



**UNIVERSIDAD DE CHILE**  
**FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES**  
**ESCUELA DE CIENCIAS FORESTALES**

**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE LA MADERA**

---

**VALIDACIÓN DE LA TEORÍA DE VIGAS LAMINADAS COMO  
ESTIMADOR DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD EN FLEXIÓN DE  
VIGAS COMPUESTAS A BASE DE MADERA**

Memoria para optar al Título  
Profesional de Ingeniero de la Madera

**BERNARDO OSCAR ARCOS TRONCOSO**

Prof. Guía: Sr. Alejandro M. Bozo González. Ingeniero Forestal, Universidad de  
Chile

M.Sc. en Ciencias y Tecnologías de la Madera, Universidad de Chile  
Ph.D Civil Engineering, WSU

---

**Santiago, Chile**

**2009**

**UNIVERSIDAD DE CHILE**  
**FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES**  
**ESCUELA DE CIENCIAS FORESTALES**  
**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE LA MADERA**

**VALIDACIÓN DE LA TEORÍA DE VIGAS LAMINADAS COMO  
ESTIMADOR DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD EN FLEXIÓN DE  
VIGAS COMPUESTAS A BASE DE MADERA**

Memoria para optar al Título  
Profesional de Ingeniero de la Madera

**BERNARDO OSCAR ARCOS TRONCOSO**

Calificaciones:	Nota	Firma
Prof. Guía Sr. Alejandro M. Bozo González	.....	.....
Prof. Consejero Sr. José Tomás Karsulovic Carrasco	.....	.....
Prof. Consejera Sra. Rose Marie Garay Moena	.....	.....

*A mis Padres,  
Bernardo y Monserrat.  
A mis Hermanos  
Carolina y Francisco.*

## **AGRADECIMIENTOS**

Deseo dar mis más sinceros agradecimientos a:

Señor Profesor Guía, Señor Alejandro M. Bozo González, Ph. D., por su inconmensurable ayuda y apoyo para la realización de este trabajo de memoria.

Señores Profesores Consejeros, Señora Rose Marie Garay Moena y Señor José Tomás Karsulovic Carrasco, por sus observaciones, consejos y correcciones.

Señor Profesor Sergio Mora O., por sus observaciones y correcciones de los experimentos estadísticos.

Señores funcionarios del Centro Tecnológico de la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad de Chile, Señores Patricio Vergara y Luis Espina, por su incondicional apoyo y asistencia en la preparación de materias primas, elaboración y terminaciones de las vigas compuestas.

Señorita Valeria P. Moraga Vargas.

Señores Ignacio Pérez y Eduardo Mondaca.

## RESUMEN

El propósito de este trabajo de memoria de título es determinar la factibilidad de estimar el módulo de elasticidad en flexión de vigas ( $MOE_V$ ) compuestas a base de madera, mediante la aplicación de un modelo de teoría de vigas laminadas (TVL), basándose en el módulo de elasticidad en flexión de los elementos constituyentes de las citadas vigas compuestas ( $MOE_I$ ).

El objetivo principal de este trabajo es validar la TVL como estimador del  $MOE_V$  de vigas compuestas. Los objetivos específicos son analizar los resultados obtenidos del  $MOE_V$  de vigas laminadas y vigas I, obtenidos en forma experimental y mediante la utilización de la TVL, y analizar el  $MOE_V$  obtenido empíricamente de vigas laminadas y vigas I, respecto al  $MOE_V$  de vigas de madera sólida de pino radiata (*pinus radiata D. Don*) de escuadría equivalente.

Para aplicar la TVL, se evaluó el modulo de elasticidad en flexión de cada uno de las piezas o elementos constituyente de las vigas ( $MOE_I$ ), estimándose posteriormente el modulo de elasticidad en tracción (E) para cada elemento de viga. Una vez obtenido E, se aplica la TVL.

Con los elementos ya evaluados, se construyeron las vigas compuestas, obteniéndose empíricamente el  $MOE_V$ . A partir de los resultados obtenidos en forma práctica y mediante la TVL, mediante esta modelación se observó un valor promedio de 10.180 MPa y 7.216 MPa, para vigas laminadas y vigas I, respectivamente, mientras que en el ensayo de flexión, los valores promedios observados son de 5.722 MPa y 5.354 MPa, respectivamente. El  $MOE_V$  promedio observado para las vigas de madera solida fue de 5.045 MPa.

Se concluye que el modelo de TVL aplicado en este estudio tiende a sobreestimar el  $MOE_V$ , probablemente debido a que por restricciones de equipo, no fue factible aplicar una relación luz de ensayo/espesor de la pieza en análisis semejante entre los ensayos de flexión para determinar el  $MOE_I$  y  $MOE_V$ . Respecto a la obtención empírica de  $MOE_V$ , se puede concluir que las vigas compuestas presentan en promedio un  $MOE_V$  superior respecto a las vigas solidas de madera de escuadría equivalente.

Palabras Clave:

Teoría de vigas laminadas; viga laminada; viga I; vigas compuestas a base de madera; modulo de elasticidad en flexión;

## SUMMARY

The purpose of this study is to resolve the factibility of estimate the elasticity module in flexion of wood composite beams ( $MOE_v$ ) by the application of a theoric model of glue lam beam theory (TVL), using elasticity module to support the constituent elements of wood composite beams ( $MOE_l$ ).

The main objective of this study is to validate TVL as a predictor of  $MOE_v$  of wood composite beams. The specific objectives is to analyze the results originate by  $MOE_v$  of wood composite beams and wood I joist, obtained in experimental way by using the TVL and analyze the  $MOE_v$  obtained in the laboratory of glue lam and wood I joist, with regards to the  $MOE_v$  of beams of radiate pine (*pinus radiata* D. Don) with similar cross section.

To apply the TVL is necessary to evaluate the elasticity module in flexion of every piece or constituents elements of the beams  $MOE_l$ , and then, is possible to estimate the elasticity module in tension (E) for each element of the beam. Once we obtained E, we apply the TVL.

Once the elements have been evaluate, the wood composite beams are construct and later it is obtained the  $MOE_v$ , through laboratory test. So, it is possible to compare the results obtained in the laboratory and the results obtained using the TVL of  $MOE_v$ ; using the TVL the average value is 10.180 MPa and 7.216 MPa for gluelam and wood I joist, however, in the test results the average value is 5.722 MPa and 5.354 MPa. The  $MOE_v$  average observed for solid wood beams is 5.045.

In conclusion, it can be determinate that the model of TVL apply to this study it does over estimate in a proper way the  $MOE_v$ , probably because equipments restrictions was not possible apply similar relationship beteewn lenght of test/wide of speciment on bending test for  $MOE_l$  and  $MOE_v$ . About experimental results obtained for  $MOE_v$ , we can conclude wood composite beams shows an average  $MOE_v$  higher than solid wood beams.

Key words

Gluelam beam theory; glue lam; wood I joist; wood composite beams; elasticity module in flexion.

# INDICE DE CONTENIDOS

Contenidos	Página
<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	1
1.1. Material compuesto y material compuesto a base de madera	1
1.2. Vigas compuestas a base de madera	1
1.2.1 Vigas I	2
1.2.2 Vigas laminadas	3
1.3 Teoría de vigas laminadas	3
1.4 Objetivos	5
<b>2. MATERIALES Y MÉTODOS</b>	6
2.1 Materiales	6
2.2 Método	7
2.2.1 Determinación del $MOE_I$ de las piezas de madera constituyentes de las vigas compuestas.	7
2.2.2 Aplicación de la teoría de vigas laminadas	10
2.2.3 Elaboración de vigas	11
2.2.3.1 Elaboración de vigas laminadas	11
2.2.3.2 Elaboración de vigas I	16
2.2.4 Evaluación mecánica de las vigas	19
2.2.5 Diseños de experimentos estadísticos utilizados	20
2.2.5.1 Experimento estadístico de vigas I	21
2.2.5.2 Experimento estadístico de vigas laminadas	22
2.2.5.3. Experimento estadístico de vigas I, vigas laminadas y vigas testigo	22
<b>3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>	24
3.1 Resultados obtenidos de $MOE_V$ mediante la TVL	24
3.2 Resultados obtenidos de $MOE_V$ mediante ensayo de flexión.	24
3.3 Comparación de resultados	25
3.4 Resultados de experimentos estadísticos	27
3.4.1 Resultados del experimento estadístico de vigas I.	27
3.4.2 Resultados del experimento estadístico de vigas laminadas.	27
3.4.3 Resultados del experimento estadístico de vigas I, vigas laminadas y vigas testigo.	28
3.4.4 Aplicación del método de Scheffé	29
<b>4. CONCLUSIONES</b>	31
<b>5. BIBLIOGRAFIA</b>	32
Apéndice I: Dimensiones observadas para las láminas de madera que forman parte de las vigas laminadas	34
Apéndice II: Dimensiones observadas para las láminas de madera que forman parte de las vigas I.	37
Apéndice III: Cargas aplicadas, deformaciones, $MOE$ y $E$ observados en las láminas constituyentes de vigas laminadas.	38

Apéndice IV: Cargas aplicadas, deformaciones, MOE y E observados en las láminas constituyentes de vigas laminadas.	42
Apéndice V: Asignación de las piezas de madera que constituyen las vigas laminadas.	43
Apéndice VI: Asignación de las piezas de madera que constituyen las vigas I.	44
Apéndice VII: Cálculos y valores observados mediante la aplicación de la TVL, para vigas laminadas	45
Apéndice VIII: Cálculos y valores observados mediante la aplicación de la TVL, para vigas I.	51
Apéndice IX: MOE <sub>v</sub> registrados para las vigas en el ensayo de flexión	54
Apéndice X: Datos de origen del experimento estadístico de vigas I	56
Apéndice XI: Datos de origen del experimento estadístico de vigas laminadas	57
Apéndice XII: Datos de origen del experimento estadístico de vigas I, vigas laminadas y vigas solidas de madera de pino radiata.	58
Apéndice XIII: Prueba de Scheffé aplicada al ensayo de flexión.	59
Anexo I: Especificaciones técnicas adhesivo resorcinol formaldehido utilizado en este estudio	62



## INDICE DE CUADROS Y FIGURAS

<b>Cuadros</b>	<b>Página</b>
Cuadro 1: Valor promedio calculado para $E$ de los elementos constituyentes de las vigas compuestas	10
Cuadro 2: Valores promedios, desviación estándar y coeficiente de variación para $MOE_V$ obtenido mediante TVL para vigas laminadas y vigas I.	24
Cuadro 3: Valores promedios, desviación estándar y coeficiente de variación para $MOE_V$ obtenido mediante ensayo mecánico para vigas laminadas, vigas I y vigas testigo.	25
Cuadro 4: Comparación de resultados de $MOE_V$	25
Cuadro 5: Análisis de varianza (ANDEVA) para el experimento de vigas I	27
Cuadro 6: Análisis de varianza (ANDEVA) para el experimento de vigas laminadas	28
Cuadro 7: Análisis de varianza (ANDEVA) para el experimento de vigas I, vigas laminadas y vigas testigo.	29

<b>Figuras</b>	<b>Página</b>
Figura 1: Secciones transversales de vigas I	2
Figura 2: Esquema del mecanismo de ensayo en flexión	8
Figura 3: Encolado de una lámina de madera de pino radiata, para la obtención de una viga laminada	12
Figura 4: Disposición de una viga de madera laminada encolada en la línea de prensado	13
Figura 5: Afloramiento de adhesivo de una línea de cola	14
Figura 6: Cepillado de las líneas de cola de una viga laminada	15
Figura 7: Viga laminada terminada	15
Figura 8: Alas de una viga I	17
Figura 9: Viga I durante proceso de prensado	18
Figura 10: Viga I terminada	19
Figura 11: Disposición de una viga laminada para el ensayo de determinación de $MOE_V$	20

# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1. Material compuesto y material compuesto a base de madera

En general, se entiende como material compuesto a la combinación macroscópica de dos o más materiales, obteniéndose a partir de esta unión un tercer material. (Jones, 1998)

La ventaja del uso de materiales compuestos, es que, diseñados adecuadamente, usualmente conservan las mejores propiedades de sus componentes o constituyentes originales, y en ocasiones, exhiben propiedades que sus constituyentes no poseen en forma separada. Algunas de las propiedades que pueden ser mejoradas o incrementadas son, resistencia mecánica, rigidez, resistencia a la corrosión, resistencia a la intemperización, peso, aislación térmica, aislación acústica, vida útil, entre otras propiedades o características (Jones, 1998).

Los materiales compuestos a base de madera son una familia de materiales que tienen a la madera como constituyente principal, pudiéndose presentar la madera como tal, o bien en otras formas derivadas de ella, como madera aserrada, chapas, hojuelas, astillas, partículas, aserrín, conglomerados de fibras, fibras individuales, entre otras formas. La unión de la madera y/o sus formas derivadas se obtiene mediante la adición de sustancias adhesivas, pudiendo estas ser de origen natural o sintético. (Bodig y Jayne, 1993)

## 1.2. Vigas compuestas a base de madera

Las vigas compuestas a base de madera, como las vigas laminadas, tienen un gran uso en la ingeniería de estructuras. Esto se debe principalmente al cumplimiento simultáneo de dos grandes objetivos:

- Se maximiza el desempeño de los elementos estructurales
- Se reduce el uso de material y costos. (Bodig y Jayne, 1993)

Bodig y Jayne (1993) señalan que existen varios tipos de laminados, como el caso de vigas laminadas horizontales y vigas laminadas verticales, contrachapados, entre otros. También existen otros tipos de compuestos a base de madera, que tienen distinta

distribución de sus componentes o están constituidos por componentes de distinta naturaleza, que también son tratados como laminados y sujetos a métodos de diseño y análisis similares.

### 1.2.1 Vigas I

Se entiende como viga I (I-Joist) a un compuesto a base de madera de grado estructural, que es manufacturado con un par de piezas de madera aserrada u otro compuesto a base de madera de grado estructural, llamadas alas y una pieza central, denominada alma, que suele ser de tablero a base de madera de grado estructural u otro, los cuales son unidos mediante un adhesivo de uso exterior. Este conjunto de elementos a base de madera, al ser adheridos, tiene una geometría constante con forma de letra “I”. (Falk et al, 1990) ; (Leichti et al, 1990). En la figura 1 se pueden apreciar secciones transversales de vigas I.

Figura 1: Secciones transversales de vigas I



Fuente: Leichti et al, 1990

Las vigas I han sido producidas en forma masiva en Estados Unidos a partir de la década de 1960, siendo estas vigas un componente fundamental de sistemas constructivos de viviendas, tanto para estructura de piso, entrepiso y techo (Leichti et al 1990); (American Forest and Paper Association, 1999).

Los adhesivos utilizados en la industria de las vigas I deben ser de uso estructural, por este motivo es común el uso de fenol formaldehído y resorcinol formaldehído, como también son utilizados en ocasiones adhesivos melamínicos (Leichti et al, 1990)

### **1.2.2 Vigas laminadas**

Según la norma chilena NCh 2148 Of89, se entiende como madera laminada encolada estructural al producto que resulta de la unión, mediante adhesivo, de piezas de madera clasificadas estructuralmente a través de sus caras, extremos y cantos, para formar elementos no limitados en escuadría ni longitud, y en los que las fibras deben quedar longitudinalmente paralelas entre sí. El producto final puede ser un elemento recto o curvo, con geometría constante o variable.

Algunas características de las vigas laminadas son que, según la ubicación selectiva de las láminas de madera, es posible incrementar el módulo de elasticidad y el módulo de ruptura de ellas, y al mismo tiempo, reducir la variabilidad de estos parámetros. (Koch, 1972)

Las aplicaciones de las vigas laminadas comprenden vigas de sección transversal constante, vigas de sección transversal variable, arcos y marcos (Pérez, 1979), destacándose su uso en construcciones de grandes dimensiones, tales como instalaciones fabriles, supermercados, centros comerciales, casinos, pabellones de eventos, templos religiosos, centros recreativos, entre otros. Otra aplicación que tienen las vigas de madera laminada encolada corresponde a pequeños elementos estructurales de construcciones habitacionales, tales como vigas de piso, entrepiso y techumbre, peldaños de escala, balcones y construcciones en voladizos.

### **1.3 Teoría de vigas laminadas**

La teoría de vigas laminadas (TVL) es un modelo matemático el cual busca estimar en forma eficiente las propiedades mecánicas de un material compuesto, en función de las propiedades mecánicas de los materiales que lo constituyen, su disposición dentro de la viga y su geometría. Dentro de estas propiedades se puede considerar el módulo de elasticidad en flexión (MOE). Xu y Suchsland (1998) señalan que el MOE es una de las características más importantes a evaluar en los compuestos a base de madera.

