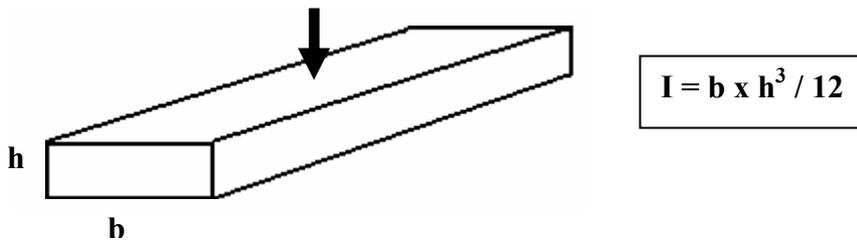
- Grado 1** : “Razón del Diámetro Nudoso” hasta 17%
- Grado 2** : “Razón del Diámetro Nudoso” hasta 25%
- Grado 3** : “Razón del Diámetro Nudoso” hasta 33%
- Grado 4** : “Razón del Diámetro Nudoso” mayor a 50%.

2.9. ARMADO DE VIGAS LAMINADAS.

2.9.1. Momento de inercia de las láminas según ubicación en la viga.

A continuación se explica como varía el momento de inercia según la ubicación de las láminas dentro de la viga, y como esto afecta al valor de MOE final de la viga.

El momento de inercia de la sección rectangular en relación con el eje neutro (I) se calcula de la siguiente manera:



En una pieza rectangular: $E \times I = \text{Rigidez en flexión}$

Dónde: E= Módulo de elasticidad

I= Momento de inercia

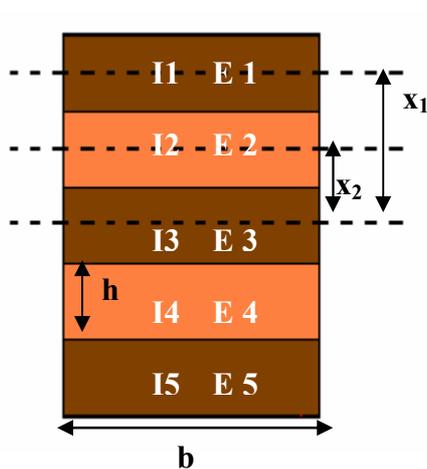
En una viga laminada: $E_{\text{viga}} \times I_{\text{viga}} = \sum E_i \times I_i \Rightarrow E_{\text{viga}} = (\sum E_i \times I_i) / I_{\text{viga}}$

Dónde: E_{viga} = Módulo de elasticidad de la viga

I_{viga} = Momento de inercia de la viga laminada

E_i = Módulo de elasticidad de las láminas E_1, E_2, \dots, E_i .

I_i = Momento de inercia de lámina I_1, I_2, \dots, I_i .



Momento de inercia de cada lámina:

$$I_n = b \cdot h^3 / 12 + x_n^2 \cdot A \quad A = b \cdot h$$

$$I_1 = I_5 = b \cdot h^3 / 12 + (x_1)^2 \cdot (b \cdot h) = b \cdot h^3 / 12 + 4bh^3$$

$$I_2 = I_4 = b \cdot h^3 / 12 + (x_2)^2 \cdot (b \cdot h) = b \cdot h^3 / 12 + bh^3$$

$$I_3 = b \cdot h^3 / 12$$

Donde: b = ancho lámina $x_1 = 2h$

h = espesor lámina $x_2 = h$

$x_3 = 0$

En la situación estudiada, la influencia del momento de inercia de cada una de las láminas influye en la rigidez de la viga, de la siguiente manera:

$$I_1 = I_5 = 0,392$$

$$I_2 = I_4 = 0,104$$

$$I_3 = 0,008$$

Resumiendo, la fórmula para determinación del MOE de las vigas laminadas para este caso puntual es:

$$E_{\text{viga}} = (E_1 + E_5) \cdot 0,392 + (E_4 + E_2) \cdot 0,104 + E_3 \cdot 0,008$$

2.9.2. Armado de vigas en laboratorio.

Una vez que se estimó el MOE y se clasificaron visualmente todas las láminas de cada especie, se procedió al armado de las vigas, o sea especificar que posición ocuparán las láminas dentro de las vigas.

Según se observa en la Figura N°7, las láminas de mayor MOE se colocaron en las zonas externas de las vigas. Esto es debido a que en dichas zonas, es donde se producirá el mayor esfuerzo cuando se realice el ensayo de flexión para cálculo del módulo de rotura. También se tuvo en cuenta la clasificación visual realizada. En la cara que soportará esfuerzos de compresión, las tablas presentan mayor cantidad de nudos que las láminas en las zonas de tensión. A modo de ejemplo, la viga de la Figura N°7, presenta dos láminas de alto MOE (láminas 1 y 5), 2 láminas de MOE medio (la 2 y la 4) y una lámina de MOE bajo (la número 3). Por otra parte, la lámina 5 presenta una menor “razón de diámetro nudosa” que la 1 y la lámina 4 menor que la 3.

