

# PROPIEDADES MECÁNICAS DE ELEMENTOS LAMINADOS CLAVADOS

## MECHANIC PROPERTIES OF NAIL LAMINATED TIMBER ELEMENTS

Thomas Tannert<sup>1</sup>, Cecilia Poblete<sup>2</sup> y Genaro Gotelli<sup>3</sup>

### RESUMEN

El artículo trata de un proyecto relacionado con elementos laminados clavados. El sistema consiste en clavar tablas de madera, puestas de canto. Este sistema ha logrado una posición importante en Europa, pero aún no ha sido introducido al mercado chileno. Ensayos preliminares de uniones clavadas confirmaron la validez de la normativa para calcular la carga admisible y el módulo de corrimiento. Se determinaron y analizaron la resistencia y la rigidez de piezas compuestas con distintos esquemas de clavado sometidas a ensayos de corte. Los valores obtenidos se ajustan satisfactoriamente a los valores calculados teóricamente por norma.

Se fabricaron muestras de placas laminadas clavadas determinándose la influencia de las uniones de tope en ensayos de flexión, la resistencia bajo solicitaciones horizontales y la efectividad de diferentes maneras de reforzar el sistema. Los paneles fabricados para el estudio cumplen con las exigencias de la normativa chilena y pueden ser considerados adecuados para la construcción de viviendas. La especie maderera elegida para el estudio fue el *Pinus radiata*. En consecuencia, el presente trabajo es un apoyo para la introducción del concepto de elementos laminados clavados y sus resultados experimentales presentan una base para futuras investigaciones.

**Palabras claves:** Elementos laminados clavados, Uniones clavadas, Capacidad de carga, Módulo de corrimiento, *Pinus radiata*

### ABSTRACT

The article explains a project dedicated to the study of nail laminated timber elements that consist in nailing together individual boards over their whole lengths. The system has taken an important position in Europe but has not yet been introduced to the Chilean market. Preliminary tests with nailed joints proved the predictions of the norms regarding the bearing capacity and the slip modulus to be right. The initial slip modulus and bearing capacity of different nailing schemes was determined and analyzed with shear tests. The results show satisfactory coincidence with the values calculated theoretically.

<sup>1</sup>Magíster en Ciencia y Tecnología de la madera. Ingeniero civil con mención en construcciones en madera

<sup>2</sup>Profesor Asociado. Depto. Cs. de la Construcción. Fac. Arquitectura. Universidad del Bío-Bío.

<sup>3</sup>Profesor Asistente. DIMAD. Fac. Ingeniería. Universidad del Bío-Bío. ✉:jgotelli@ubiobio.cl

Samples of nail laminated elements were produced and the influence of bun joints in bending strengths, the stiffness under horizontal loading and the effectiveness of enforcements of panels were analyzed. The panels fabricated met the requirements of the Chilean standard and can be considered suitable for the construction of houses. The timber used was radiata pine because of the great volume available in Chile. Consequently, the present investigation is a first intend to introduce the concept of nail laminating and the experimental results are a base for further investigations.

**Key words:** Nail laminated timber, nailed joints, bearing capacity, slip modulus, radiata pine

## INTRODUCCIÓN

El concepto de placas clavadas no es nuevo, de hecho es un sistema de construcción con una larga tradición. En Europa todavía existen casas de varios cientos de años construidas de un modo similar y a comienzos del siglo XX se aplicó el sistema en EE.UU. Pero sólo en los últimos años las placas entabladas comenzaron a tener nueva popularidad y se ha vuelto a retomar el sistema en la construcción. Hay que mencionar al Profesor Natterer en Suiza quien ha mejorado el sistema y ha despertado gran interés en el sector de la construcción en madera.

Las placas entabladas están conformadas por tablas individuales de madera de calidad corriente de un espesor de 24 a 60 mm. Posterior al secado al 15 % (+/-3 %) se unen puestas de canto, y se clavan a una distancia convenida (ver figura 1). Para paredes se usan placas de 8 a 12 cm de ancho, para losas de 12 a 24 cm de ancho. El ancho final de las placas se determina por la facilidad de manejo en obra y su transporte.