Un ejemplo de esta teoría de vigas laminadas es el modelo propuesto por Timoshenko y Goodier (1970), donde el cálculo del módulo de elasticidad en flexión (MOE) está dado por la expresión (1).

$$\text{MOE}_V = \frac{D}{I} \quad (1)$$

$$D = \sum_{i=1}^n b_i E_z^i \left( t_i d_i^2 - \frac{t_i^3}{12} \right) \quad (2)$$

Donde:

$\text{MOE}_V$ : Módulo de elasticidad en flexión de la viga, MPa

D: Rigidez a la flexión de la viga,  $\text{mm}^4$  MPa

I: Momento de inercia de la viga,  $\text{mm}^4$

$t_i$ : Altura de las láminas, mm

$b_i$ : Base de las láminas, mm

$d_i$ : Distancia entre el eje neutro de la i-esima lámina y el eje neutro del laminado, mm

$E_z^i$ : Modulo de elasticidad en tracción de la i-esima lámina, en MPa

Este modelo matemático considera la utilización del módulo de elasticidad en tracción (E) de cada una de las láminas constituyentes de las vigas. Para obtener esto, se procede a calcular el E en función del  $\text{MOE}_1$  de cada una de las láminas, utilizando la expresión (3). (Bodig y Jayne, 1993)

$$\frac{\text{MOE}_1}{E} = \frac{\left(\frac{1}{h}\right)^2}{\left(\frac{1}{h}\right)^2 + C} \quad (3)$$

Donde:

$MOE_f$ : Módulo de elasticidad en flexión de la lámina, MPa

E: Módulo de elasticidad en tensión de la lámina, MPa

h: Altura de la lámina, mm

l: Luz de ensayo, mm

C: Coeficiente de corrección

El coeficiente de corrección C de la ecuación 3 depende del sistema de cargas al cual la lámina es sometida, por ejemplo, para una lámina simplemente apoyada y con carga central, C toma un valor igual a 19,20. (Bodig y Jayne,1993)

#### 1.4 Objetivos

El objetivo general de este estudio es validar la teoría de vigas laminadas como estimador del módulo de elasticidad en flexión de vigas compuestas a base de madera.

Para el logro del objetivo general, se establecieron los siguientes objetivos específicos:

- Analizar los resultados obtenidos del  $MOE_v$  de vigas laminadas y vigas I, obtenidos en forma experimental y mediante la utilización de la TVL.
- Analizar el  $MOE_v$  obtenido empíricamente de vigas laminadas y vigas I respecto al  $MOE_v$  de vigas sólidas de pino radiata (*Pinus radiata D. Don*) de escuadría equivalente.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1 Materiales

Se requirió de los siguientes materiales, equipos y herramientas para la construcción de las vigas compuestas a base de madera:

- 100 piezas de madera seca en cámara de pino radiata, cepillada a cuatro caras, de dimensiones aproximadas 65 mm. de ancho, 25 mm. de espesor y 3,2 m. de longitud. Estas piezas de madera se utilizaron para la construcción de vigas laminadas.
- 20 piezas de madera seca en cámara de pino radiata, cepillada a cuatro caras, de dimensiones aproximadas 65 mm. de ancho, espesor 65 mm. y 3,0 m. de longitud. Estas piezas de madera se utilizaron para la construcción de vigas I.
- 2 tableros de hojuelas orientadas (OSB) de dimensiones aproximadas 1,22 m. de ancho y 2,44 m. de largo y espesor aproximado a 9 mm. Estos tableros de hojuelas de madera se utilizaron para la construcción de vigas I.
- Adhesivo de fraguado en frío resorcinol formaldehído, marca comercial AERODUX – 185.
- Mecanismo de ensayo para determinación de MOE de las piezas de madera antes señaladas, según lo establecido en la norma chilena NCh 2150 Of89.

- Línea de prensado recto, de platos fríos, de fabricación propia.
- Llave de torque
- Balanza digital, de precisión 1g y capacidad máxima 12 Kg
- Cepilladora de un cabezal, 380 V y 4 HP de potencia.
- Sierra circular de banco, 380 V, 3 HP y diámetro de sierra 300 mm.
- Herramientas manuales de taller, tales como lijadora orbital, lijadora de banda manual, rodillo, tineta para rodillo, brocha, llave punta-corona, huincha de medir de precisión 1 mm., vernier, formón, martillo, entre otras herramientas menores.

## **2.2 Método**

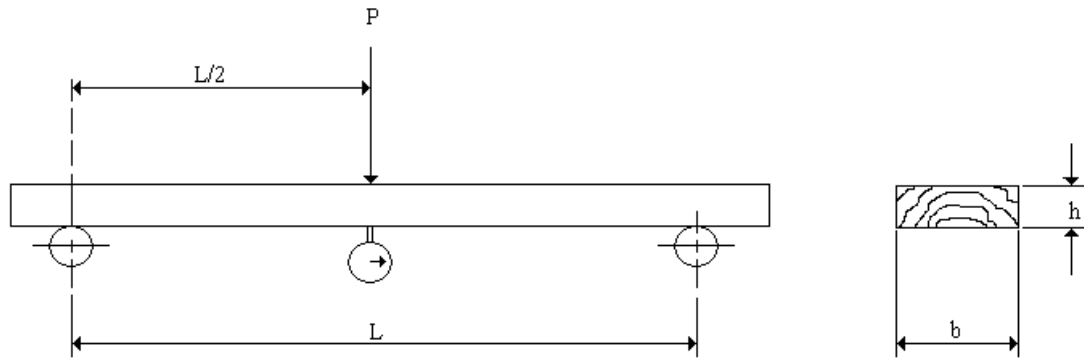
### **2.2.1 Determinación del $MOE_I$ de las piezas de madera constituyentes de las vigas compuestas.**

Para la determinación del  $MOE_I$  de las piezas de madera de pino radiata, primero se clasificaron, identificaron y separaron las 100 piezas para la construcción de las vigas laminadas y las 20 piezas para la obtención de las vigas I. Posteriormente se midieron todas las piezas de madera de pino radiata. Los valores obtenidos en su ancho, espesor y largo, fueron registrados en milímetros. El detalle de estos valores se encuentra en el apéndice I y II, para las láminas utilizadas en la elaboración de vigas laminadas y vigas I respectivamente.

Un esquema del mecanismo de ensayo en flexión utilizado en este estudio es el representado en la figura 2.

Figura 2: Esquema del mecanismo de ensayo en flexión





Donde:

L: Luz de ensayo, mm;

P: Cargas aplicadas, N;

h: Espesor o altura de la pieza en estudio, mm; y

b: Base de la pieza en estudio, mm.

Este mecanismo consta de tres componentes principales. El primero de ellos es el banco de apoyo, que como dice su nombre, es la parte donde se apoya cada pieza de madera en estudio. La segunda parte de este mecanismo son las cargas,  $P_1$  y  $P$ , donde  $P_1$  no debe exceder del 10% de la carga adicional  $P$  y donde la carga final  $P_2$  está dada por  $P_2 = P_1 + P$ . La tercera y última es un dispositivo capaz de medir las deformaciones. En este caso se utilizó para medir las deformaciones un reloj comparador, de precisión de 0,01 mm.

Cada pieza de madera utilizada en la construcción de vigas de madera laminada encolada, se disponen en el banco de apoyo, de tal forma que la razón luz de ensayo/altura de cada pieza, sea igual o mayor a 60 (NCh 2148.Of89). Para este ensayo, se utiliza una luz de ensayo de 2.600 mm. Primero se aplica una carga inicial  $P_1$  de 10,21 N, en el centro de la luz de la viga, registrándose la deformación  $\delta_1$  observada con el reloj comparador. Se agrega la carga adicional  $P$  de 0,99 N, teniéndose como carga final  $P_2$  11.20 N. y registrándose una deformación  $\delta_2$ , donde  $\delta = \delta_2 - \delta_1$ , siendo  $\delta$  equivalente a la deformación ocasionada por la carga adicional  $P$ . Este proceso se repite en la otra cara de la pieza de madera.

Para el caso de las piezas de madera de las vigas I, se desarrolla un procedimiento similar al antes descrito, diferenciándose solamente en que la luz de ensayo a utilizar es de 2.500

mm., y la carga inicial  $P_1$  aplicada es de 32,91 N, la carga adicional  $P$  aplicada es de 2,99 N, obteniéndose una carga final  $P_2$  de 35,90 N.

El  $MOE_1$  se calculó a partir de la expresión (4)

$$MOE_1 = \frac{L^3 P}{4bh^3 \delta} \quad (4)$$

donde:

$MOE_1$ : Módulo de elasticidad en flexión de la lámina, MPa

L: Luz de ensayo, mm

b: Ancho de la pieza, mm

h: Altura (espesor) de la pieza, mm

P: Carga adicional aplicada, N

$\delta$ : Deformación, mm.

Se calcularon dos valores para el  $MOE_1$ , uno para cada cara de la pieza, asignándose el menor valor para fines de análisis, y el resultado que se observó se encuentra detallado en el apéndice III para las láminas constituyentes de las vigas laminadas y en el apéndice IV para las láminas constituyentes de las vigas I.

La relación luz de ensayo/altura del elemento ( $l/h$ ) registradas para las láminas de las vigas laminadas fue de 134,05; mientras que para las alas de vigas I, la relación  $l/h$  fue de 60,55.

De manera análoga, se determinó el  $MOE_1$  de los tableros OSB utilizándose un mecanismo de ensayo en flexión, descrito en la figura 2.

Para este caso, se extrajeron completamente al azar cuatro probetas de cada tablero, obteniéndose en total ocho probetas, de dimensiones aproximadas a 9 mm por 24 mm por 1.200 mm, la luz de ensayo utilizada fue de 1.800 mm., la carga inicial  $P_1$  aplicada fue de 10,21 N, la carga adicional  $P$  aplicada fue de 0,99 N, observándose una carga final  $P_2$  de 11.20 N.

Estas ocho probetas se ensayaron a la flexión en el mismo sentido en que se dispusieron las almas en las vigas I.

Las ocho observaciones antes realizadas se promediaron, obteniéndose un valor de  $MOE_1$  de 3.873 MPa, con una relación  $l/h$  de 50,17

### 2.2.2 Aplicación de la teoría de vigas laminadas

Dado que TVL requiere el valor de  $E$  de cada pieza que constituye cada vigas laminadas y viga I, se procedió a la obtención de este valor mediante la expresión 3, a partir del  $MOE_1$  obtenido para cada pieza de madera en el subcapítulo 2.2.1 y para el valor promedio observado de  $MOE_1$  para las piezas de OSB detalladas en el subcapítulo 2.2.1.4. Una vez obtenidos los valores de  $MOE$  para cada pieza, se procedió a la obtención de  $E$ . Para esto se utiliza la expresión 3 del subcapítulo 1.3.

Los valores promedios observados de  $E$  para las piezas de madera que forman las vigas laminadas y las piezas de madera y OSB que forman las vigas I se detallan en el cuadro 1. Los valores calculados de  $E$  para cada pieza de madera de pino radiata, tanto para vigas laminadas y vigas I, se encuentran detallados en el apéndice III.

Cuadro 1: Valor promedio calculado para  $E$  de los elementos constituyentes de las vigas compuestas.

<b>Piezas</b>	<b>E promedio (Mpa)</b>
<b>Madera para vigas laminadas</b>	<b>8.821</b>
<b>Madera para vigas I</b>	<b>8.075</b>
<b>OSB</b>	<b>3.902</b>

Las piezas de madera de pino radiata que forman las vigas laminadas, una vez identificadas y evaluadas mecánicamente, se clasificaron en cinco subgrupos de 20 piezas cada uno, donde el criterio de selección utilizado fue la magnitud del  $MOE_1$  registrada en

ellas, donde el subgrupo uno es aquel que tiene las piezas de mayor  $MOE_1$ , seguido por el subgrupo dos, y así, de manera sucesiva se llega al quinto y último grupo, siendo éste el de menor  $MOE_1$  registrado. De estos cinco subgrupos, se eligieron completamente al azar para cada viga de madera laminada encolada, dos piezas de madera, asignándose las de mayor  $MOE_1$  en las caras de cada viga de madera laminada encolada, y progresivamente hacia el eje neutro de la misma, se dispusieron las piezas de menor  $MOE_1$ . Para las vigas I, se asignaron las piezas de madera de pino radiata en forma completamente aleatoria. El detalle de las piezas de madera de pino radiata asignadas para cada viga laminada y viga I se encuentra expresado en el apéndice V y VI, respectivamente.

Previo a la obtención del  $MOE_1$  de cada viga laminada y viga I, se calculó la rigidez a la flexión de cada viga. La rigidez a la flexión está dada por la expresión 2 (ver subcapítulo 1.3).

Se estimó el MOE para cada una de las vigas compuestas (viga laminada y viga I) mediante la teoría de vigas laminadas, utilizándose la expresión 1 (ver subcapítulo 1.3). Con los resultados obtenidos previamente, se procedió al cálculo del  $MOE_V$  para cada viga laminada y viga I.

Los cálculos y valores observados mediante la aplicación de la TVL, tanto para vigas laminadas como vigas I, se encuentra detallado en los apéndices VII y VIII, respectivamente.

### **2.2.3 Elaboración de vigas**

#### **2.2.3.1 Elaboración de vigas laminadas**

Se construyeron diez vigas laminadas, según lo estipulado en la norma ASTM D 5055 – 94a.

Todos los procesos que se describen a continuación, se desarrollaron conforme a lo establecido en la norma chilena NCh 2148.Of89.

- **Preparación de las piezas de madera a encolar**

Se inspeccionaron visualmente las piezas de madera de pino radiata que forman parte de las vigas laminadas, admitiéndose defectos, tales como acanaladuras y arqueaduras, siempre y cuando éstas puedan ser anuladas durante el proceso de prensado, como

también las caras de las piezas de madera, al momento de ser encoladas, deben estar cepilladas y libres de polvo, grasa, resina y en general, deben estar lo suficientemente limpias de cualquier sustancia que pueda interferir en el proceso de encolado.

Las piezas pueden tener arista faltante, siempre y cuando después del proceso de elaboración, este defecto sea eliminado, mediante cepillado u otra técnica.

Las piezas de madera de pino radiata que presentaron defectos mayores, que pudiesen haber disminuido la adherencia de los sustratos y/o haber interferido negativamente en el proceso de prensado de las vigas de madera laminada encolada, tales como nudos muertos y bolsillos de resina, fueron descartadas, reemplazándose por otras piezas de madera que no tuviesen defectos como los descritos previamente.

- **Preparación y aplicación del adhesivo**

El adhesivo utilizado en este ensayo fue resorcinol formaldehído. La resina o fase líquida es de color café rojizo, de nombre comercial AERODUX - 185 y el catalizador es en polvo, de color blanco e inoloro. Ambos productos fueron adquiridos en la empresa Adhepox. La resina y catalizador, se mezclaron en proporciones 5/1, respectivamente. El esparcido empleado es de aproximadamente  $450 \text{ g/m}^2$ , tiempo de ensamblado abierto es de aproximadamente 20 minutos y tiempo de prensado mínimo del adhesivo fue de 2,5 horas, según las recomendaciones entregadas por el proveedor del adhesivo.

La mezcla adhesiva se aplica de forma homogénea, utilizando brocha. El esparcido se realizó a una cara.

En la figura 3 se observa la aplicación de adhesivo en una lámina de madera que forma parte de una de las vigas laminadas de este estudio

Figura 3: Encolado de una lámina de madera de pino radiata, para la obtención de una viga laminada.



- **Prensado**

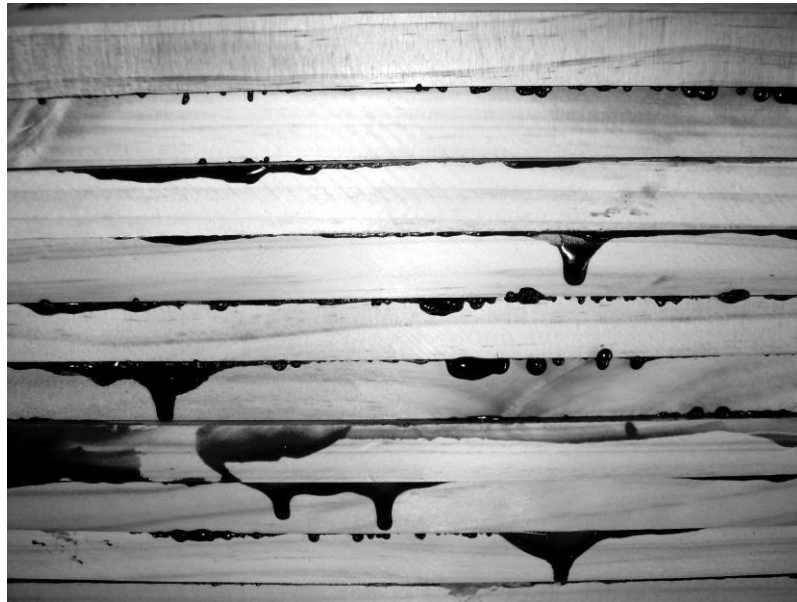
El prensado de las vigas laminadas se desarrolló en una línea de prensado recto, de platos fríos. La distancia entre los elementos de apriete es de 400 mm. a eje. El detalle de una viga laminada en la línea de prensado se muestra en la figura 4.