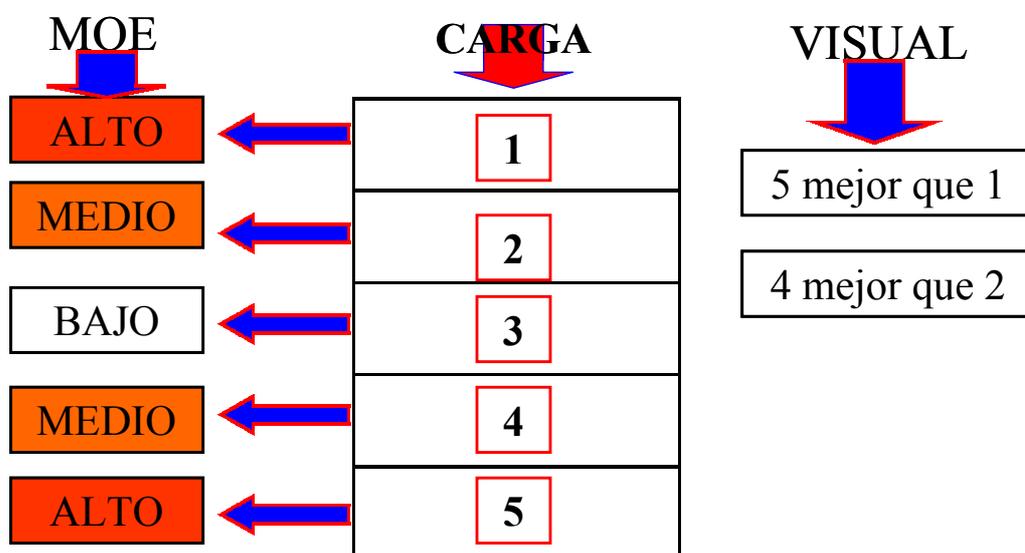


Figura N°7: Armado de vigas en laboratorio.

2.10. FABRICACIÓN DE LAS VIGAS LAMINADAS Y ADHESIVO UTILIZADO.

Para la fabricación de las vigas, se cepillaron todas las láminas hasta llevarlas al espesor final deseado (28 mm) e inmediatamente después se procedió al encolado y prensado. Se utilizó una prensa de alta frecuencia aplicando la carga y el tiempo de curado especificado por el fabricante del adhesivo.

Una vez curado el adhesivo, las vigas fueron lijadas para darles la terminación final.

El adhesivo utilizado fue un polímero de isocianato en base acuosa, aplicándose aproximadamente 200 g /m².

2.11. MÉTODOS UTILIZADOS PARA ESTIMACIÓN DEL MOE Y MOR.

2.11.1. Estimación teórica del MOE de las vigas.

Teniendo en cuenta el MOE determinado para cada una de las láminas y su momento de inercia (que es función de su ubicación dentro de la viga), se determinó un MOE teórico de las vigas mediante la fórmula descrita en el punto 2.9.1.

2.11.2. Otros métodos no destructivos de determinación del MOE en vigas.

Además de la estimación teórica descrita en el punto anterior, se determinó el MOE de las vigas por otros métodos no destructivos:

- ⇒ Método de frecuencia de vibración longitudinal (FFT Analyzer)
- ⇒ Método de frecuencia de vibración transversal (FFT Analyzer)

2.11.3. Flexión estática para determinación del MOE y el MOR.

En la máquina universal de ensayos, mediante el ensayo de flexión estática en 4 puntos, se determinó nuevamente el MOE (midiendo el desplazamiento en la línea neutra) y el MOR (según norma JAS para fabricación de madera laminada). El esquema del ensayo de flexión estática en 4 puntos se puede observar en la Figura N°8. La distancia entre los apoyos inferiores (L_0) fue de 2700 milímetros, mientras que la distancia entre los puntos de aplicación de la carga (L_1) fue de 600 milímetros.

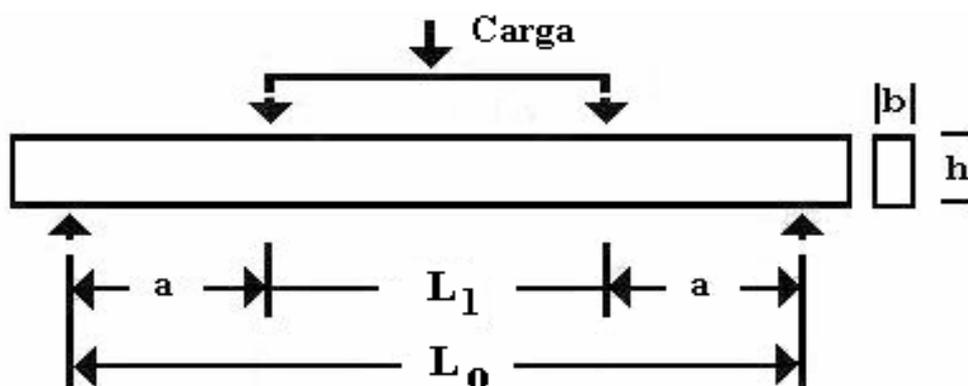


Figura N°8: Esquema del ensayo de flexión estática para determinación de MOE y MOR.

La ecuación utilizada para la determinación del MOE fue la siguiente:

$$MOE_{4P} = \frac{\Delta P \cdot \frac{(L_0 - L_1)}{2} \cdot (2 \cdot L_0^2 + 2 \cdot L_0 \cdot L_1 - L_1^2)}{48 \cdot I \cdot \Delta y}$$

Dónde:

- ΔP : Diferencia entre las cargas en los extremos de la zona proporcional.
- L_0 : Distancia entre apoyos inferiores (span)
- L_1 : Distancia entre apoyos superiores de carga
- I : Momento de inercia
- Δy : Diferencia entre las flechas de la probeta en extremos de zona proporcional.