Figura 4: Disposición de una viga de madera laminada encolada en la línea de prensado



El apriete de los elementos de la línea de prensado comenzó desde el centro, progresando de manera continua hacia los extremos de la línea de prensado. Se verificó la presión de prensado utilizando una llave de torque, siendo la presión ejercida de  $8 \text{ Kg/cm}^2$ . Posterior al apriete, se realiza una verificación de la presión de prensado, aproximadamente 30 minutos después del primer apriete de la prensa. Posterior a la verificación de la presión de prensado, se procedió a la inspección de las líneas de cola de la viga laminada, observándose afloramiento de adhesivo en estas, indicando el íntimo contacto entre los sustratos y el adhesivo. El afloramiento de adhesivo antes detallado puede observarse en la figura 5.

Figura 5: Afloramiento de adhesivo de una línea de cola



Debido a que el tiempo de prensado mínimo del adhesivo es de 2,5 horas a temperatura de curado del adhesivo promedio de  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ , se optó por dejar en prensado las vigas laminadas por un periodo no inferior a 24 horas. Pasado este periodo, se retiran los elementos de presión de la línea de prensado, retirándose la viga laminada de ésta y comenzando el proceso de estabilización.

- **Maduración**

Las vigas laminadas se almacenaron bajo techo, en un lugar, seco, sin incidencia directa de luz solar, durante un periodo mínimo de siete días. El proceso de maduración tiene como objetivo permitir que las uniones adhesivas obtengan la máxima resistencia mecánica posible.

- **Terminaciones**

Con el objetivo de poder inspeccionar las líneas de cola y obtener una sección transversal constante, las vigas laminadas se cepillaron en sus dos costados, eliminándose de esta forma los afloramientos de adhesivo resultante del prensado y obteniéndose una superficie lisa y plana. En la figura 6 se observa una viga laminada durante el cepillado de esta.

Figura 6: Cepillado de las líneas de cola de una viga laminada



Para eliminar los posibles escurrimientos de adhesivo en las caras de la primera y última pieza de madera de las vigas laminadas, se lijaron suavemente con una lijadora orbital, con papel lija de granulometría 240.



En la figura 7 se puede apreciar una viga laminada terminada.

Figura 7: Viga laminada terminada



Para la identificación por simple inspección ocular se marcaron las vigas laminadas en forma individual.

### **2.2.3.2 Elaboración de vigas I**

Se construyeron diez vigas laminadas, según lo estipulado en la norma ASTM D 5055 – 94a.

Los procesos de preparación del alma de tablero de hojuelas orientadas que conforma el alma de las vigas I se desarrolló según lo establecido en PRI-400 Performance Standard for APA EWS I – Joist. Los procesos restantes se desarrollaron según lo estipulado en la norma chilena NCh 2148 Of89.

- **Preparación del alma de las vigas I**

La preparación de este componente de las vigas I correspondió al dimensionado de estas piezas para obtener la longitud deseada, que en este caso correspondió a 3.000 mm. El dimensionado se realizó trozando los tableros de OSB, obteniéndose piezas de 146 mm de ancho y 2.440 mm de largo. Para obtener un elemento de OSB de longitud 3.000 mm, se procedió a unir de tope y encolar las piezas antes descritas. Estas piezas, al momento de ser encoladas, deben estar libres de polvo, grasa, resina, y en general, deben estar lo

suficientemente limpias de cualquier sustancia que pueda interferir en el proceso de encolado.

- **Preparación de las alas de las vigas I**

Las piezas de madera de pino radiata que forman parte de las alas de las vigas I, admiten defectos menores, tales como pecas, acanaladuras y torceduras muy leves, siempre y cuando estas puedan ser anuladas durante el prensado, como también éstas piezas al momento de ser encoladas, deben estar cepilladas y fresadas, para poder recibir en un espacio ranurado en ellas el alma de la viga de tablero OSB, cuya. Además, estas piezas de madera deben estar libres de polvo, grasa, resina, y en general, deben estar lo suficientemente limpias de cualquier sustancia que pueda interferir en el proceso de encolado. En la figura 8 se aprecian las alas de una viga I listas para ser encoladas.

Figura 8: Alas de una viga I



- **Preparación y aplicación del adhesivo**

El tipo de adhesivo empleado, la proporción de resina y catalizador, intervalo entre la preparación de la mezcla, gramaje, tiempo de ensamblado, presión de ensamblado, temperatura de curado del adhesivo y tiempo de curado del adhesivo fueron los mismos usados en la preparación y aplicación del adhesivo para vigas laminadas.

La mezcla adhesiva se aplicó de forma homogénea, utilizando brocha. El esparcido se realizó a dos caras, es decir, se encolaron los extremos del alma y las ranuras de ambas alas.

- **Prensado**

El prensado de las vigas I se desarrolló en una línea de prensado recto, de platos fríos, con distancia entre los elementos de apriete es de 400 mm. a eje.

El apriete de los elementos de la línea de prensado, verificación de presión y tiempo de curado del adhesivo se realizó de igual forma que en las vigas laminadas. En la figura 9 se puede observar una viga I durante el proceso de prensado.

Figura 9: Viga I durante proceso de prensado



- **Maduración**

Las vigas I se almacenaron bajo techo, en un lugar, seco, sin incidencia directa de luz solar, durante un periodo mínimo de siete días. El proceso de maduración tiene como objetivo permitir que las uniones adhesivas obtengan la máxima resistencia mecánica posible.

- **Terminaciones**

Una vez finalizado el periodo de estabilizado, y con el objetivo de poder inspeccionar las líneas de cola, se eliminó el adhesivo sobrante utilizando una lijadora de banda manual, con papel lija de granulometría 100. En los casos en que el adhesivo restante entre el alma y una de las alas fue excesivo, previo al paso antes descrito, se retiró con sumo cuidado el adhesivo sobrante con un formón. En la figura 10 se puede apreciar una viga I terminada.

Figura 10: Viga I terminada



Para la identificación por simple inspección ocular se marcaron las vigas I en forma individual.

#### **2.2.4 Evaluación mecánica de las vigas**

Con el objetivo de conocer el valor empírico del  $MOE_V$  de las vigas compuestas antes elaboradas, es decir, vigas I y vigas laminadas, se procedió a evaluarlas mecánicamente, como también se determinó el  $MOE_V$  de vigas sólidas de madera de pino radiata, sirviendo este grupo de 10 vigas como grupo testigo o control en el estudio.

Para obtener el  $MOE_V$  de cada viga, se evaluaron en un mecanismo de ensayo para determinación de  $MOE_V$ . La disposición de una viga laminada en el citado mecanismo de ensayo para determinación de  $MOE_V$  se observa en la figura 11.

Figura 11: Disposición de una viga laminada para el ensayo de determinación de  $MOE_V$



Este mecanismo consta de tres componentes principales, siendo este mecanismo idéntico al utilizado en la determinación del  $MOE_I$  de las alas y láminas con que se obtuvieron las vigas I y vigas laminadas respectivamente.

Para este ensayo, se utiliza una luz de ensayo de 2.800 mm. Primero se aplicó una carga inicial  $P_1$  de 313,6 N, en el centro de la luz de la viga, registrándose la deformación  $\delta_1$  observada con el reloj comparador. Se agrega la carga adicional  $P$  de 36,34 N, teniéndose como carga final  $P_2$  de 349,94 N. y registrándose una deformación  $\delta_2$ , donde  $\delta = \delta_2 - \delta_1$ , siendo  $\delta$  equivalente a la deformación ocasionada por la carga adicional  $P$ .

Las relaciones luz de ensayo de la viga/altura de la viga ( $l/h$ ) para vigas I, vigas laminadas y vigas sólidas de pino radiata fueron de 14,81; 14,66 y 15,47, respectivamente.

Con los resultados obtenidos en este ensayo, se procedió a calcular el  $MOE_V$  para cada viga, utilizándose la expresión 4 (ver subcapítulo 2.2.1.3).

El  $MOE_V$  registrado para cada viga se encuentra detallado en el apéndice IX.

### **2.2.5 Diseños de experimentos estadísticos utilizados**

Debido a que el principal objetivo de este estudio es determinar si la TVL es un estimador eficiente del  $MOE_V$  de vigas laminadas y vigas I, se diseñaron dos experimentos estadísticos unifactoriales completamente aleatorios orientados a determinar la existencia estadísticamente significativa respecto a las medias registradas para el  $MOE_V$  obtenidas mediante evaluación mecánica y los valores obtenidos mediante la TVL (Canavos, 1988).

#### **2.2.5.1 Experimento estadístico de vigas I**

El primer experimento estuvo orientado a determinar la existencia de diferencia estadísticamente significativa entre el  $MOE_V$  de las vigas I obtenido mediante la evaluación mecánica de las vigas elaboradas y los resultados obtenidos mediante la TVL. Para este caso se propuso la siguiente hipótesis nula.

$$H_0: \mu_1 = \mu_1^* \quad (5)$$

Donde:

$\mu_1$ : Valor medio del  $MOE_V$  de vigas I en el ensayo de flexión.

$\mu_{1*}$ : Valor medio del  $MOE_V$  de vigas I mediante la TVL.

Para esta prueba se tiene que:

- Número de tratamientos (k) = 2;
- Número de observaciones por tratamientos (n) = 10
- Número total de observaciones (N) = 20
- Error ( $\alpha$ ) = 0,05

Posteriormente se procedió a la construcción de la tabla de análisis de varianza (ANDEVA) correspondiente, comparándose el valor de la estadística f calculada y el valor de la estadística f correspondiente.

### **2.2.5.2 Experimento estadístico de vigas laminadas**

El segundo experimento estuvo orientado a determinar la existencia de diferencia estadísticamente significativa entre el  $MOE_V$  de las vigas laminadas obtenido mediante la evaluación mecánica de las vigas elaboradas y los resultados obtenidos mediante la TVL. Para este caso se propuso la siguiente hipótesis nula.

$$H_1: \mu_2 = \mu_{2*} \quad (6)$$

Donde:

$\mu_2$ : Valor medio del  $MOE_V$  de vigas laminadas en el ensayo de flexión.

$\mu_{2*}$ : Valor medio del  $MOE_V$  de vigas laminadas mediante la TVL.

Para este experimento se tiene que:

- Número de tratamientos (k) = 2;

- Número de observaciones por tratamientos (n) =10
- Número total de observaciones (N) = 20
- Error ( $\alpha$ ) = 0,05

Posteriormente se procedió a la construcción de la tabla de ANDEVA correspondiente, comparándose el valor de la estadística  $f$  calculada y el valor de la estadística  $f$  correspondiente.

### 2.2.5.3. Experimento estadístico de vigas I, vigas laminadas y vigas testigo

Un tercer experimento se desarrolló con el objetivo de determinar si existe diferencia estadísticamente significativa, entre los valores promedios observados del  $MOE_V$  obtenido mediante la evaluación mecánica de vigas I, vigas laminadas y el grupo de vigas testigo (vigas de madera de pino radiata. Para este experimento se propuso la siguiente hipótesis nula:

$$H_2: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 \quad (7)$$

Donde:

$\mu_1$ : Valor medio del  $MOE_V$  de vigas I en el ensayo de flexión.

$\mu_2$ : Valor medio del  $MOE_V$  de vigas laminadas en el ensayo de flexión.

$\mu_3$ : Valor medio del  $MOE_V$  de vigas testigo en el ensayo de flexión.

Para esta prueba se tiene que:

- Número de tratamientos (k) = 3;
- Número de observaciones por tratamientos (n) =10
- Número total de observaciones (N) = 30
- Error ( $\alpha$ ) = 0,05



Posteriormente se procedió a la construcción de la tabla de ANDEVA correspondiente, comparándose el valor de la estadística  $f$  calculada y el valor de la estadística  $f$  correspondiente.

Si existiese rechazo de la hipótesis nula de la expresión 7, se procederá a la aplicación de la prueba de Scheffé para comparaciones múltiples de medias. De esta forma se podrá discernir que medias presentan diferencias estadísticamente significativas entre sí.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1 Resultados obtenidos de $MOE_V$ mediante la TVL

Con la aplicación de la TVL se estimó un valor promedio superior a los 7.000 MPa para  $MOE_V$ , tanto para vigas I y vigas laminadas. En el cuadro 2, se pueden observar los valores estimados de  $MOE_V$  mediante la modelación de TVL.

Cuadro 2: Valores estimados de  $MOE_V$  (MPa) para vigas laminadas y vigas I, mediante TVL

Viga N°	Vigas I	Vigas Laminadas
1	7.690	10.097
2	7.189	9.740
3	7.597	10.350
4	6.873	10.359

5	6.417	9.886
6	6.486	10.634
7	8.792	9.946
8	6.823	9.901
9	7.119	10.701
10	7.175	10.182
<b>Promedio</b>	<b>7.216</b>	<b>10.180</b>
<b>Desv. Est.</b>	<b>691,88</b>	<b>326,11</b>
<b>Coefficiente de Variación (%)</b>	<b>9,6</b>	<b>3,2</b>

### 3.2 Resultados obtenidos de $MOE_V$ mediante ensayo de flexión.

En el ensayo de flexión se obtuvo un valor promedio superior a los 5.000 MPa para  $MOE_V$ , tanto para vigas I, vigas laminadas y vigas testigo. En el cuadro 3 se pueden observar los resultados del ensayo de flexión.

Cuadro 3: Valores obtenidos de  $MOE_V$  (MPa) para vigas laminadas, vigas I y vigas testigo en ensayo de flexión

<b>Viga N°</b>	<b>Vigas I</b>	<b>Vigas Laminadas</b>	<b>Vigas Sólidas</b>
1	5.251	5.504	5.692
2	4.868	6.170	4.687
3	4.844	5.504	4.939
4	4.843	5.623	6.078
5	4.827	6.268	4.224
6	5.220	6.273	4.896
7	5.843	5.102	5.413
8	5.293	5.638	5.507
9	6.413	6.395	4.373
10	6.140	4.742	4.644
<b>Promedio (MPa)</b>	<b>5.354</b>	<b>5.722</b>	<b>5.045</b>
<b>Desv. Est. (MPa)</b>	<b>581,57</b>	<b>548,89</b>	<b>603,88</b>

<b>Coefficiente de variación (%)</b>	<b>10,9</b>	<b>9,6</b>	<b>12,0</b>
--------------------------------------	-------------	------------	-------------

### 3.3 Comparación de resultados

La comparación de los resultados modelados mediante la TVL y obtenidos mediante el ensayo de flexión para  $MOE_V$  se detalla en el cuadro 4.

Cuadro 4: Comparación de resultados de  $MOE_V$

<b>Valores de <math>MOE_V</math></b>	<b>Vigas I</b>	<b>Vigas Laminadas</b>
<b>Modelo TVL (MPa)</b>	<b>7.206</b>	<b>10.179</b>
<b>Ensayo de flexión (MPa)</b>	<b>5.354</b>	<b>5.722</b>
<b>Sobreestimación del <math>MOE_V</math> obtenida mediante TVL (%)</b>	<b>34,6</b>	<b>77,9</b>

Al compararse los resultados del ensayo de flexión y los obtenidos mediante el modelo de TVL, se aprecia claramente que el modelo matemático tiende a sobreestimar el  $MOE_V$  de las vigas compuestas, en aproximadamente 1.850 MPa para vigas I y 4.450 MPa para vigas laminadas. Esta sobreestimación se originó probablemente debido a que el modelo de TVL considera la utilización de E de los constituyentes de cada viga, pero debido a restricciones de equipo, no fue posible la determinación empírica de este parámetro, procediéndose a su estimación mediante el  $MOE_I$ . Por otra parte no fue factible aplicar una relación luz de ensayo/espesor de la pieza en análisis semejante entre los ensayos de flexión para determinar el  $MOE_I$  y  $MOE_V$ .