Por su parte, el momento de inercia de una sección rectangular es:

$$I = \frac{b \cdot h^3}{12}$$

- I : Momento de inercia
- b : Ancho de la tabla
- h : Altura de la tabla

Finalmente, la ecuación utilizada para la determinación del módulo de rotura fue:

$$MOR_{4P} = \frac{3 \cdot P \cdot (l - a)}{2 \cdot b \cdot h^2}$$

Dónde:

- P : Carga máxima
- l : Distancia entre apoyos inferiores (span)
- a : Distancia desde el apoyo inferior al punto de carga superior más próximo
- b : Ancho de la tabla
- h : Altura de la tabla

2.12. ENSAYOS DE EVALUACIÓN DE LA UNIÓN ENCOLADA DE LAS VIGAS.

2.12.1. Ensayo de esfuerzo cortante sobre línea de encolado.

De cada una de las vigas ensayadas, se cortaron dos probetas como las que se observan en la Figura N°9 y la Figura N°10. Cada probeta presentaba dos partes, y cada parte dos secciones encoladas de 625 mm² (25 x 25 mm). Por lo tanto, para cada especie se confeccionaron 8 probetas, o sea se ensayaron 32 secciones encoladas.

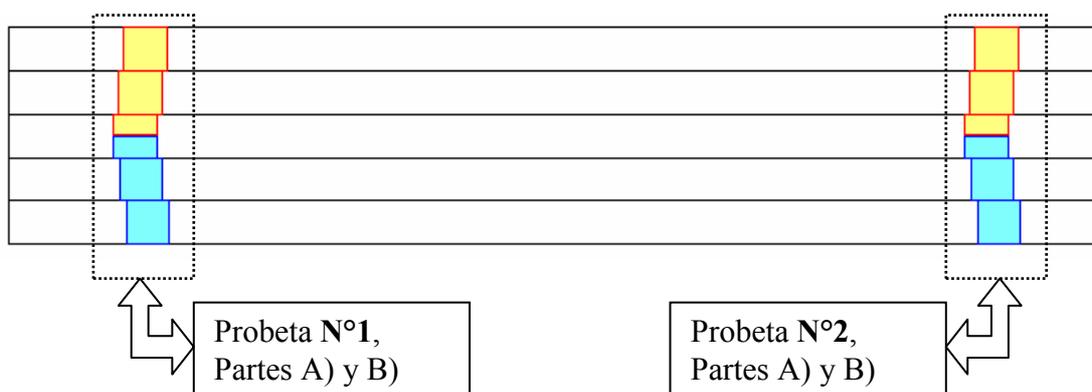


Figura N°9: Extracción de probetas para ensayo de esfuerzo cortante.

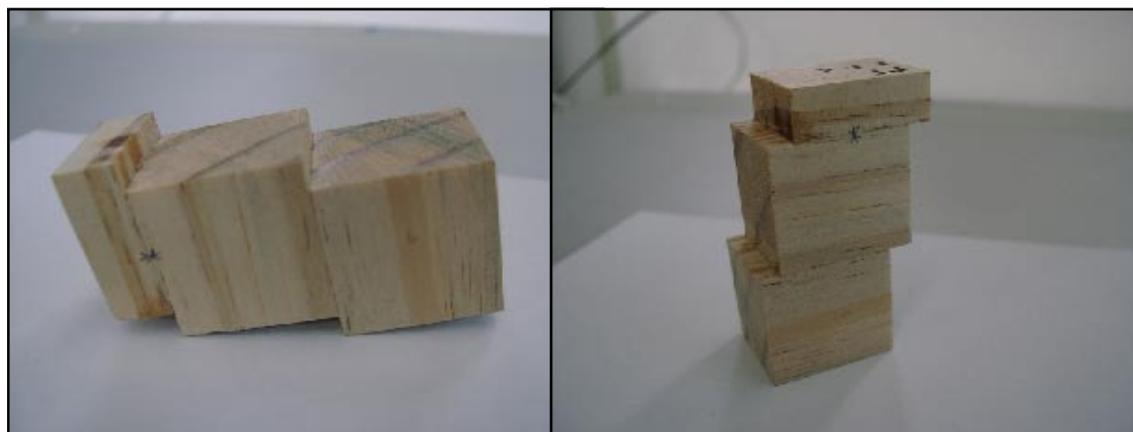


Figura N°10: Probetas para ensayo de esfuerzo cortante.

Una vez que se cortaron las probetas, se realizó el ensayo en la máquina Universal siguiendo las norma JAS para fabricación de madera laminada. En la Figura N°11, se observa el esquema del ensayo de esfuerzo cortante donde la probeta se fija firmemente mediante dos platinas, y se ejerce la carga a una velocidad constante de 2 mm/minuto. El accesorio utilizado para dicho ensayo se observa en la Figura N°12.

Se calculó el Esfuerzo Unitario Máximo (EUM) de cada sección encolada aplicando la siguiente fórmula:

$$\text{EUM} = \frac{P}{S}$$

Dónde:

P= carga máxima soportada por la probeta.

S= superficie de la sección encolada

Una vez finalizado este ensayo, se estimó visualmente el porcentaje de rotura de madera de cada una de las secciones ensayadas. Este porcentaje nos indica qué tan resistente era la unión encolada. O sea, a mayor porcentaje de rotura de madera, más resistente resulta ser la unión encolada.

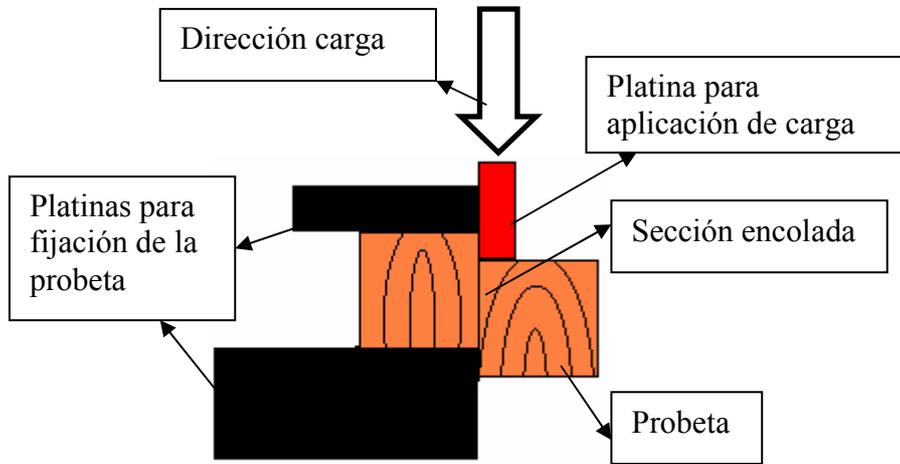


Figura N°11: Esquema del ensayo de esfuerzo cortante.



Figura N°12: Accesorio para ensayo de esfuerzo cortante.

2.12.2. Ensayos de delaminación.

Se llevaron a cabo dos ensayos de delaminación diferentes (uno en agua fría y otro en agua caliente) siguiendo las normas japonesas JAS para fabricación de maderas laminadas. Para estos ensayos se cortaron probetas cuyas secciones eran igual a la sección de las vigas (140 x 100 mm) y una altura de 75 mm.

Estos ensayos fueron:

A) Se sumergieron las probetas en agua fría (20 °C) durante 24 horas y posteriormente se colocaron en estufa a 70°C durante otras 24 horas.

B) Se sumergieron las probetas 4 horas en agua caliente a 100 °C y luego 24 horas en estufa a 70°C.

Luego del tratamiento de delaminación, se mide la longitud de delaminación y esta se expresa como porcentaje del largo total de la línea de cola en la sección transversal de la viga. Según las normas, una viga laminada se acepta para uso estructural, cuando luego de los ensayos, la delaminación en la línea de cola en ambas caras de la probeta es menor a 1/3 del largo total de dicha línea.



Figura N°13: Ensayo de delaminación. Baño en agua caliente y estufa

3. RESULTADOS.

3.1. MOE DE LÁMINAS Y MOE DE VIGAS.

3.1.1. Comparación entre el MOE de láminas y el MOE teórico de vigas.

Como se dijo anteriormente, el cálculo teórico de MOE, toma en cuenta el MOE de cada lámina y su ubicación dentro de la viga. Por lo tanto, el valor obtenido no es un promedio de las 5 láminas que componen la viga, sino que dependiendo de la ubicación de la lámina y su valor de MOE se obtiene un valor para la viga. En la Figura N°14, se toma como ejemplo una de las vigas de *Eucalyptus grandis*. Se pueden observar los valores de MOE de cada lámina, el valor de MOE promedio de dichas láminas y el valor de MOE teórico obtenido para la viga. Este último valor es 1222 MPa superior al valor promedio de las 5 láminas (9,5 % mayor).

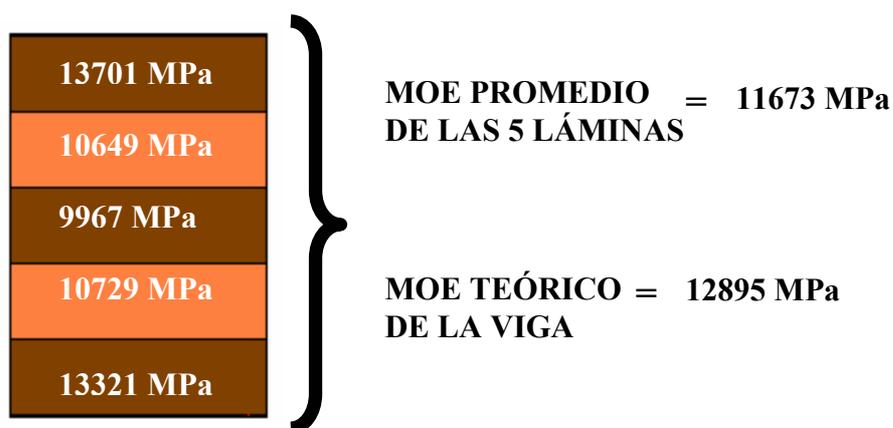


Figura N°14: Comparación entre el MOE teórico calculado para la viga y el MOE promedio de las láminas que la constituyen.

3.1.2. Comparación entre el MOE de vigas obtenido por diferentes métodos.

En las Tablas N°1, N°2 y N°3, se pueden ver los valores de MOE promedio por especie de los distintos métodos utilizados. El resultado del MOE teórico fue superior a los otros métodos en las tres especies estudiadas, encontrándose una diferencia promedio de aproximadamente un 5,6%. Por otra parte, las vigas de *Eucalyptus grandis* presentaron valores de MOE superiores a las vigas de *P. elliottii* y *P. taeda* en todos los métodos utilizados. A su vez, el MOE de las vigas de *Pinus taeda* fue superior a las de *Pinus elliottii*.