Por otra parte, se observa que al aplicarse la TVL, el coeficiente de variación es menor para ambos tipos de vigas compuestas, respecto a los coeficientes de variación del ensayo en flexión. Esto se atribuye a que el ensayo en flexión considera una mayor cantidad de variables para su determinación, incrementándose la variabilidad de los resultados observados del  $MOE_V$ .

Se observa que las vigas I y vigas laminadas tienen mayor  $MOE_V$  que las vigas testigo utilizadas en este experimento, siendo este valor superior en un 6,1% y 13,4% respectivamente. Este mayor valor de  $MOE_V$  observado en las vigas compuestas se justifica, ya que una de las ventajas del uso de vigas compuestas es la maximización de sus propiedades. (Bodig y Jayne, 1993)

Los coeficientes de variación del ensayo de flexión obtenidos son de 10,9 %; 9,6% y 12,0% para vigas I, vigas laminadas y vigas sólidas respectivamente, observándose en este último grupo la mayor variación del  $MOE_V$ . En tanto, las vigas I como vigas laminadas, presentan un menor coeficiente de variación. Esto se justifica, según Koch (1972) que una de las ventajas de las vigas laminadas es que, con la ubicación selectiva de sus componentes es posible incrementar el  $MOE_V$ , y al mismo tiempo, reducir la variabilidad de este parámetro.

Es recomendable la utilización de vigas I donde se requiere un comportamiento a la flexión similar a las vigas laminadas, pero con un menor peso propio y menor costo que una viga laminada de dimensiones similares.

### **3.4 Resultados de experimentos estadísticos**

#### **3.4.1 Resultados del experimento estadístico de vigas I.**

Se diseñó un experimento estadístico orientado a determinar la existencia de diferencia estadísticamente significativa entre el  $MOE_V$  de las vigas I, obtenido mediante la evaluación mecánica de las vigas elaboradas y los resultados obtenidos mediante la TVL. Para este caso se propuso la hipótesis nula detallada en la expresión 5.

En el cuadro 5 se presenta la tabla del análisis de varianza (ANDEVA) para este experimento.

Cuadro 5: Análisis de varianza (ANDEVA) para el experimento de vigas I

<b>Fuente de variación</b>	<b>gl</b>	<b>SC</b>	<b>CM</b>	<b>Valor f</b>
Tratamientos	1	17.336.006	17.336.006	42,44
Error	18	7.352.300	408.461	
Total	19	24.688.306		$f_{0,95; 1; 18} = 4,41$

Debido a que la información antes agrupada en el ANDEVA representada en el cuadro 5, y considerando que  $f$  es igual a 42,44 y  $f_{0,95; 1; 18} = 4,41$ , se rechaza la hipótesis nula de la expresión 5, existiendo razón para creer que los resultados promedios para  $MOE_V$  obtenidos mediante el ensayo mecánico y mediante la TVL son diferentes, suponiéndose un error de tipo I con  $\alpha$  igual a 0,05.

Los datos de origen con que se construyó el cuadro 5 se encuentran detallados en el apéndice X.

### 3.4.2 Resultados del experimento estadístico de vigas laminadas.

En forma análoga al experimento de vigas I, se diseñó un experimento estadístico orientado a determinar la existencia de diferencia estadísticamente significativa entre el  $MOE_V$  de las vigas laminadas, obtenido mediante la evaluación mecánica de las vigas antes señaladas y los resultados obtenidos mediante la TVL. Para este caso se propuso la hipótesis nula detallada en la expresión 6.

En el cuadro 6 se expresa el análisis de varianza (ANDEVA) para el experimento de vigas laminadas.

Cuadro 6: Análisis de varianza (ANDEVA) para el experimento de vigas laminadas

<b>Fuente de variación</b>	<b>gl</b>	<b>SC</b>	<b>CM</b>	<b>Valor f</b>
Tratamientos	1	99.347.983	99.347.983	487,44
Error	18	3.668.684	203.816	
Total	19	103.016.667		$f_{0,95; 1; 18} = 4,41$

Analizándose la información detallada en el cuadro 6, y considerando que  $f$  es igual a 487,44 y  $f_{0,95; 1; 18} = 4,41$ , se rechaza la hipótesis nula de la expresión 6, existiendo razón

para creer que los resultados promedios para  $MOE_V$  de vigas laminadas obtenidos mediante el ensayo mecánico y mediante la TVL son diferentes, suponiéndose un error de tipo I con  $\alpha$  igual a 0,05.

Los datos de origen con que se construyó el cuadro 6 se encuentran detallados en el apéndice XI.

### 3.4.3 Resultados del experimento estadístico de vigas I, vigas laminadas y vigas testigo.

El tercer y último experimento estadístico realizado se desarrolló con el objetivo de determinar si existe diferencia significativa entre los valores promedios observados en el ensayo mecánico de determinación de  $MOE_V$  entre vigas I, vigas laminadas y el grupo de vigas testigo (vigas de madera de pino radiata).

Para este caso se propuso la hipótesis nula detallada en la expresión 7.

En el cuadro 7 se expresa el análisis de varianza (ANDEVA) para el experimento de vigas I, vigas laminadas y vigas testigo.

Cuadro 7: Análisis de varianza (ANDEVA) para el experimento de vigas I, vigas laminadas y vigas testigo.

Fuente de variación	gl	SC	CM	Valor f
Tratamientos	2	2.177.962	1.088.981	3,43
Error	27	8.519.229	315.527	
Total	29	10.697.191		$f_{0,95; 2; 27} = 3,35$

Analizándose la información detallada en el cuadro 7, y considerando que  $f$  es igual a 3,43 y  $f_{0,95; 2; 27} = 3,35$ ; se rechaza la hipótesis nula de la expresión 7, existiendo razón para creer que por lo menos alguno de los resultados promedios para  $MOE_V$  observados en el ensayo mecánico de vigas I, vigas laminadas y el grupo de vigas testigo es diferente, suponiéndose un error de tipo I con  $\alpha$  igual a 0,05.

Los datos de origen con que se construyó el cuadro 6 se encuentran detallados en el apéndice XII.

#### 3.4.4 Aplicación del método de Scheffé

Rechazada la hipótesis nula de la expresión 7, se aplica el método de Scheffé para comparaciones múltiples. Nótese que al rechazarse la estadística  $f$  del ANDEVA, sólo se puede determinar que, por lo menos una de las medias es diferente, pero este análisis no es un fundamento válido de discriminación o aceptación de alguna alternativa en particular. (Canavos, 1988)

Se sugieren los siguientes contrastes de interés para este estudio:

$$L_1 = \mu_1 - \mu_2 \quad ; \quad L_2 = \mu_1 - \mu_3 \quad ; \quad L_3 = \mu_2 - \mu_3$$

Donde:

$\mu_1$ : Media de vigas I en el ensayo de flexión

$\mu_2$ : Media de vigas laminadas en el ensayo de flexión

$\mu_3$ : Media de vigas solidas de pino radiata en el ensayo de flexión

Los intervalos de confianza ( $I_c$ ) para estos contrastes antes señalados son los siguientes:

$$I_c \hat{L}_1 = [-1.018,6 ; 282,6]$$

$$I_c \hat{L}_2 = [-341,6 ; 959,6]$$

$$I_c \hat{L}_3 = [26,4 ; 1.327,6]$$

Debido a que los  $I_c$  de los contrastes  $L_1$  y  $L_2$ , contienen a cero, no existe evidencia estadísticamente significativa para dudar de estos. Por este motivo se puede afirmar la inexistencia de diferencia entre la media del  $MOE_V$  de vigas I y la media del  $MOE_V$  de vigas laminadas en el ensayo de flexión. También se puede afirmar la inexistencia de diferencia estadísticamente significativa entre la media del  $MOE_V$  de vigas I y la media del  $MOE_V$  de vigas solidas de pino radiata en el ensayo de flexión.

Por otra parte, al rechazarse el contraste  $L_3$ , existe argumento estadísticamente relevante para creer en que es mayor la media del  $MOE_V$  de las vigas laminadas que la media del  $MOE_V$  de las vigas sólidas de pino radiata.

El detalle de la prueba de Scheffé se encuentra detallado en el apéndice XII.

#### 4. CONCLUSIONES

- La estimación del  $MOE_V$  para vigas compuestas mediante la TVL mostró una clara tendencia a la sobreestimación del parámetro en estudio, encontrándose diferencia estadísticamente significativa entre los valores de  $MOE_V$  obtenidos con la TVL y el ensayo en flexión, tanto para vigas I como vigas laminadas.
- Tanto la TVL como el ensayo de flexión muestran que las vigas laminadas poseen mayor  $MOE_V$  que las vigas I.
- No existe diferencia estadísticamente significativa entre las medias de  $MOE_V$  de vigas I y vigas laminadas en el ensayo de flexión.



- No existe diferencia estadísticamente significativa entre las medias de  $MOE_V$  de vigas I y vigas sólidas de pino radiata en el ensayo de flexión.
- El menor coeficiente de variación del  $MOE_V$  de las vigas compuestas, se justifica mayormente a que al ordenarse los elementos constituyentes de estas vigas según el  $MOE_I$ , se reduce la variabilidad del  $MOE_V$ .

## **5. BIBLIOGRAFIA**

1. American Forest and Paper Association, 1999. Allowable Stress Design, Manual for Engineered Wood Construction.
2. APA WOOD, 2002. PRI – 400 Performance Standard for APA EWS I – joist. Engineered Wood Systems.
3. ASTM D 5055 – 94a, Standard Specification for establishing and monitoring structural capacities of prefabricated wood I joist.
4. BODIG J.; JAYNE B., 1993. Mechanics of Wood and Wood Composites. Krieger Publishing Company: 335 – 343.

5. CANAVOS, G., 1988. Probabilidad y Estadística Aplicaciones y Métodos. Mc Graw – Hill.
6. FALK, R.H.; LEICHTI, R.J.; SHARP, D.J., 1990, Wood I joists: a look at research and production in north america. Actas de International Timber Engineering Conference..
7. KOCH P., 1972. Utilization of the southern pines, U.S. Department of agriculture forest service, southern forest experiment station, tomo 1: 267, 420 – 421.
8. LEICHTI, R.J.; FALK, R.H.; LAUFENBERG, T.L.,1990, Prefabricated wood I joists: an industry overview. Forest Products Journal 40: 15 – 20.
9. NCh 2148 Of89, Madera laminada encolada estructural - Requisitos e inspección.
10. NCh 2150 Of89, Madera laminada encolada - Clasificación mecánica y visual de madera aserrada de pino radiata.
11. TIMOSHENKO, S.P., GOODIER J.N., 1970. Theory of Elasticity. Mc Graw – Hill Book. NY: 291 – 315.
12. VIGNOTE, S.; JIMENEZ, F., 2000. Tecnología de la Madera. Mundi – Prensa Libros, S.A.: 233 – 246.
13. XU, W; SUCHSLAND, O., 1998. Modulus of elasticity of Wood composite panels with a uniform vertical density profile: model 1. Wood and Fiber Science 30: 293-300.

Apéndice I: Dimensiones observadas para las láminas de madera que forman parte de las vigas laminadas

Lámina	espesor e (mm)				ancho b (mm)				largo l (mm)
	e <sub>1</sub>	e <sub>2</sub>	e <sub>3</sub>	e prom	b <sub>1</sub>	b <sub>2</sub>	b <sub>3</sub>	b prom	
L1	19,20	19,35	19,35	<b>19,30</b>	55,85	55,25	55,10	<b>55,40</b>	<b>3.225</b>
L2	19,25	19,30	19,30	<b>19,28</b>	55,50	55,10	55,40	<b>55,33</b>	<b>3.198</b>
L3	19,40	19,20	19,25	<b>19,28</b>	56,70	56,45	56,20	<b>56,45</b>	<b>3.225</b>
L4	18,95	19,30	19,25	<b>19,17</b>	56,10	56,45	56,35	<b>56,30</b>	<b>3.221</b>
L5	19,30	19,35	19,30	<b>19,32</b>	56,00	56,10	56,00	<b>56,03</b>	<b>3.196</b>
L6	19,15	19,20	19,10	<b>19,15</b>	55,50	55,20	55,85	<b>55,52</b>	<b>3.225</b>
L7	19,10	19,10	19,15	<b>19,12</b>	55,60	55,60	55,70	<b>55,63</b>	<b>3.202</b>
L8	19,25	19,15	19,30	<b>19,23</b>	55,55	55,25	55,95	<b>55,58</b>	<b>3.202</b>
L9	18,90	19,10	19,20	<b>19,07</b>	56,15	56,55	56,75	<b>56,48</b>	<b>3.220</b>
L10	19,20	19,15	19,25	<b>19,20</b>	55,50	54,55	55,50	<b>55,18</b>	<b>3.200</b>
L11	19,20	19,15	19,40	<b>19,25</b>	55,90	55,85	56,30	<b>56,02</b>	<b>3.201</b>
L12	19,45	19,25	19,30	<b>19,33</b>	55,40	55,05	55,10	<b>55,18</b>	<b>3.221</b>
L13	19,30	19,40	19,40	<b>19,37</b>	55,10	54,65	56,10	<b>55,28</b>	<b>3.223</b>

L14	19,40	19,30	19,40	<b>19,37</b>	56,60	56,25	56,10	<b>56,32</b>	<b>3.222</b>
L15	19,70	19,65	19,50	<b>19,62</b>	56,75	56,65	56,95	<b>56,78</b>	<b>3.224</b>
L16	19,12	19,45	19,05	<b>19,21</b>	55,86	55,82	56,90	<b>56,19</b>	<b>3.203</b>
L17	19,10	19,20	19,09	<b>19,13</b>	55,59	55,83	55,89	<b>55,77</b>	<b>3.200</b>
L18	19,17	19,51	19,16	<b>19,28</b>	55,83	55,56	55,90	<b>55,76</b>	<b>3.225</b>
L19	19,73	19,52	19,59	<b>19,61</b>	56,92	55,48	57,96	<b>56,79</b>	<b>3.222</b>
L20	19,16	19,13	19,10	<b>19,13</b>	55,93	55,50	55,43	<b>55,62</b>	<b>3.199</b>
L21	19,34	19,44	19,37	<b>19,38</b>	56,08	55,89	55,62	<b>55,86</b>	<b>3.224</b>
L22	19,25	19,23	19,19	<b>19,22</b>	55,87	55,99	55,65	<b>55,84</b>	<b>3.204</b>
L23	19,44	19,36	19,39	<b>19,40</b>	56,91	57,97	56,77	<b>57,22</b>	<b>3.224</b>
L24	19,38	19,60	19,41	<b>19,46</b>	56,19	56,01	56,32	<b>56,17</b>	<b>3.223</b>
L25	19,22	19,24	19,17	<b>19,21</b>	55,90	55,06	56,15	<b>55,70</b>	<b>3.198</b>
L26	19,52	19,75	19,55	<b>19,61</b>	56,20	56,18	55,22	<b>55,87</b>	<b>3.221</b>
L27	19,53	19,59	19,36	<b>19,49</b>	55,78	55,91	55,89	<b>55,86</b>	<b>3.223</b>
L28	19,06	19,09	19,11	<b>19,09</b>	55,74	55,36	55,45	<b>55,52</b>	<b>3.220</b>
L29	19,38	19,29	19,45	<b>19,37</b>	56,25	56,12	55,92	<b>56,10</b>	<b>3.198</b>
L30	19,16	19,20	19,15	<b>19,17</b>	55,58	56,51	55,50	<b>55,86</b>	<b>3.226</b>
L31	19,26	19,41	19,24	<b>19,30</b>	56,71	56,17	57,29	<b>56,72</b>	<b>3.201</b>
L32	19,29	19,44	19,52	<b>19,42</b>	56,24	56,31	56,01	<b>56,19</b>	<b>3.225</b>
L33	19,33	19,07	19,62	<b>19,34</b>	56,05	56,12	55,51	<b>55,89</b>	<b>3.215</b>
L34	19,50	19,17	19,37	<b>19,35</b>	57,67	56,07	55,68	<b>56,47</b>	<b>3.214</b>
L35	19,39	19,37	19,31	<b>19,36</b>	56,56	55,84	56,84	<b>56,41</b>	<b>3.226</b>
L36	19,16	19,21	19,12	<b>19,16</b>	56,08	55,80	57,06	<b>56,31</b>	<b>3.198</b>
L37	19,54	19,58	19,53	<b>19,55</b>	55,98	54,81	56,23	<b>55,67</b>	<b>3.221</b>
L38	19,15	19,25	19,23	<b>19,21</b>	55,51	55,99	55,20	<b>55,57</b>	<b>3.198</b>
L39	19,49	19,25	19,35	<b>19,36</b>	55,65	55,99	55,42	<b>55,69</b>	<b>3.200</b>
L40	19,29	19,44	19,35	<b>19,36</b>	55,87	55,94	56,92	<b>56,24</b>	<b>3.198</b>