Tabla N°1: MOE de vigas de *Eucalyptus grandis*.

MOE (MPa)		
TEÓRICO	Vibración Longitudinal (FFT Analyzer)	MÁQUINA UNIVERSAL
12835	12274	12061

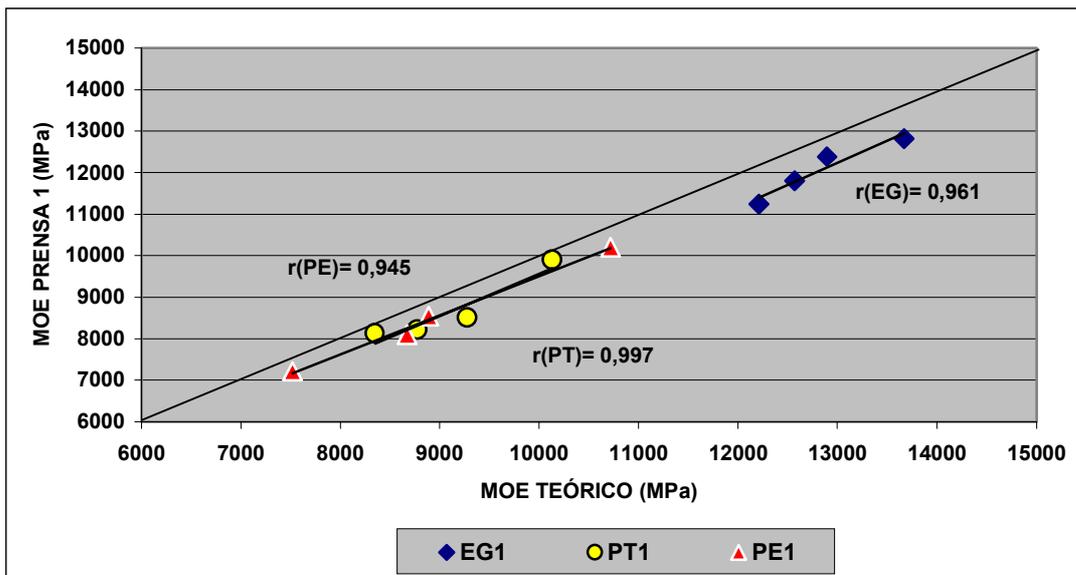
Tabla N°2: MOE de vigas de *Pinus taeda*.

MOE (MPa)		
TEÓRICO	Vibración Longitudinal (FFT Analyzer)	MÁQUINA UNIVERSAL
9133	8843	8680

Tabla N°3: MOE de vigas de *Pinus elliottii*.

MOE (MPa)		
TEÓRICO	Vibración Longitudinal (FFT Analyzer)	MÁQUINA UNIVERSAL
8952	8257	8510

En la Gráfica N°1, se observa la correlación entre el MOE obtenido con la Máquina Universal (flexión estática) y el MOE teórico. Se observan coeficientes de correlación altos y positivos para las tres especies estudiadas. A su vez, se ve que las vigas de *Eucalyptus grandis* presentaron valores superiores a las vigas de las dos especies de pinos estudiadas.



Gráfica N°1: Correlación entre el MOE calculado en la Máquina Universal y el MOE Teórico para las tres especies.

3.2. MÓDULO DE ROTURA DE LAS VIGAS LAMINADAS.

Como se dijo anteriormente, una vez que se realizaron todos los ensayos no destructivos para la medición del MOE, se ensayó la resistencia máxima a la flexión estática (MOR) en la máquina universal (en este ensayo también se midió el MOE). En la Tabla N°4, se observan los valores promedio de MOR de las vigas para las tres especies estudiadas, y se comparan con valores de MOR de madera sólida de las mismas especies y de la misma procedencia. Para las tres especies, los valores obtenidos en las vigas laminadas fueron superiores a los obtenidos en madera sólida. La mayor diferencia se encontró en *Eucalyptus grandis*, siendo esta de 11 MPa (aproximadamente un 17% superior). En algunas de las vigas de pinos, se observaron fallas por delaminación (ver Figura N°15) que provocaron una disminución de la resistencia de estas vigas.

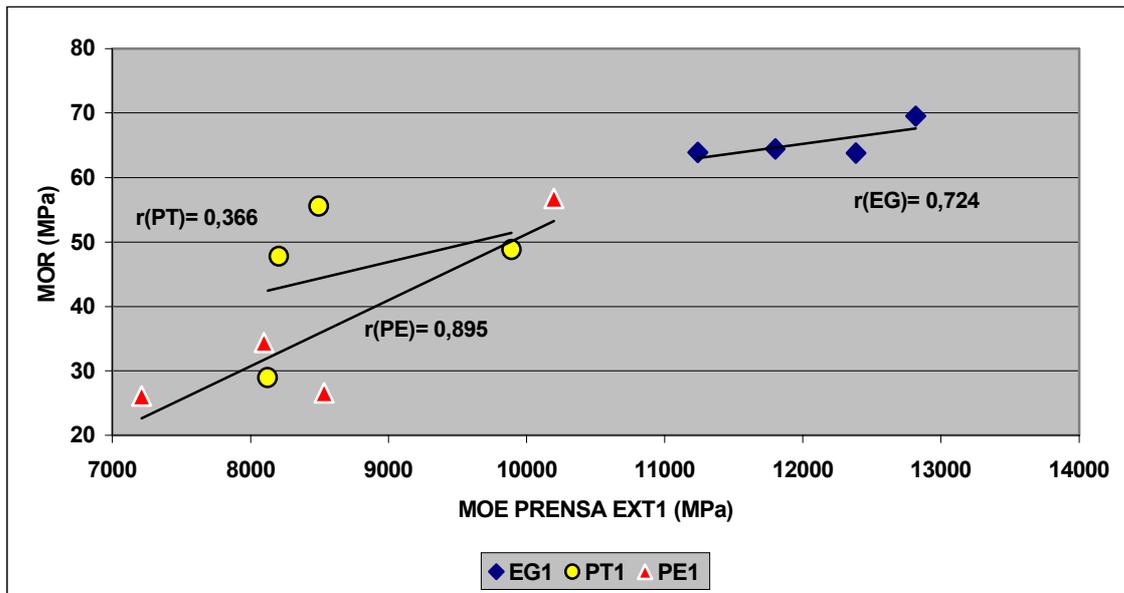
Tabla N°4: Comparación del MOR de vigas laminadas y de madera sólida.