Apéndice I: Dimensiones observadas para las láminas de madera que forman parte de las vigas laminadas (continuación)

Lámina	espesor e (mm)				ancho b (mm)				largo l (mm)
	e <sub>1</sub>	e <sub>2</sub>	e <sub>3</sub>	e prom	b <sub>1</sub>	b <sub>2</sub>	b <sub>3</sub>	b prom	
L41	19,59	19,65	19,62	<b>19,62</b>	56,96	56,71	56,74	<b>56,80</b>	<b>3.217</b>
L42	19,55	19,49	19,56	<b>19,53</b>	55,45	56,10	55,67	<b>55,74</b>	<b>3.216</b>
L43	19,12	19,31	19,27	<b>19,23</b>	56,27	56,30	56,64	<b>56,40</b>	<b>3.217</b>
L44	19,40	19,42	19,32	<b>19,38</b>	56,26	55,85	55,89	<b>56,00</b>	<b>3.217</b>
L45	19,24	19,17	19,09	<b>19,17</b>	56,07	55,72	55,35	<b>55,71</b>	<b>3.225</b>
L46	19,18	19,33	19,34	<b>19,28</b>	56,09	56,15	55,50	<b>55,91</b>	<b>3.224</b>
L47	19,51	19,51	19,50	<b>19,51</b>	55,76	55,95	56,24	<b>55,98</b>	<b>3.222</b>
L48	19,22	19,40	19,41	<b>19,34</b>	55,38	56,04	55,52	<b>55,65</b>	<b>3.224</b>
L49	19,44	19,61	19,42	<b>19,49</b>	56,26	56,25	56,48	<b>56,33</b>	<b>3.222</b>
L50	19,20	19,22	19,19	<b>19,20</b>	55,66	55,87	56,19	<b>55,91</b>	<b>3.223</b>
L51	19,37	19,57	19,40	<b>19,45</b>	56,14	56,97	57,20	<b>56,77</b>	<b>3.224</b>
L52	19,38	19,27	19,31	<b>19,32</b>	55,84	55,92	56,11	<b>55,96</b>	<b>3.201</b>
L53	19,37	19,31	19,29	<b>19,32</b>	55,69	54,78	56,05	<b>55,51</b>	<b>3.218</b>

L54	19,35	19,49	19,47	<b>19,44</b>	56,69	56,96	57,13	<b>56,93</b>	<b>3.223</b>
L55	19,23	19,46	19,31	<b>19,33</b>	55,40	55,93	55,98	<b>55,77</b>	<b>3.201</b>
L56	19,55	19,41	19,48	<b>19,48</b>	56,79	56,09	56,78	<b>56,55</b>	<b>3.201</b>
L57	19,71	19,75	19,56	<b>19,67</b>	56,60	56,43	55,28	<b>56,10</b>	<b>3.218</b>
L58	19,62	19,73	19,51	<b>19,62</b>	57,02	57,48	57,45	<b>57,32</b>	<b>3.219</b>
L59	19,35	19,42	19,22	<b>19,33</b>	56,87	56,84	57,20	<b>56,97</b>	<b>3.224</b>
L60	19,55	19,40	19,62	<b>19,52</b>	55,95	55,85	56,45	<b>56,08</b>	<b>3.223</b>
L61	19,36	19,22	19,65	<b>19,41</b>	56,75	57,63	56,57	<b>56,98</b>	<b>3.218</b>
L62	19,57	19,37	19,37	<b>19,44</b>	56,72	56,93	57,47	<b>57,04</b>	<b>3.201</b>
L63	19,39	19,41	19,29	<b>19,36</b>	56,09	55,79	55,60	<b>55,83</b>	<b>3.201</b>
L64	19,50	19,58	19,53	<b>19,54</b>	56,22	55,62	55,58	<b>55,81</b>	<b>3.226</b>
L65	19,75	19,53	19,60	<b>19,63</b>	55,35	55,75	55,87	<b>55,66</b>	<b>3.224</b>
L66	19,60	19,64	19,55	<b>19,60</b>	57,35	57,39	56,77	<b>57,17</b>	<b>3.225</b>
L67	19,04	19,06	18,97	<b>19,02</b>	55,60	55,37	54,89	<b>55,29</b>	<b>3.224</b>
L68	19,59	19,62	19,41	<b>19,54</b>	56,84	56,01	57,67	<b>56,84</b>	<b>3.225</b>
L69	19,23	19,47	19,26	<b>19,32</b>	55,41	55,34	55,85	<b>55,53</b>	<b>3.201</b>
L70	19,73	19,78	19,65	<b>19,72</b>	55,57	55,51	55,10	<b>55,39</b>	<b>3.221</b>
L71	19,61	19,32	19,35	<b>19,43</b>	56,13	55,96	55,90	<b>56,00</b>	<b>3.219</b>
L72	19,92	19,24	19,44	<b>19,53</b>	55,48	56,01	55,15	<b>55,55</b>	<b>3.201</b>
L73	19,42	19,66	19,44	<b>19,51</b>	56,22	56,89	56,71	<b>56,61</b>	<b>3.201</b>
L74	19,57	19,46	19,55	<b>19,53</b>	55,80	55,82	56,19	<b>55,94</b>	<b>3.203</b>
L75	19,46	19,43	19,67	<b>19,52</b>	55,89	55,44	55,97	<b>55,77</b>	<b>3.202</b>
L76	19,76	19,90	19,95	<b>19,87</b>	56,36	56,57	56,46	<b>56,46</b>	<b>3.224</b>
L77	19,56	19,54	19,44	<b>19,51</b>	55,53	55,96	56,76	<b>56,08</b>	<b>3.224</b>
L78	19,91	19,34	19,22	<b>19,49</b>	56,03	55,15	54,84	<b>55,34</b>	<b>3.218</b>
L79	19,30	19,34	19,33	<b>19,32</b>	56,28	56,51	56,35	<b>56,38</b>	<b>3.200</b>
L80	19,69	19,55	19,36	<b>19,53</b>	54,93	55,41	55,50	<b>55,28</b>	<b>3.202</b>

Apéndice I: Dimensiones observadas para las láminas de madera que forman parte de las vigas laminadas (continuación)

Lámina	espesor e (mm)				ancho b (mm)				largo l (mm)
	e <sub>1</sub>	e <sub>2</sub>	e <sub>3</sub>	e prom	b <sub>1</sub>	b <sub>2</sub>	b <sub>3</sub>	b prom	
L81	19,52	19,67	19,47	<b>19,55</b>	57,31	57,03	56,17	<b>56,84</b>	<b>3.221</b>
L82	19,41	19,43	19,64	<b>19,49</b>	54,67	55,76	55,85	<b>55,43</b>	<b>3.222</b>
L83	19,30	19,36	19,33	<b>19,33</b>	56,99	55,93	56,26	<b>56,39</b>	<b>3.201</b>
L84	19,31	19,30	19,41	<b>19,34</b>	55,38	56,08	55,73	<b>55,73</b>	<b>3.201</b>
L85	19,13	19,10	19,21	<b>19,15</b>	57,01	56,86	55,77	<b>56,55</b>	<b>3.200</b>
L86	19,06	19,00	18,95	<b>19,00</b>	53,15	53,25	54,11	<b>53,50</b>	<b>3.201</b>
L87	19,43	19,49	19,51	<b>19,48</b>	56,72	56,14	56,18	<b>56,35</b>	<b>3.202</b>
L88	19,58	19,79	20,51	<b>19,96</b>	56,20	56,08	56,42	<b>56,23</b>	<b>3.202</b>
L89	19,22	19,69	19,62	<b>19,51</b>	55,63	55,99	55,54	<b>55,72</b>	<b>3.202</b>
L90	19,24	19,20	19,31	<b>19,25</b>	57,01	56,15	57,12	<b>56,76</b>	<b>3.200</b>
L91	19,69	20,07	19,57	<b>19,78</b>	56,56	56,17	56,35	<b>56,36</b>	<b>3.240</b>
L92	19,54	19,58	19,48	<b>19,53</b>	56,77	56,78	56,96	<b>56,84</b>	<b>3.220</b>
L93	19,49	19,52	19,51	<b>19,51</b>	54,31	54,93	55,97	<b>55,07</b>	<b>3.214</b>
L94	19,51	19,47	19,49	<b>19,49</b>	57,07	56,67	56,54	<b>56,76</b>	<b>3.215</b>

L95	19,26	19,50	19,48	<b>19,41</b>	56,97	56,80	56,80	<b>56,86</b>	<b>3.202</b>
L96	19,29	19,23	19,53	<b>19,35</b>	55,94	56,68	55,75	<b>56,12</b>	<b>3.203</b>
L97	19,29	19,28	19,30	<b>19,29</b>	56,60	55,54	56,64	<b>56,26</b>	<b>3.203</b>
L98	19,56	19,35	19,11	<b>19,34</b>	56,72	57,65	56,66	<b>57,01</b>	<b>3.203</b>
L99	19,63	19,39	19,80	<b>19,61</b>	56,93	57,05	56,64	<b>56,87</b>	<b>3.223</b>
L100	19,65	19,61	19,54	<b>19,60</b>	54,98	55,45	55,77	<b>55,40</b>	<b>3.224</b>
L101	19,40	19,34	19,38	<b>19,37</b>	55,39	55,10	55,85	<b>55,45</b>	<b>3.202</b>
L102	19,44	19,37	19,73	<b>19,51</b>	56,48	56,63	56,61	<b>56,57</b>	<b>3.221</b>
L103	19,48	19,59	19,52	<b>19,53</b>	54,94	55,39	55,45	<b>55,26</b>	<b>3.197</b>
L104	19,26	19,28	19,75	<b>19,43</b>	56,78	56,56	56,56	<b>56,63</b>	<b>3.199</b>

<b>Promedio</b>				<b>19,40</b>				<b>56,07</b>	<b>3.212,96</b>
<b>Dev, Est</b>				<b>0,18</b>				<b>0,60</b>	<b>11,07</b>

Apéndice II: Dimensiones observadas para las láminas de madera que forman parte de las vigas I,

Lámina	espesor e (mm)					ancho b (mm)					largo l (mm)
	e <sub>1</sub>	e <sub>2</sub>	e <sub>3</sub>	e <sub>4</sub>	e prom	b <sub>1</sub>	b <sub>2</sub>	b <sub>3</sub>	b <sub>4</sub>	b prom	
I1	42,30	42,55	42,60	42,30	<b>42,44</b>	58,20	58,00	57,65	58,50	<b>58,09</b>	3.054
I2	43,50	43,25	43,40	43,40	<b>43,39</b>	57,70	58,00	58,15	58,40	<b>58,06</b>	3.052
I3	42,65	43,00	43,50	42,70	<b>42,96</b>	58,35	58,45	58,25	58,89	<b>58,49</b>	3.054
I4	43,35	43,15	43,50	43,00	<b>43,25</b>	58,10	58,85	58,05	58,20	<b>58,30</b>	3.054
I5	42,80	43,45	43,65	43,30	<b>43,30</b>	58,30	57,70	54,15	57,00	<b>56,79</b>	3.054
I6	43,00	42,70	42,50	42,70	<b>42,73</b>	58,20	58,00	58,05	58,30	<b>58,14</b>	3.053
I7	42,80	43,00	43,25	43,25	<b>43,08</b>	58,75	58,15	58,80	58,25	<b>58,49</b>	3.054
I8	43,45	43,30	43,25	43,55	<b>43,39</b>	58,15	58,20	56,10	57,75	<b>57,55</b>	3.052
I9	43,05	43,10	43,30	43,05	<b>43,13</b>	58,30	58,00	57,55	57,85	<b>57,93</b>	3.053
I10	43,10	43,00	43,15	43,30	<b>43,14</b>	58,35	58,00	58,05	58,45	<b>58,21</b>	3.054
I11	43,10	43,95	43,10	43,05	<b>43,30</b>	58,25	58,15	58,30	58,10	<b>58,20</b>	3.052
I12	43,30	42,90	42,80	42,80	<b>42,95</b>	58,15	58,10	58,10	58,55	<b>58,23</b>	3.053
I13	42,75	42,75	42,85	42,60	<b>42,74</b>	58,05	57,80	57,65	57,75	<b>57,81</b>	3.053
I14	42,95	43,00	43,05	42,80	<b>42,95</b>	57,90	57,95	57,95	57,95	<b>57,94</b>	3.052

I15	42,50	42,75	42,55	42,40	<b>42,55</b>	57,85	57,75	57,20	58,30	<b>57,78</b>	3.052
I16	42,95	42,80	42,80	42,60	<b>42,79</b>	57,90	57,80	57,90	58,20	<b>57,95</b>	3.053
I17	42,80	42,90	43,10	42,65	<b>42,86</b>	58,15	57,75	57,70	57,90	<b>57,88</b>	3.053
I18	42,65	42,80	42,70	42,20	<b>42,59</b>	57,90	58,00	57,90	57,55	<b>57,84</b>	3.052
I19	43,15	43,15	42,85	42,80	<b>42,99</b>	58,30	56,00	56,90	57,95	<b>57,29</b>	3.053
I20	43,00	43,00	42,60	42,55	<b>42,79</b>	58,40	58,05	57,85	57,65	<b>57,99</b>	3.052
I21	43,00	43,15	43,15	42,95	<b>43,06</b>	58,25	52,65	54,75	58,15	<b>55,95</b>	3.053
I22	42,10	42,40	42,65	42,35	<b>42,38</b>	57,85	53,85	54,10	58,30	<b>56,03</b>	3.053

<b>Promedio</b>					<b>42,94</b>					<b>57,77</b>	<b>3.052,95</b>
<b>Dev, Est</b>					<b>0,30</b>					<b>0,69</b>	<b>0,79</b>

Apéndice III: Cargas aplicadas, deformaciones, MOE y E observados en las láminas constituyentes de vigas laminadas,

Luz de ensayo: 2.600 mm,  
Carga P adicional aplicada: 0,987 N,

<b>Pieza</b>	<b><math>\delta</math> max (mm)</b>	<b>MOE (*) (MPa)</b>	<b>E (*) (MPa)</b>
L1	1,09	9.990	10.001
L2	1,17	9.342	9.352
L3	1,15	9.317	9.327
L4	1,02	10.726	10.737
L5	1,76	6.101	6.108
L6	1,09	10.205	10.216
L7	1,04	10.729	10.740
L8	1,04	10.545	10.556
L9	1,63	6.796	6.803
L10	1,46	7.605	7.613

L11	1,09	9.957	9.968
L12	1,14	9.540	9.550
L13	1,49	7.248	7.256
L14	1,14	9.300	9.310
L15	1,25	8.094	8.103
L16	1,09	9.993	10.004
L17	0,96	11.571	11.583
L18	1,38	7.864	7.872
L19	0,92	11.002	11.014
L20	1,14	9.770	9.780
L21	0,92	11.587	11.600
L22	1,33	8.221	8.230
L23	1,36	7.637	7.645
L24	0,92	11.382	11.394
L25	1,11	9.894	9.905
L26	0,97	10.618	10.630
L27	1,22	8.591	8.601
L28	1,48	7.591	7.599
L29	1,30	8.179	8.187
L30	1,15	9.583	9.593

Apéndice III: Cargas aplicadas, deformaciones, MOE y E observados en las láminas constituyentes de vigas laminadas (continuación)

<b>Pieza</b>	<b><math>\delta</math> max (mm)</b>	<b>MOE (*) (MPa)</b>	<b>E (*) (MPa)</b>
L31	1,27	8.370	8.379
L32	1,10	9.586	9.596
L33	1,41	7.607	7.615
L34	1,93	5.495	5.501
L35	0,98	10.816	10.828
L36	1,49	7.345	7.352
L37	1,57	6.640	6.648
L38	1,15	9.574	9.584
L39	1,46	7.347	7.355
L40	1,90	5.593	5.599
L41	1,27	7.960	7.969
L42	0,95	10.989	11.001
L43	1,57	6.883	6.891
L44	1,57	6.777	6.784



L45	1,84	6.008	6.015
L46	1,08	10.016	10.027
L47	1,07	9.754	9.765
L48	1,02	10.557	10.568
L49	1,14	9.122	9.132
L50	1,57	6.977	6.985
L51	1,12	9.275	9.285
L52	1,44	7.463	7.471
L53	1,68	6.446	6.453
L54	1,07	9.696	9.707
L55	1,37	7.855	7.863
L56	0,99	10.479	10.490
L57	0,92	11.035	11.047
L58	1,10	9.108	9.118
L59	1,10	9.582	9.592
L60	0,99	10.497	10.508
L61	1,14	9.130	9.139
L62	1,39	7.449	7.457
L63	1,32	8.106	8.115
L64	1,04	10.021	10.032
L65	1,22	8.448	8.457