	MOR (MPa)	MOR (MPa)
	VIGAS LAMINADAS	MADERA SÓLIDA
<i>Eucalyptus grandis</i>	65	54
<i>Pinus taeda</i>	45	35
<i>Pinus elliottii</i>	36	33



Figura N°15: Falla por delaminación en *Pinus taeda* provocada durante el ensayo de flexión estática.

En la Gráfica N°2, se muestra la correlación encontrada entre el módulo de rotura y el módulo de elasticidad. Se observan coeficientes de correlación altos y positivos en *Eucalyptus grandis* y en *Pinus elliottii*. En *Pinus taeda*, el coeficiente fue inferior a los dos anteriores. Esto es debido a que en dos de las cuatro vigas, las fallas por delaminación fueron muy importantes.



Gráfica N°2: Correlación entre el MOE calculado en la Máquina Universal y el MOR para las tres especies estudiadas.

3.3. ENSAYOS DE EVALUACIÓN DE LA UNIÓN ENCOLADA.

3.3.1. Ensayo de esfuerzo cortante sobre línea de encolado.

Como se dijo anteriormente, se cortaron 8 probetas por especie. Cada probeta presentaba dos partes y cada parte 2 secciones encoladas. Por lo tanto se ensayaron 32 secciones encoladas por especie.

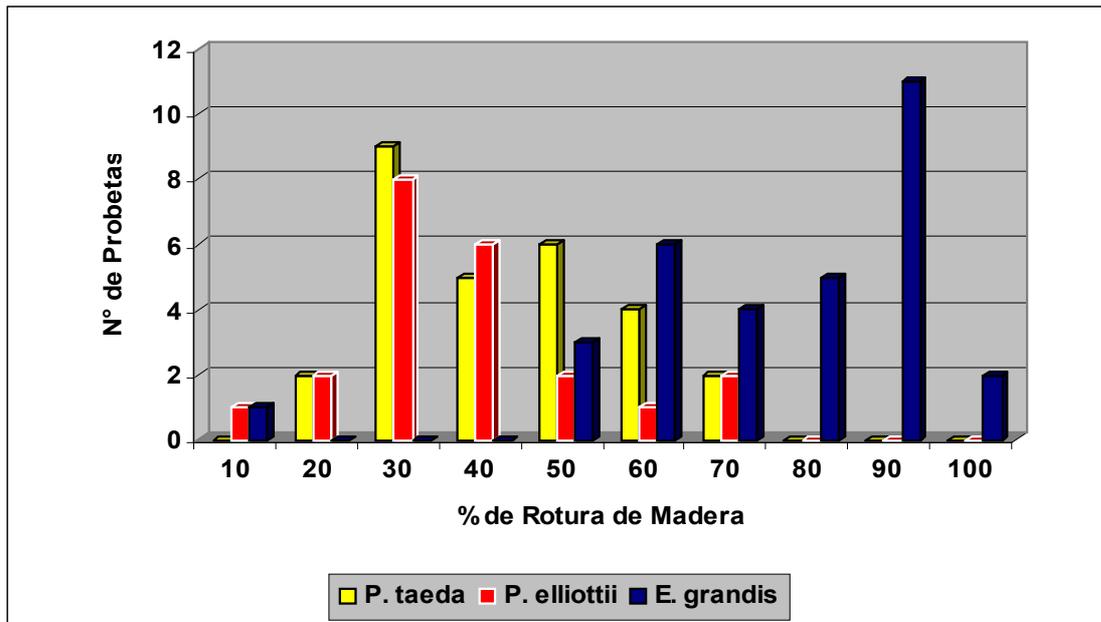
Los resultados de este ensayo, se pueden observar en la Tabla N°5, donde el Esfuerzo Unitario Máximo (EUM) resultó ser superior para *Eucalyptus grandis*. Lo mismo ocurrió con el porcentaje de rotura de madera.

Tabla N°5: Resultados del ensayo de esfuerzo cortante.

	EUM (MPa)	Rotura de Madera (%)
<i>Eucalyptus grandis</i>	8,3	75
<i>Pinus taeda</i>	5,7	38
<i>Pinus elliottii</i>	6,6	43

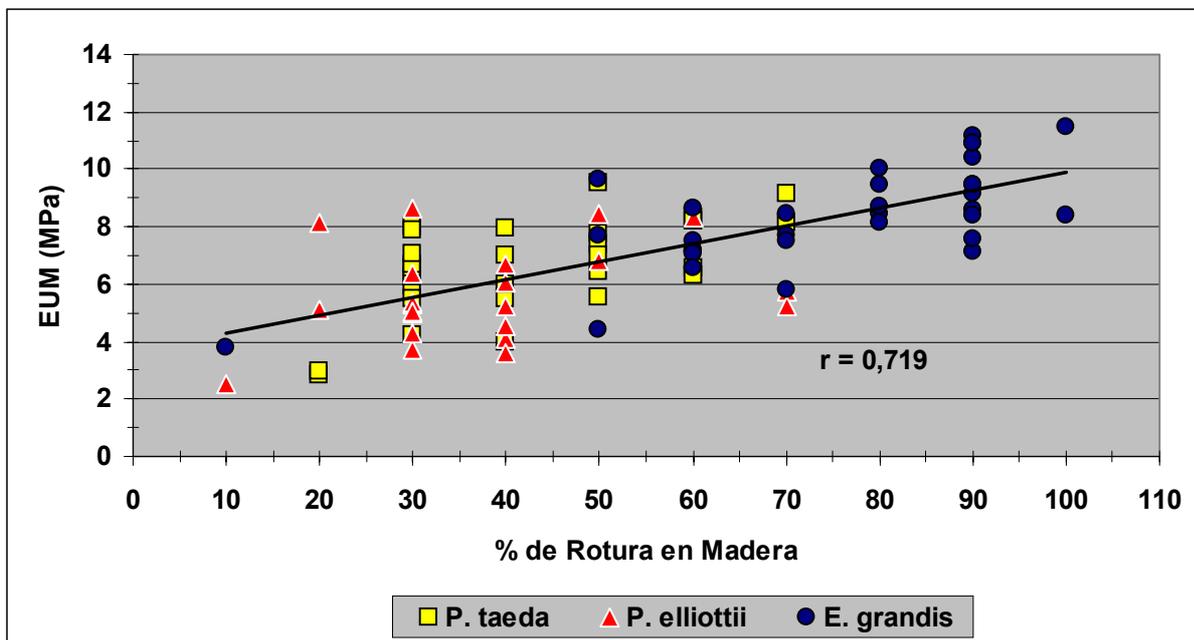
Observando estos resultados, se podría decir que el adhesivo utilizado no es el mas recomendable para ser utilizado en pinos. Seguramente por esto es que se obtuvieron resultados tan bajos tanto para el *Pinus taeda* como para el *Pinus elliottii*.

En la Gráfica N°3, se observa el número de probetas encontradas para los diferentes valores de porcentaje de rotura de madera. En *E. grandis* un número importante de probetas (11) presentaron un 90% de rotura de madera, lo que implica un muy buen comportamiento del adhesivo en esta especie. Para las dos especies de pinos, el mayor número de probetas presentó un 30% de rotura.



Gráfica N°3: Número de probetas para diferentes porcentajes de rotura de madera en ensayo de esfuerzo cortante.

Por otra parte, en la Gráfica N°4, vemos la correlación encontrada entre el porcentaje de rotura de madera y el EUM. El coeficiente de correlación encontrado es alto y positivo, siendo el EUM de *E. grandis* superior (en el mayor de los casos) que los de las dos especies de pinos.



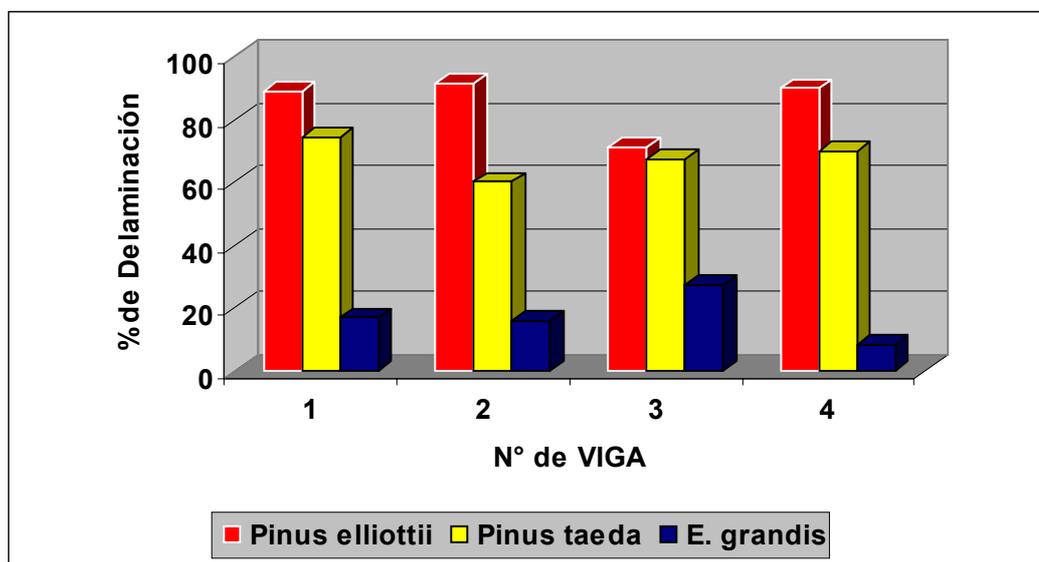
Gráfica N°4: Correlación entre % de rotura de madera y EUM en ensayo de esfuerzo cortante.