Apéndice III: Cargas aplicadas, deformaciones, MOE y E observados en las láminas constituyentes de vigas laminadas (continuación)

<b>Pieza</b>	<b><math>\delta</math> max (mm)</b>	<b>MOE (*) (MPa)</b>	<b>E (*) (MPa)</b>
L66	1,28	7.875	7.884
L67	1,02	11.171	11.183
L68	1,08	9.469	9.480
L69	1,13	9.583	9.594
L70	1,07	9.541	9.552
L71	1,13	9.348	9.359
L72	1,71	6.126	6.133
L73	1,02	10.120	10.130
L74	0,96	10.847	10.859
L75	1,21	8.641	8.651
L76	1,39	7.044	7.052
L77	1,32	7.885	7.893
L78	1,46	7.250	7.258
L79	1,24	8.598	8.607
L80	1,43	7.361	7.369

L81	1,20	8.506	8.515
L82	1,11	9.516	9.527
L83	1,19	8.948	8.957
L84	1,29	8.339	8.348
L85	1,17	9.339	9.349
L86	0,99	11.931	11.943
L87	2,04	5.107	5.112
L88	1,62	5.987	5.993
L89	1,21	8.662	8.671
L90	2,60	4.120	4.124
L91	1,22	8.154	8.163
L92	0,94	10.892	10.903
L93	1,55	6.845	6.853
L94	1,36	7.589	7.597
L95	0,88	11.847	11.860
L96	0,88	12.120	12.133
L97	1,26	8.523	8.532
L98	1,13	9.306	9.316
L99	1,14	8.875	8.884
L100	1,32	7.876	7.885

Apéndice III: Cargas aplicadas, deformaciones, MOE y E observados en las láminas constituyentes de vigas laminadas (continuación)

<b>Pieza</b>	<b><math>\delta</math> max (mm)</b>	<b>MOE (*) (MPa)</b>	<b>E (*) (MPa)</b>
L101	1,16	9.273	9.283
L102	1,17	8.818	8.828
L103	1,66	6.347	6.354
L104	0,90	11.600	11.612
<b>Promedio</b>	<b>1,25</b>	<b>8.811,21</b>	<b>8.820,62</b>
<b>Dev, Est</b>	<b>0,28</b>	<b>1.685,77</b>	<b>1.687,55</b>

Nota

(\*) El MOE y E detallados en este apéndice fueron obtenidos a partir de las expresiones 4 y 3, respectivamente

Apéndice IV: Cargas aplicadas, deformaciones, MOE y E observados en las láminas constituyentes de vigas laminadas,

Luz de ensayo: 2.600 mm,  
Carga P adicional aplicada: 0,987 N,

<b>Pieza</b>	<b><math>\delta</math> max (mm)</b>	<b>MOE (*) (MPa)</b>	<b>E (*) (MPa)</b>
I1	0,40	6.577	6.611
I2	0,36	6.841	6.878
I3	0,29	8.684	8.730
I4	0,31	7.988	8.031
I5	0,35	7.238	7.277
I6	0,33	7.806	7.846
I7	0,32	7.808	7.849
I8	0,41	6.060	6.093
I9	0,31	8.110	8.153
I10	0,33	7.574	7.614
I11	0,25	9.888	9.941
I12	0,32	7.912	7.953
I13	0,24	10.784	10.840

I14	0,31	8.208	8.251
I15	0,40	6.560	6.594
I16	0,20	12.865	12.932
I17	0,42	6.102	6.134
I18	0,31	8.434	8.477
I19	0,26	9.871	9.923
I20	0,36	7.142	7.180
I21	0,37	7.065	7.103
I22	0,38	7.210	7.247
<b>Promedio</b>	<b>0,33</b>	<b>8.033,10</b>	<b>8.075,17</b>
<b>Dev, Est</b>	<b>0,06</b>	<b>1.619,05</b>	<b>1.627,47</b>

Nota

(\*) El MOE y E detallados en este apéndice fueron obtenidos a partir de las expresiones 4 y 3, respectivamente

Apéndice V: Asignación de las piezas de madera que constituyen las vigas laminadas,

Viga Laminada	Pieza o lámina de madera									
	<i>I1</i>	<i>I2</i>	<i>I3</i>	<i>I4</i>	<i>I5</i>	<i>I6</i>	<i>I7</i>	<i>I8</i>	<i>I9</i>	<i>I10</i>
1	7	16	51	65	5	44	81	101	69	67
2	21	47	83	41	78	36	18	97	6	35
3	95	59	61	91	45	76	29	99	1	42
4	4	25	68	15	103	39	77	49	73	104
5	48	54	89	10	52	37	100	75	82	57
6	24	11	2	55	93	5	31	3	46	96
7	19	20	71	33	13	50	23	79	30	8
8	26	38	98	94	53	72	84	27	70	92
9	86	56	85	66	88	80	22	58	64	74
10	60	32	14	28	62	43	63	12	16	17

Nota: Se denomina *I1* a la pieza o lamina basal, *I2* a la lamina siguiente, y así sucesivamente, hasta llegar a *I10* que es la pieza superior de madera,

Apéndice VI: Asignación de las piezas de madera que constituyen las vigas I,

Viga I	Pieza o lamina de madera	
	<i>i1</i>	<i>i2</i>
1	20	11
2	19	17
3	8	13
4	15	3
5	14	8
6	10	2
7	16	1
8	12	5
9	6	4
10	9	7

Nota: Se denomina *i1* al ala basal, e *i2* al ala superior de cada viga I

Apéndice VII: Cálculos y valores observados mediante la aplicación de la TVL, para vigas laminadas

<b>Viga 1</b>	<b>E MPa</b>	<b>e (mm)</b>	<b>b (mm)</b>	<b>d (mm)</b>	<b>Di (mm<sup>4</sup> MPa)</b>
7	10.740	19,12	55,63	87,13	86.365.505.841
16	10.004	19,21	56,19	67,96	49.541.079.434
51	9.285	19,45	56,77	48,63	23.922.172.087
65	8.457	19,63	55,66	29,09	7.522.574.393
5	6.108	19,32	56,03	9,62	405.594.411
44	6.784	19,38	56,00	9,74	467.311.611
81	8.515	19,55	56,84	29,20	7.766.358.423
101	9.283	19,37	55,45	48,66	23.296.502.907
69	9.594	19,32	55,53	68,01	47.280.853.173
67	11.283	19,02	55,29	87,18	89.813.031.477
<b>D (mm<sup>4</sup> MPa)</b>					<b>336.380.983.757</b>
<b>MOE (MPa)</b>					<b>10.097</b>

<b>Viga 2</b>	<b>E MPa</b>	<b>e (mm)</b>	<b>b (mm)</b>	<b>d (mm)</b>	<b>Di (mm<sup>4</sup> MPa)</b>
21	11.600	19,38	55,86	87,12	94.926.197.359

47	6.648	19,55	55,67	67,65	32.880.335.726
83	8.957	19,33	56,39	48,21	22.387.904.038
41	7.969	19,62	56,80	28,73	7.047.110.293
78	7.258	19,49	55,34	9,18	411.666.639
36	7.352	19,16	56,31	10,15	574.322.060
18	7.872	19,28	55,76	29,37	7.038.294.729
97	8.532	19,29	56,26	48,66	21.633.641.402
6	10.216	19,15	55,52	67,88	49.704.361.934
35	10.828	19,36	56,41	87,13	89.388.320.170

**D (mm<sup>4</sup> MPa) 325.992.154.350**  
**MOE (MPa) 9.740**

Apéndice VII: Cálculos y valores observados mediante la aplicación de la TVL, para vigas laminadas (continuación)

<b>Viga 3</b>	<b>E MPa</b>	<b>e (mm)</b>	<b>b (mm)</b>	<b>d (mm)</b>	<b>Di (mm<sup>4</sup> MPa)</b>
95	11.860	19,41	56,86	87,68	100.234.065.389
59	9.592	19,33	56,97	68,31	48.962.508.200
61	9.139	19,41	56,98	48,94	23.895.339.845
91	8.163	19,78	56,36	29,35	7.540.623.777
45	6.015	19,17	55,71	9,88	429.905.640
76	7.052	19,87	56,46	9,64	475.161.344
29	8.187	19,37	56,10	29,26	7.341.356.266
99	8.884	19,61	56,87	48,75	23.230.270.010
1	10.001	19,30	55,40	68,21	49.413.029.617
42	11.001	19,53	55,74	87,62	91.581.667.733

**D (mm<sup>4</sup> MPa) 353.103.927.821**  
**MOE (MPa) 10.350**

<b>Viga 4</b>	<b>E MPa</b>	<b>e (mm)</b>	<b>b (mm)</b>	<b>d (mm)</b>	<b>Di (mm<sup>4</sup> MPa)</b>
4	10.737	19,17	56,30	87,60	88.554.155.376
25	9.905	19,21	55,70	68,41	49.277.849.419

68	9.480	19,54	56,84	49,04	24.982.274.282
15	8.103	19,62	56,78	29,46	7.543.187.135
103	6.354	19,53	55,26	9,89	452.070.062
39	7.355	19,36	55,69	9,56	477.290.415
77	7.893	19,51	56,08	29,00	6.990.411.780
49	9.132	19,49	56,33	48,50	23.267.331.949
73	10.130	19,51	56,61	68,00	51.369.980.102
104	11.612	19,43	56,63	87,47	97.356.888.243
<b>D (mm<sup>4</sup> MPa)</b>					<b>350.271.438.763</b>
<b>MOE (MPa)</b>					<b>10.359</b>

Apéndice VII: Cálculos y valores observados mediante la aplicación de la TVL, para vigas laminadas (continuación)

<b>Viga 5</b>	<b>E MPa</b>	<b>e (mm)</b>	<b>b (mm)</b>	<b>d (mm)</b>	<b>Di (mm<sup>4</sup> MPa)</b>
48	10.568	19,34	55,65	87,65	87.042.206.780
54	9.707	19,44	56,93	68,26	49.707.875.015
89	8.671	19,51	55,72	48,79	22.138.703.820
10	7.613	19,20	55,18	29,43	6.740.240.300
52	7.471	19,32	55,96	10,17	584.720.454
37	6.648	19,55	55,67	9,26	390.185.959
100	7.885	19,60	55,40	28,84	6.845.496.235
75	8.651	19,52	55,77	48,40	21.757.303.638
82	9.527	19,49	55,43	67,90	47.134.595.575
57	11.047	19,67	56,10	87,49	92.930.954.820
<b>D (mm<sup>4</sup> MPa)</b>					<b>335.272.282.595</b>
<b>MOE (MPa)</b>					<b>9.886</b>

<b>Viga 6</b>	<b>E MPa</b>	<b>e (mm)</b>	<b>b (mm)</b>	<b>d (mm)</b>	<b>Di (mm<sup>4</sup> MPa)</b>
24	11.394	19,46	56,17	86,96	93.798.106.938
11	9.968	19,25	56,02	67,60	48.783.528.314
2	9.352	19,28	55,33	48,33	23.001.145.745



55	7.863	19,33	55,77	29,02	6.877.569.375
93	6.853	19,51	55,07	9,60	445.461.712
5	6.108	19,32	56,03	9,81	430.428.258
31	8.379	19,30	56,72	29,12	7.493.723.792
3	9.327	19,28	56,45	48,41	23.479.740.711
46	10.027	19,28	55,91	67,70	49.205.563.761
96	12.133	19,35	56,12	87,01	99.347.204.841

**D (mm<sup>4</sup> MPa) 352.862.473.446**  
**MOE (MPa) 10.634**

Apéndice VII: Cálculos y valores observados mediante la aplicación de la TVL, para vigas laminadas (continuación)

<b>Viga 7</b>	<b>E MPa</b>	<b>e (mm)</b>	<b>b (mm)</b>	<b>d (mm)</b>	<b>Di (mm<sup>4</sup> MPa)</b>
19	11.014	19,61	56,79	86,80	92.023.387.506
20	9.780	19,13	55,62	67,42	46.988.407.491
71	9.359	19,43	56,00	48,15	23.277.537.059
33	7.615	19,34	55,89	28,76	6.553.211.367
13	7.256	19,37	55,28	9,41	444.839.328
50	6.985	19,20	55,91	9,88	501.039.102
23	7.645	19,40	57,22	29,18	6.957.003.519
79	8.607	19,32	56,38	48,54	21.798.027.588
30	9.593	19,17	55,86	67,78	46.884.540.945
8	10.556	19,23	55,58	86,99	85.036.727.515

**D (mm<sup>4</sup> MPa) 330.464.721.421**  
**MOE (MPa) 9.946**

<b>Viga 8</b>	<b>E MPa</b>	<b>e (mm)</b>	<b>b (mm)</b>	<b>d (mm)</b>	<b>Di (mm<sup>4</sup> MPa)</b>
26	10.630	19,61	55,87	87,49	88.753.179.196
38	9.584	19,21	55,57	68,08	47.105.366.860
98	9.316	19,34	57,01	48,81	24.149.884.240

94	7.597	19,49	56,76	29,39	6.994.708.496
53	6.453	19,32	55,51	9,99	474.897.128
72	6.133	19,53	55,55	9,44	381.615.228
84	8.348	19,34	55,73	28,88	7.223.319.539
27	8.601	19,49	55,86	48,30	21.546.730.917
70	9.552	19,72	55,39	67,90	47.770.150.658
92	10.903	19,53	56,84	87,53	92.354.519.725

**D (mm<sup>4</sup> MPa) 336.754.371.986**  
**MOE (MPa) 9.901**

Apéndice VII: Cálculos y valores observados mediante la aplicación de la TVL, para vigas laminadas (continuación)

<b>Viga 9</b>	<b>E MPa</b>	<b>e (mm)</b>	<b>b (mm)</b>	<b>d (mm)</b>	<b>Di (mm<sup>4</sup> MPa)</b>
86	11.943	19,00	53,50	87,81	93.268.250.032
56	10.490	19,48	56,55	68,57	53.972.121.499
85	9.349	19,15	56,55	49,26	24.248.444.188
66	7.884	19,60	57,17	29,89	7.605.631.722
88	5.993	19,96	56,23	10,11	463.801.750
80	7.369	19,53	55,28	9,64	486.451.258
22	8.230	19,22	55,84	29,02	7.166.194.861
58	9.118	19,62	57,32	48,44	23.729.634.053
64	10.032	19,54	55,81	68,02	50.253.857.340
74	10.859	19,53	55,94	87,55	90.537.409.589

**D (mm<sup>4</sup> MPa) 351.731.796.293**  
**MOE (MPa) 10.701**

<b>Viga 10</b>	<b>E MPa</b>	<b>e (mm)</b>	<b>b (mm)</b>	<b>d (mm)</b>	<b>Di (mm<sup>4</sup> MPa)</b>
60	10.508	19,52	56,08	86,79	86.292.813.826
32	9.596	19,42	56,19	67,32	47.111.149.728
14	9.310	19,37	56,32	47,93	23.003.750.313
28	7.599	19,09	55,52	28,70	6.387.145.701

62	7.457	19,44	57,04	9,44	475.960.405
43	6.891	19,23	56,40	9,90	501.963.439
63	8.115	19,36	55,83	29,20	7.203.680.658
12	9.550	19,33	55,18	48,55	23.693.554.465
16	10.004	19,21	56,19	67,82	49.321.949.335
17	11.583	19,13	55,77	86,98	93.120.492.814

---

<b>D (mm<sup>4</sup> MPa)</b>	<b>337.112.460.684</b>
<b>MOE (MPa)</b>	<b>10.182</b>

---

Apéndice VII: Cálculos y valores observados mediante la aplicación de la TVL, para vigas laminadas (continuación)

Donde:

MOE<sub>v</sub>: Módulo de elasticidad en flexión de la viga, MPa

D: Rigidez a la flexión de la viga, mm<sup>4</sup> MPa

D<sub>i</sub>: Rigidez a la flexión de la lámina, mm<sup>4</sup> MPa

e: Altura de las láminas, mm

b: Base de las láminas, mm

d: Distancia entre el eje neutro de la lámina y el eje neutro del laminado, mm

E: Módulo de elasticidad en tensión de la lámina, en MPa,

Apéndice VIII: Cálculos y valores observados mediante la aplicación de la TVL, para vigas I,