3.3.2. Ensayos de delaminación.

Los resultados de los ensayos de delaminación demostraron nuevamente una importante diferencia entre las vigas de *E. grandis* y la de las otras dos especies de pinos. Dicha diferencia se observa tanto en la Tabla N°6 como en la Gráfica N°5.

Tabla N°6: Resultados del ensayo de delaminación con agua fría.

VIGA N°	Porcentaje de delaminación		
	<i>Pinus elliottii</i>	<i>Pinus taeda</i>	<i>Eucalyptus grandis</i>
1	89	74	17
2	92	60	16
3	71	67	27
4	90	70	9
PROMEDIO	85	68	17



Gráfica N°5: Porcentaje de delaminación para las tres especies.

Cabe aclarar, que los resultados que se muestran son del ensayo de delaminación con agua fría que es menos severo que el de agua caliente. Los porcentajes de delaminación con agua caliente fueron superiores a los de agua fría para las tres especies.

4. CONCLUSIONES.

- 1) Es de fundamental importancia en el proceso de fabricación de vigas laminadas, las condiciones físicas y químicas del adherente en el momento de realizar el encolado así como la correcta elección del adhesivo,.
- 2) Clasificando las láminas (por MOE) y haciendo una adecuada distribución de dichas láminas en la viga, podemos lograr un aumento de la resistencia de las vigas y un mejor aprovechamiento de materiales de baja resistencia.
- 3) El FFT Analyzer (vibración longitudinal y transversal) presentó alta correlación con el método de estimación del MOE por flexión. Esta validación es importante, en especial para vigas mayores a 4 metros, ya que la determinación con la máquina universal no lo permite y el método de la flexión con pesas es complejo y poco práctico.
- 4) En vigas sin problemas de delaminación, la correlación entre el MOE y el MOR es alta, lo que permite una buena estimación a partir del MOE de la resistencia de la viga.
- 5) El adhesivo utilizado, puede no ser adecuado para *Pinus taeda* y *Pinus elliottii*. En las vigas de estas dos especies se observaron fallas de delaminación en el ensayo de flexión, bajo porcentaje de rotura de madera en el ensayo de esfuerzo cortante y altos porcentajes de delaminación.
- 6) Para las 3 especies ensayadas se deberá continuar investigando la influencia de distintos adhesivos, cantidad de adhesivo aplicada y distintas cargas en el prensado sobre las propiedades mecánicas de las vigas laminadas.

5. BIBLIOGRAFÍA.

1. AGRICULTURE HANDBOOK 72; *Wood Handbook*, Wood as an engineering material, USDA, 1999.
2. ANNUAL BOOK OF ASTM STANDARDS 2000. Volume 04-10, Wood. American Society for Testing and Materials, 2000: 708 p.
3. BERMUDEZ ALVITE, J.; TOUZA VÁZQUEZ, M.; SANZ INFANTE, F. / Manual de la madera de eucalipto blanco, 140p.
4. CORONEL, E./ Fundamentos de las propiedades físicas y mecánicas de las maderas, Universidad Nacional de Santiago del Estero, 1994: 187 p.
5. KOLLMANN, F.; COTÉ, W. / Principles of Wood Science and Technology. State University of New York, 1968: 299-311.
6. KOMATSU, K. / Strength characteristics of sugi wood as a structural material. Proceedings of the symposium for promoting sugi wood as a structural material. *Timber Research Group Meeting*, Japan Wood Research Society, 1998: 9-20.
7. MANUAL DE ADHESIVOS AIDIMA; Instituto Tecnológico del Mueble y Afines.
8. MANUFACTURING STANDARD FOR STRUCTURAL GLUED LAMINATED TIMBER, Japanese Agricultural Standard (JAS), 2000.
9. NAKAI, T.; TANAKA, T. / Non-destructive test by frequency of full-size timber for grading, *Building Research and Practice*. 1989, 17 (1).
10. NAGAO, H.; NAKAI, T.; TANAKA, T. / Non destructive evaluation of bending and tensile strength by longitudinal and transverse vibration of lumber, *Eighth International Nondestructive Testing of Wood Symposium, Proceedings*, Washington State Univ. and USDA Forest Products Lab., 1991: 23-25.
11. PÉREZ del CASTILLO, A. / Propiedades Mecánicas y Calidad de Madera de *Eucalyptus grandis* del Norte de Uruguay; Informe de Investigación N°4, LATU-JICA, 2001: 35p.
12. STRUCTURAL SOFTWOOD LUMBER. Japanese Agricultural Standard; 1991.
13. PÉREZ FAVARO, A.; DE CASTRO, R.; OHTA, S./ Ensayos de propiedades mecánicas de *Pinus taeda* por seis métodos no destructivos, Informe de Investigación N°1, LATU-JICA LATU, 2000: 24 p.
14. REVISTA DE LA SOCIEDAD DE PRODUCTORES FORESTALES, “Los adhesivos en la madera”; Marzo 1999
15. TUSET, R.; DURÁN, F./ Manual de maderas comerciales, equipos y procesos de utilización, 1986. Editorial hemisferio Sur. 688 p.
16. URUGUAY. ALTERNATIVAS PARA LA TRANSFORMACIÓN INDUSTRIAL DEL RECURSO FORESTAL; Unidad de desarrollo sostenible y medio ambiente, Secretaría General de la Organización de los Estados Americanos, 1996, 168 p.