<b>Viga 1</b>	<b>E MPa</b>	<b>e (mm)</b>	<b>b (mm)</b>	<b>d (mm)</b>	<b>Di (mm<sup>4</sup> MPa)</b>
11	9.941	43,30	58,20	73,89	132.870.692.428
20	7.180	42,79	57,99	74,15	95.224.455.224
OSB	3.902	105,00	10,21	0,26	-3.844.317.870
<b>D (mm<sup>4</sup> MPa)</b>					<b>224.250.829.781</b>
<b>MOE (MPa)</b>					<b>7.690</b>

<b>Viga 2</b>	<b>E MPa</b>	<b>e (mm)</b>	<b>b (mm)</b>	<b>d (mm)</b>	<b>Di (mm<sup>4</sup> MPa)</b>
17	6.134	42,86	57,88	73,99	80.976.704.087
19	9.923	42,99	57,29	73,93	129.805.054.981
OSB	3.902	105,00	10,21	-0,06	-3.844.576.301
<b>D (mm<sup>4</sup> MPa)</b>					<b>206.937.182.766</b>
<b>MOE (MPa)</b>					<b>7.189</b>

<b>Viga 3</b>	<b>E MPa</b>	<b>e (mm)</b>	<b>b (mm)</b>	<b>d (mm)</b>	<b>Di (mm<sup>4</sup> MPa)</b>
13	10.840	42,74	57,81	74,19	143.352.729.660
8	6.093	43,39	57,55	73,87	80.628.174.370

OSB	3.902	105,00	10,21	-0,33	-3.844.150.650	
					<b>D (mm<sup>4</sup> MPa)</b>	<b>220.136.753.380</b>
					<b>MOE (MPa)</b>	<b>7.597</b>

Viga 4	E MPa	e (mm)	b (mm)	d (mm)	Di (mm <sup>4</sup> MPa)	
3	8.730	42,96	58,49	73,78	116.009.420.357	
15	6.594	42,55	57,78	73,98	86.278.597.326	
OSB	3.902	105,00	10,21	0,21	-3.844.414.639	
					<b>D (mm<sup>4</sup> MPa)</b>	<b>198.443.603.044</b>
					<b>MOE (MPa)</b>	<b>6.873</b>

Apéndice VIII: Cálculos y valores observados mediante la aplicación de la TVL, para vigas I, (continuación)

Viga 5	E Mpa	e (mm)	b (mm)	d (mm)	Di (mm <sup>4</sup> MPa)	
14	6.092	43	57,55	73,98	80.867.156.742	
8	8.250	43	57,94	74,19	109.861.775.698	
OSB	3.902	105	10,21	0,22	-3.844.392.408	
					<b>D (mm<sup>4</sup> MPa)</b>	<b>186.884.540.033</b>
					<b>MOE (MPa)</b>	<b>6.417</b>

Viga 6	E Mpa	e (mm)	b (mm)	d (mm)	Di (mm <sup>4</sup> MPa)	
10	6.877	43	58,06	74,07	92.339.185.019	
2	7.614	43	58,21	74,19	102.287.221.235	
OSB	3.902	105	10,21	0,13	-3.844.527.263	
					<b>D (mm<sup>4</sup> MPa)</b>	<b>190.781.878.991</b>
					<b>MOE (MPa)</b>	<b>6.486</b>

Viga 7	E Mpa	e (mm)	b (mm)	d (mm)	Di (mm <sup>4</sup> MPa)
16	6.610	42	58,09	73,89	86.536.428.131
1	12.931	43	57,95	73,72	169.359.339.562
OSB	3.902	105	10,21	-0,17	-3.844.464.494

						<b>D (mm<sup>4</sup> MPa)</b>	<b>252.051.303.199</b>
						<b>MOE (MPa)</b>	<b>8.792</b>
<b>Viga 8</b>	<b>E Mpa</b>	<b>e (mm)</b>	<b>b (mm)</b>	<b>d (mm)</b>	<b>Di (mm<sup>4</sup> MPa)</b>		
12	7.277	43	56,79	73,98	95.122.615.289		
5	7.953	43	58,23	74,15	106.299.511.415		
OSB	3.902	105	10,21	0,17	-3.844.464.494		
						<b>D (mm<sup>4</sup> MPa)</b>	<b>197.577.662.210</b>
						<b>MOE (MPa)</b>	<b>6.823</b>

Apéndice VIII: Cálculos y valores observados mediante la aplicación de la TVL, para vigas I, (continuación)

<b>Viga 9</b>	<b>E Mpa</b>	<b>e (mm)</b>	<b>b (mm)</b>	<b>d (mm)</b>	<b>Di (mm<sup>4</sup> MPa)</b>		
6	8.030	43	58,30	73,86	107.314.174.658		
4	7.846	43	58,14	74,13	104.120.232.151		
OSB	3.902	105	10,21	0,26	-3.844.304.303		
						<b>D (mm<sup>4</sup> MPa)</b>	<b>207.590.102.506</b>
						<b>MOE (MPa)</b>	<b>7.119</b>

<b>Viga 10</b>	<b>E Mpa</b>	<b>e (mm)</b>	<b>b (mm)</b>	<b>d (mm)</b>	<b>Di (mm<sup>4</sup> MPa)</b>		
9	7.849	43	58,49	74,06	105.412.500.904		
7	8.152	43	57,93	74,04	108.479.333.948		
OSB	3.902	105	10,21	-0,03	-3.844.590.032		
						<b>D (mm<sup>4</sup> MPa)</b>	<b>210.047.244.820</b>
						<b>MOE (MPa)</b>	<b>7.175</b>

Donde:

MOE<sub>V</sub>: Módulo de elasticidad en flexión de la viga, MPa

D: Rigidez a la flexión de la viga, mm<sup>4</sup> MPa

$D_i$ : Rigidez a la flexión de la lámina,  $\text{mm}^4 \text{MPa}$

e: Altura de las láminas, mm

b: Base de las láminas, mm

d: Distancia entre el eje neutro de la lámina y el eje neutro del laminado, mm

E: Módulo de elasticidad en tensión de la lámina, en MPa

Apéndice IX:  $\text{MOE}_V$  registrados para las vigas en el ensayo de flexión

Luz de ensayo: 2.800 mm

Viga Laminada	alto h (mm) promedio	base b (mm) promedio	Carga adicional aplicada P2 (N)	$\delta$ max	MOE (*) (MPa)
1	191,00	52,00	36,34	0,10	5.504,22
2	191,30	51,30	36,34	0,09	6.170,13
3	191,00	52,00	36,34	0,10	5.504,22
4	191,50	50,50	36,34	0,10	5.623,43
5	191,30	50,50	36,34	0,09	6.267,87
6	190,00	51,50	36,34	0,09	6.273,19
7	191,00	51,00	36,34	0,11	5.101,95
8	191,33	50,50	36,34	0,10	5.638,43
9	190,66	50,00	36,34	0,09	6.394,52
10	191,00	50,30	36,34	0,12	4.741,87
				<b>Promedio</b>	<b>5.721,98</b>
				<b>dev,est</b>	<b>548,89</b>

Viga I	alto h (mm) promedio	base b (mm) promedio	Carga adicional aplicada P2 (N)	$\delta$ max	MOE(*) (MPa)
1	189,00	58,09	36,34	0,11	5.250,58

2	189,00	57,58	36,34	0,12	4.868,17
3	189,00	57,68	36,34	0,12	4.844,24
4	189,00	58,13	36,34	0,12	4.843,00
5	189,00	57,74	36,34	0,12	4.827,05
6	189,00	58,14	36,34	0,11	5.219,79
7	189,00	58,02	36,34	0,10	5.842,57
8	189,00	57,51	36,34	0,11	5,292,52
9	189,00	58,22	36,34	0,09	6.412,62
10	189,00	58,21	36,34	0,10	6.139,82
				<b>Promedio</b>	<b>5.354,04</b>
				<b>dev,est</b>	<b>581,57</b>

Apéndice IX: MOE<sub>V</sub> registrados para las vigas en el ensayo de flexión (continuación)

Luz de ensayo: 2.800 mm

<b>Viga sólida</b>	<b>alto h (mm) promedio</b>	<b>base b (mm) promedio</b>	<b>Carga adicional aplicada P2 (N)</b>	<b>δ max</b>	<b>MOE(*) (MPa)</b>
1	181,30	42,00	36,34	0,14	5.691,52
2	181,30	42,00	36,34	0,17	4.687,13
3	182,30	41,66	36,34	0,16	4.938,55
4	182,30	41,66	36,34	0,13	6.078,22
5	182,33	41,00	36,34	0,19	4.223,64
6	182,33	42,00	36,34	0,16	4.896,16
7	180,66	41,66	36,34	0,15	5.412,56
8	180,10	41,33	36,34	0,15	5.506,52
9	179,27	41,66	36,34	0,19	4.373,36
10	178,43	42,00	36,34	0,18	4.643,54
				<b>Promedio</b>	<b>5.045,12</b>
				<b>dev,est</b>	<b>603,88</b>

Luz de ensayo: 2.800 mm,



Nota

(\*) El MOE detallado en este apéndice fue obtenido a partir de la expresión 4,

Apéndice X: Datos de origen del experimento estadístico de vigas I

Viga I	Ensayo de flexión	TVL
1	5.251	7.690
2	4.868	7.189
3	4.844	7.597
4	4.843	6.873
5	4.827	6.417
6	5.220	6.486
7	5.843	8.792
8	5.293	6.823
9	6.413	7.119
10	6.140	7.175

**Promedio**                      **5.354**                      **7.216**

T.                      53.540                      72.161  
T = 125.701  
STC = 24.688.306  
SCTR = 17.336.006  
SCE = STC-SCTR = 7.352.300

Donde:

T<sub>i</sub>: Suma de cada tratamiento

T: Suma de los tratamientos

STC: Suma total de cuadrados

SCTR: Suma de los cuadrados de los tratamientos

SCE: Suma de los cuadrados de los errores

Apéndice XI: Datos de origen del experimento estadístico de vigas laminadas

Viga Laminada	Ensayo de flexión	TVL
1	5.504	10.097
2	6.170	9.740
3	5.504	10.350
4	5.623	10.359
5	6.268	9.886
6	6.273	10.634
7	5.102	9.946
8	5.638	9.901
9	6.395	10.701
10	4.742	10.182
<b>Promedio</b>	<b>5.722</b>	<b>10.180</b>

$$\begin{aligned} T &= 57.220 & 101.791 \\ T &= 159.015 \\ STC &= 103.016.667 \\ SCTR &= 99.347.983 \\ SCE &= STC - SCTR = 3.668.684 \end{aligned}$$

Donde:

T,: Suma de cada tratamiento

T: Suma de los tratamientos

STC: Suma total de cuadrados

SCTR: Suma de los cuadrados de los tratamientos

SCE: Suma de los cuadrados de los errores

Apéndice XII: Datos de origen del experimento estadístico de vigas I, vigas laminadas y vigas solidas de madera de pino radiata,

Viga N°	Vigas I	Vigas laminadas	Vigas testigo
1	5.251	5.504	5.692
2	4.868	6.170	4.687
3	4.844	5.504	4.939
4	4.843	5.623	6.078
5	4.827	6.268	4.224
6	5.220	6.273	4.896
7	5.843	5.102	5.413
8	5.293	5.638	5.507
9	6.413	6.395	4.373
10	6.140	4.742	4.644
Promedio	5.354	5.722	5.045

T. 53.540                      57.222                      50.450  
T = 161.211  
STC = 11.334.219  
SCTR = 2.296.519  
SCE = STC-SCTR = 9.037.699

Donde:

T<sub>i</sub>: Suma de cada tratamiento

T: Suma de los tratamientos

STC: Suma total de cuadrados

SCTR: Suma de los cuadrados de los tratamientos

SCE: Suma de los cuadrados de los errores

Apéndice XIII: Prueba de Scheffé aplicada al ensayo de flexión,

Se proponen los siguientes contrastes de interés:

$$L_1 = \mu_1 - \mu_2 \quad , \quad L_2 = \mu_1 - \mu_3 \quad , \quad L_3 = \mu_2 - \mu_3$$

Donde:

$\mu_1$ : Media observada para vigas I en el ensayo de flexión,

$\mu_2$ : Media observada para vigas laminadas en el ensayo de flexión,

$\mu_3$ : Media observada para vigas solidas de pino radiata en el ensayo de flexión

Determinación del intervalo de confianza ( $I_c$ ) para  $L_1$ :

Recuérdese que el primer contraste es:  $L_1 = \mu_1 - \mu_2$

Del subcapítulo 3,3,3, se tiene que el CME es igual a 334,730, luego se tiene que:

$$\bar{y}_{.1} = 5.354 \text{ e } \bar{y}_{.2} = 5.722$$

$$\therefore \hat{L}_1 = 5.354 - 5.722$$

$$\hat{L}_1 = -368$$

La varianza estimada es:  $s^2(\hat{L}) = CME \sum_{j=1}^k \frac{c_j^2}{n_j}$

Donde:

$c_j$  son constantes tales que  $\sum_{j=1}^k c_j = 0$

$n_j$  es tamaño de las muestras

$$s^2(\hat{L}) = 334.730 * \left[ \frac{1^2}{10} + \frac{(-1)^2}{10} \right]$$

Apéndice XIII: Prueba de Scheffé aplicada al ensayo de flexión, (continuación)

$$s^2(\hat{L}) = 63.105 \Rightarrow s(\hat{L}) = \sqrt{63.105} = 251,2$$

Dado que  $f_{0,95;2;27} = 3,35$ , se tiene que A es igual a:

$$A = \sqrt{3,35 * 2} = 2,59$$

Se tiene que el intervalo de confianza es:

$$I_c \hat{L}_1 = -368 \pm 251,2 * 2,59$$

$$I_c \hat{L}_1 = -368 \pm 650,6$$

$$\therefore I_c \hat{L}_1 = (-1,018,6 ; 282,6)$$

Determinación del intervalo de confianza ( $I_c$ ) para  $L_2$ :

El segundo contraste a evaluar es:  $L_2 = \mu_1 - \mu_3$

$$\bar{y}_{.1} = 5.354 \text{ e } \bar{y}_{.3} = 5.045$$

$$\begin{aligned}\therefore \hat{L}_2 &= 5.354 - 5.045 \\ \hat{L}_2 &= 309\end{aligned}$$

La varianza estimada es:  $s^2(\hat{L}) = CME \sum_{j=1}^k \frac{c_j^2}{n_j}$

$$s^2(\hat{L}) = 334.730 * \left[ \frac{1^2}{10} + \frac{(-1)^2}{10} \right]$$

$$s^2(\hat{L}) = 63.105 \Rightarrow s(\hat{L}) = \sqrt{63.105} = 251,2$$

Dado que  $f_{0,95;2;27} = 3,35$ , se tiene que A es igual a:

$$A = \sqrt{3,35 * 2} = 2,59$$

Se tiene que el intervalo de confianza es:

Apéndice XIII: Prueba de Scheffé aplicada al ensayo de flexión, (continuación)

$$I_c \hat{L}_2 = 309 \pm 251,2 * 2,59$$

$$I_c \hat{L}_2 = 309 \pm 650,6$$

$$\therefore I_c \hat{L}_2 = (-341,6 ; 959,6)$$

Determinación del intervalo de confianza ( $I_c$ ) para  $L_3$ :

El tercer y último contraste por evaluar es:  $L_3 = \mu_2 - \mu_3$

$$\bar{y}_{.2} = 5.722 \text{ e } \bar{y}_{.3} = 5.045$$

$$\begin{aligned}\therefore \hat{L}_3 &= 5.722 - 5.045 \\ \hat{L}_3 &= 677\end{aligned}$$

La varianza estimada es:  $s^2(\hat{L}) = CME \sum_{j=1}^k \frac{c_j^2}{n_j}$

$$s^2(\hat{L}) = 334.730 * \left[ \frac{1^2}{10} + \frac{(-1)^2}{10} \right]$$

$$s^2(\hat{L}) = 63.105 \Rightarrow s(\hat{L}) = \sqrt{63.105} = 251,2$$

Dado que  $f_{0,95;2;27} = 3,35$ , se tiene que A es igual a:

$$A = \sqrt{3,35 * 2} = 2,59$$

Se tiene que el intervalo de confianza es:

$$I_c \hat{L}_3 = 677 \pm 251,2 * 2,59$$

$$I_c \hat{L}_3 = 677 \pm 650,6$$

$$\therefore I_c \hat{L}_3 = (26,4 ; 1,327,6)$$

Anexo I: Especificaciones técnicas adhesivo resorcinol formaldehido utilizado en este estudio

## Precaución:

Las resinas y endurecedores DYNOCHEM son prácticamente de uso inofensivo siempre que se observen las precauciones habituales para el manejo de sustancias químicas. Por ejemplo, de ningún modo se puede permitir que los materiales no curados entren en contacto con alimentos o utensilios de cocina. Asimismo, se deben tomar medidas para evitar que los materiales no curados entren en contacto con la piel, dado que podrían afectar a personas con piel particularmente sensible. En general resulta necesario utilizar guantes de goma o plástico impermeable, y también protección para los ojos. Al finalizar cada jornada de trabajo es imprescindible lavar exhaustivamente la piel con agua tibia y jabón. Se debe evitar el uso de solventes. Para secar la piel se deben usar toallas de papel (no de tela) descartables. Se recomienda contar con ventilación adecuada en el área de trabajo. Estas precauciones se describen con mayor detalle en el Manual de DYNOCHEM N° AD 2 "Precauciones para el Manejo de Productos a Base de Formaldehído, Emulsiones Vinílicas y Adhesivos de Fusión en Caliente" (HOT MELT), y en las hojas de "Datos de Seguridad del Material" de cada producto en sí. Tal literatura se encuentra a disposición de quien la solicite, y se la deberá consultar para una mayor información.

**Aerodux 185, Endurecedor HRP 150 y HRP 155** - Estos materiales deben manejarse con cuidado: evitar todo contacto con la piel o los ojos. Si se produce contacto entre el endurecedor y los ojos, se los deberá lavar bien con agua corriente manteniendo los párpados abiertos, y se deberá procurar atención médica inmediata. Si la ropa o la piel entran en contacto con los materiales sin curar se deberá lavar bien la zona de piel afectada con agua tibia y jabón, y se deberá quitar las prendas contaminadas y lavarlas antes de volverlas a usar. Evitar inhalar las emanaciones del Aerodux 185 y el polvo de los endurecedores. Se recomienda contar con ventilación adecuada en el área de trabajo. Tanto el Aerodux 185 como sus vapores son inflamables. De deben tomar las precauciones debidas para evitar cualquier peligro de incendio posible. Mantener los materiales no curados fuera del alcance de llamas sin protección, calentadores eléctricos, etc, y cerrar firmemente los envases de resina cuando no se encuentren en uso. En caso de que la resina entre en combustión se debe utilizar un extinguidor de agua nebulizada, dióxido de carbono o polvo seco.



# **®Aerodux 185 con Endurecedores HRP.150 o HRP.155**

## **Adhesivo de Resorcinol-Fenol-Formaldehido**

La mezcla de la resina líquida de resorcinol-fenol-formaldehido Aerodux 185 con el Endurecedor en polvo HRP.150 o HRP.155 produce adhesivos de fraguado a temperatura ambiente, resistente a la intemperie, y capaces de rellenar intersticios entre superficies. Estos adhesivos también resultan apropiados para la producción de estructuras compuestas resistentes al calor, como por ejemplo, las puertas resistentes al fuego.

Una vez totalmente curada, la combinación del Aerodux 185 y los Endurecedores HRP es resistente a los ácidos, álcalis livianos, solventes y agua hirviendo.

El Aerodux 185 resulta adecuado para encolar a sustratos porosos una amplia gama de materiales, entre los cuales se encuentran:

Maderas, maderas mejoradas o densificadas, tal como el "Hydulignum".

Paneles de fibra mineral reforzada, ladrillo, hormigón, porcelana sin esmaltar. Plásticos rígidos expandidos, tal como poliestireno, ebonita, poliuretano y PVC expandidos.

Laminados industriales y decorativos (a base de o con revestimiento interior de resina fenólica).

Cuero, corcho, linóleo y nylon.

El Aerodux 185 también puede utilizarse para encolar caucho natural o sintético (a excepción del caucho silicónico), y láminas metálicas a la madera (Ver "Preparación de los Materiales para el Encolado").

## Especificaciones

La mezcla de la resina líquida de resorcinol-fenol-formaldehído Aerodux 185 con el Endurecedor en polvo HRP.150 o HRP.155 cumple con las normas BS 1204: Parte 1 y2 (Tipo WBP), BS 1203 (Tipo WBP), DIN 68 141, y DIN 68 705 (AW 100). También cuentan con aprobación según las normas DIN 1052 para la fabricación de elementos de construcción para soportar carga, y de la FMPA, Stuttgart, para la fabricación de elementos para la construcción de estructuras.

Estos adhesivos también resultan apropiados para la producción de estructuras compuestas resistentes al calor, como por ejemplo, puertas resistentes al fuego.

## Propiedades típicas de Aerodux 185

Aspecto .....	líquido marrón-rojizo
Viscosidad a 25°C .....	0,25 - 0,50 Pa s (2,5 - 5,0 poises)
Densidad a 25°C .....	1,14 - 1,16
Contenido de sólidos .....	57 ±2%
pH.....	7,0-8,0
Punto de inflamación.....	52°C

## Instrucciones de uso

### Elección del endurecedor

El endurecedor HRP 150 produce una mezcla de cola de alta viscosidad que seca con mayor rapidez que las mezclas que contienen el endurecedor HRP 155. Se recomienda su uso en uniones que requieran una mezcla más viscosa para limitar el flujo, por ejemplo, para líneas de cola gruesas, superficies irregulares, etc.

El endurecedor HRP 155 produce una mezcla de cola de viscosidad media que resulta adecuada para la mayoría de las aplicaciones de encolado, y en especial para las estructuras de madera. Esta mezcla de cola tolera tiempos de ensamblaje más prolongados que la mezcla con el HRP 150.

### Mezclas

Las proporciones de mezcla son iguales para ambos endurecedores:

	<b>Partes por peso</b>
Aerodux 185	100
Endurecedor HRP 150 o HRP 155	20

### Viscosidad de la mezcla:

La viscosidad a 20°C, 15-20 minutos después de la mezcla, es la siguiente:

Aerodux 185 + HRP 150	8-10 Pa s (80-100 poises)
Aerodux 185 + HRP 155	4,5-6 Pa s (45-60 poises)

### Uso de diluentes

Se puede añadir polvo de madera o ciertos tipos de relleno mineral para aumentar la viscosidad y reducir el costo de la cola.

Anexo I: Especificaciones técnicas adhesivo resorcinol formaldehído utilizado en este estudio (continuación)

## Mezcla con poco relleno

	<b>Partes por peso</b>
Aerodux 185	100
Endurecedor HRP	20
Caolín	20

## Mezcla con mucho relleno

	<b>Partes por peso</b>
Aerodux 185	100
Endurecedor HRP	20
Caolín	100

La mezcla con poco relleno sigue cumpliendo con las exigencias de las normas BS 1204: Parte 1 y 2 (Tipo WBP) y BS 1203 (Tipo WBP), pero tal vez resulte necesario ajustar la viscosidad de la mezcla con mucho relleno mediante el añadido de agua, siempre que tal sea mantenido a un mínimo. Esta mezcla es apropiada para encolar láminas con superficie irregular, tales como paneles a base de fibra mineral reforzada; y cuando no resultan necesarias las máximas propiedades y resistencia a la intemperie.

## Procedimiento de mezcla

Agregar el endurecedor a la resina y mezclar hasta que el endurecedor quede totalmente disperso. Luego, si resulta necesario, añadir la sustancia de relleno mezclándola bien con la combinación de resina-endurecedor.

## Tiempo de uso (Pot Life) (Ver tabla 1)

La resina y el endurecedor se conservan en condiciones de uso durante los tiempos aproximados indicados en la tabla 1.

## Preparación de los materiales para el encolado

### Preparación de las superficies

Las superficies a encolar deben encontrarse libres de polvo u otra suciedad. La madera, paneles, laminados, etc., deben contar con un espesor uniforme. Las superficies a encolar, con la excepción de los plásticos expandidos y los paneles a base de fibra mineral reforzada, también deben lijarse a fondo.

Las superficies metálicas deben ser desgastadas, desengrasadas, y revestidas con Imprimador L.62 antes de encolarlas a materiales porosos (tal como madera). Referirse a las indicaciones en la Hoja de Instrucciones N° AD 4 de Dynochem.

### Contenido de humedad

Para obtener resultados satisfactorios el contenido de humedad de las superficies a encolar debe ser de entre un 6 y un 25%, pero para obtener óptimos resultados es preferible un contenido de entre un 12 y un 16%. Para reducir el contenido de humedad a un 16% o una cifra inferior a ésta es necesario utilizar un método de secado artificial. El contenido de humedad de las superficies adyacentes no debe diferir en más de un 3%.

Anexo I: Especificaciones técnicas adhesivo resorcinol formaldehído utilizado en este estudio (continuación)

## **Efecto del tratamiento con sustancias preservantes**

### **Encolado de la madera tratada con sustancias preservantes**

Antes de encolar madera tratada con agentes preservantes se deben maquinar o lijar todas las superficies. También se debe verificar el contenido de humedad de la caras a unir ya que tal puede haber aumentado a niveles inadmisibles a raíz del uso de agentes preservantes a base de agua, siendo necesario reducirlo antes del encolado. Mayor asesoramiento sobre el encolado de madera tratada con agentes preservantes se encuentra a disposición de quienes así lo soliciten.

### **Tratamiento con sustancias preservantes después del encolado**

Las vigas y demás componentes deben acondicionarse durante un período mínimo de 7 días a no menos de 15°C antes de ser sometidos a tratamiento con agentes preservantes a base de agua en cilindros a presión.

## **Aplicación**

### **Proporciones**

Aplicar una capa uniforme de adhesivo a ambas superficies a encolar en una proporción de aproximadamente 225 gramos por metro cuadrado.

### **Ensamblaje abierto/cerrado (Ver tabla 2)**

Cuando se encolan grandes superficies de un material impermeable es importante permitir un tiempo suficiente de ensamblaje abierto. No obstante, para la mayoría de las aplicaciones es aconsejable limitar el tiempo previo al ensamblaje a 5 minutos como máximo.

Se debe unir las superficies y aplicar la presión final según los tiempos indicados en la tabla 2.

Estas cifras representan tiempos promedio. El endurecedor HRP 155 puede permitir tiempos un poco más prolongados. Si bien el adhesivo puede rellenar intersticios, es importante aplicar la presión suficiente para obtener un contacto firme. Es imprescindible unir las superficies antes de que la cola fragüe.

### **Control de la dosis para contrarrestar el secado anticipado**

El problema conocido con el nombre de "secado anticipado" depende principalmente de la humedad relativa, la temperatura, y el espesor de la capa de cola. En condiciones de temperatura ambiente elevada y baja humedad relativa tal vez resulte necesario utilizar una dosis mayor para limitar el secado anticipado. Bajo condiciones medias (65% H.R. y 18°C) basta con aplicar una dosis de aproximadamente 225 gramos por metro cuadrado en cada cara de la unión.

## **Prensado o sujeción**

### **Prensado en frío (Ver tabla 3)**

La tabla 3 señala los períodos mínimos de aplicación de presión. El Aerodux 185 no fragua en forma adecuada por debajo de los 10°C.

### **Prensado en caliente (Ver tabla 4)**

La prensa debe cargarse y cerrarse lo más rápido posible para evitar un fraguado prematuro. Los tiempos básicos de fraguado están indicados en la tabla 4.

Anexo I: Especificaciones técnicas adhesivo resorcinol formaldehido utilizado en este estudio (continuación)

## **Penetración de calor (ver tabla 5)**

Los tiempos básicos de fraguado señalados sólo se refieren a las temperaturas de las líneas de cola y es preciso prever un margen para que el calor se desplace desde la fuente de calor. El tiempo de penetración del calor varía según la densidad de la madera, el contenido de humedad y la distancia hasta la línea de cola más remota. La tabla 5 es una guía para el tiempo adicional requerido por la madera de baja y media densidad.

Los tiempos de prensado se aplican al encolado de materiales absorbentes tales como la madera de baja y media densidad. El tiempo de prensado se debe extender en forma considerable al encolar materiales menos absorbentes.

## **Calentamiento con alta frecuencia**

Los adhesivos de resorcinol se calientan con menor rapidez que las resinas de UF, ya sea en condiciones generales o en la línea de cola, pero el fraguado puede acelerarse mediante el agregado de sal común (cloruro de sodio) en una proporción de 1-2 partes en peso de sal hasta 100 partes en peso de resina. Es preciso tomar precauciones contra la proyección de chispas que pueden dar lugar a vías conductoras y chamuscado en la línea de cola. Las chispas pueden evitarse a través de una menor capa de cola, un bajo contenido de humedad y un buen diseño de plantilla, para asegurar que no se produzcan bolsas de aire entre el electrodo y la línea de cola; y mediante una presión uniforme sobre la unión durante el curado.

## **Limpieza del equipo**

Los mezcladores, dispersores, etc., deben lavarse con agua tibia. El uso de una solución de soda para lavar disuelta en agua tibia ayudará a eliminar los residuos más persistentes. El equipo debe limpiarse antes de que la cola tenga tiempo de fraguar. Para mayor información referirse al Manual de Seguridad Dynochem AD2.

## **Notas**

### **Acelerador para usar con el Aerodux 185**

Se dispone de un acelerador (XDF 694) que a veces puede utilizarse para aumentar la velocidad de curado a bajas temperaturas ambientes, y para acelerar el curado con alta frecuencia o prensado en caliente. A solicitud de los interesados nuestro Departamento Técnico se complacerá en discutir el tema en mayor detalle.

### **Manchas en láminas absorbentes**

Los paneles absorbentes de color claro, por ejemplo, los paneles de cemento reforzados con fibras minerales, y encolados con adhesivos de resorcinol-fenol-formaldehído, pueden tender a presentar señales de manchado cuando se los expone a la intemperie o a condiciones muy húmedas. Esto se debe a que determinadas materias solubles en la resina sin curar son absorbidas y retenidas por el panel, y pueden posteriormente separarse por lixiviación. Tales materias aparecen en forma de manchas oscuras en la superficie del tablero, pero desaparecen con una mayor exposición a la intemperie.

## **Almacenaje**

La resina y los endurecedores deben almacenarse por separado en un lugar fresco (preferentemente 5-20°C) y seco. Bajo estas condiciones, la vida útil mínima del Aerodux 185 es de 18 meses, mientras que la de los endurecedores HRP 150 y HRP 155 es de 3 años.

**Nota:** A una temperatura de 25°C el Aerodux 185 cuenta con una vida útil de 12 meses.

Anexo I: Especificaciones técnicas adhesivo resorcinol formaldehído utilizado en este estudio (continuación)

## Presentaciones disponibles

El Aerodux 185 y los endurecedores HRP 150 y HRP 155 se encuentran disponibles en las siguientes cantidades:

**Aerodux 185:** Tambor con tapa hermética de 225 kg y 25 kg; lata de 5 kg y 1 kg

**Endurecedor HRP 150:** bolsa de papel con revestimiento interior de polietileno de 20 kg y 5 kg.

**Endurecedor HRP 155:** bolsa de papel con revestimiento interior de polietileno de 25 kg y 5 kg.

### Tabla 1 - Tiempo de uso (Pot Life)

Temperatura de la mezcla	10°C	15°C	20°C	25°C	30°C
Período de uso (en horas)	6-8	4-5	2-3	1-2	¾-1

### Tabla 2 - Ensamblaje abierto/cerrado

Temperatura de la línea de cola	10°C	15°C	20°C	25°C	30°C
Tiempo de ensamblaje cerrado (horas)	2½	1½	1	½	¼

### Tabla 3 - Prensado en frío

Temperatura de la línea de cola	10°C	15°C	20°C	25°C	30°C	35°C	40°C
Período mínimo de prensado o sujeción (horas)	12	6	4	2½	1½	1¼	1

**Nota:** Los tiempos mínimos de prensado o sujeción indicados son los necesarios para brindar una carga de rotura en seco de 1,33 kN en las juntas cerradas conforme a normas BS 1204: Parte 2. Para las maderas de alta densidad o alto contenido de humedad, o en los casos en que la unión es factible de sufrir deformación inmediatamente después de haber eliminado la presión (por ejemplo, en la fabricación de componentes curvos), se debe incrementar los tiempos mencionados. Las colas con Aerodux siguen ganando solidez pero no desarrollan una completa resistencia al agua sino hasta después de varios días.

### Tabla 4 - Prensado en caliente

Temperatura de la línea de cola	50°C	60°C	70°C	80°C	90°C	100°C
Período básico de fraguado (minutos)	30	15	7	3-4	2-3	1½

### Tabla 5 - Penetración del calor

Distancia de la Línea de cola	Período de penetración de calor en minutos por distancia en mm hasta la línea de cola				
	80°C	90°C	100°C	110°C	120°C
Menos de 5 mm	1,2	1,0	0,9	0,8	0,8
5 - 10 mm	1,7	1,4	1,2	1,1	1,0
Más de 10 mm	2,0	1,7	1,4	1,3	1,2