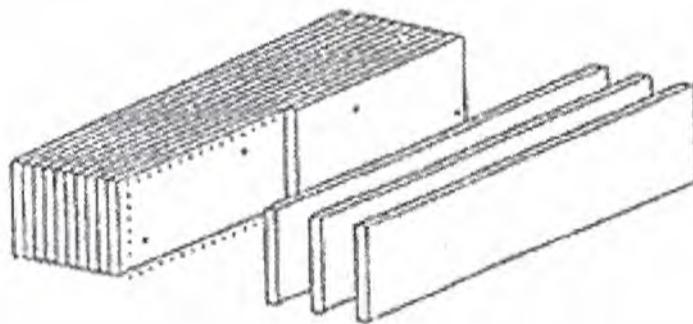
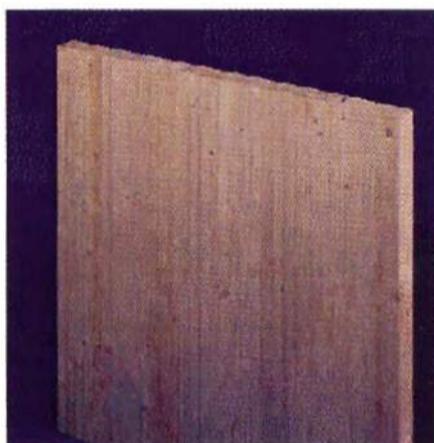


Figura 1: Foto y esquema de elementos entablados clavados (CHERET et al, 2000)

Entre las ventajas de las placas entabladas cabe mencionar, buena flexibilidad y estéticamente agradable, bajo costo de construcción, posibilidad de pre-fabricación, buena aislación acústica y térmica tanto en invierno como en verano, buena resistencia al fuego, uso de entrepisos en cualquier otro sistema constructivo con espesores mínimos, buen soporte para cargas concentradas, buena resistencia a golpes concentrados y excelente calidad desde el punto de vista ecológico.

Desde el punto de vista estructural y de la física de la construcción, así como sus posibles formas estéticas, permiten considerar Cste como un producto nuevo. Los indicadores mecánicos y

los valores físicos de la madera maciza aserrada son conocidos, pero al separar la madera maciza conformando tablas y uniéndolas por medio de elementos relativamente flexibles cambian sus características. Por ese motivo su aplicación en cada caso es sólo experimental, debido a que a la fecha existe muy poca información basada en investigaciones y no se ha normado completamente su aplicación (JUNG, 1999).

El programa experimental se desarrolló en el Pabellón de Tecnología en Maderas (PTM) de la Universidad del Bío Bío y comprendió cuatro etapas:

- Ensayos preliminares con probetas clavadas
- Ensayos de cizalle (corte)
- Ensayos con placas compuestas solicitadas perpendicularmente a su plano principal
- Ensayos con placas compuestas solicitadas contenidas en su plano principal

## OBJETIVOS

El objetivo general del trabajo fue verificar experimentalmente algunas propiedades mecánicas de los elementos laminados clavados para caracterizar técnicamente dichos elementos en la construcción de viviendas, como losas de entresijos y paredes soportantes.

Los objetivos específicos fueron los siguientes:

- Determinar experimentalmente el comportamiento mecánico del sistema mediante el ensayo de probetas de elementos laminados con distintos esquemas de clavado en ensayos de cizalle, analizando estadísticamente su resistencia y rigidez
- Fabricar muestras de placas laminadas clavadas y determinar su comportamiento mecánico con ensayos de flexión, compresión y flexión en diferentes planos.
- Comprobar el comportamiento de las placas laminadas clavadas con las exigencias de la normativa vigente en Chile.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Según la norma NCh 806 "Clasificación y requisitos de paneles prefabricados" las placas entabladas se clasifican en el Tipo VI (Monolítico sin revestimiento) y la Clase C (Madera). Los paneles deben cumplir con los requisitos mecánicos que se determinen mediante los ensayos establecidos en las normas NCh 801 - NCh 805. Los paneles se clasificarán de acuerdo a su comportamiento bajo cargas horizontales (RH) y de flexión (RT) en grados y subgrados.

En la norma EC 5 están considerados distintos modos de falla para definir la capacidad de carga de uniones clavadas. La recomendación de la norma E DIN 1052 es conseguir tipos de falla donde aparecen dos rótulas plásticas por cizalle en el clavo, lo que permite usar la ecuación 1 como única ecuación para el cálculo de la capacidad de carga de un plano de cizalle de un clavo solicitado perpendicular a su eje.

$$R_k = \sqrt{2M_{y,k} f_{h,k} D} \quad [N] \quad (1)$$

**Donde:**

- $R_k$  : Resistencia cizalle simple de un clavo [N]
- $M_{y,k}$  : Momento plástico del clavo [Nmm]
- $f_{h,k}$  : Tensión de aplastamiento de la madera [N/mm<sup>2</sup>]
- $D$  : Diámetro del clavo [mm]

El módulo de corrimiento  $C$  de los clavos expresa la fuerza requerida para imprimirle un corrimiento unitario a la unión, y de esta manera caracteriza su rigidez. Según la norma NCh 1198 se puede aplicar la ecuación 2 para calcular el módulo de corrimiento para clavos solicitados a cizalle simple sin perforación guía.

$$C_{CM} = 5 * \frac{P_{ad}}{D} \quad (2)$$

**Donde:**

- $CCM$  = Módulo de corrimiento según norma NCh-1189 [N/mm]
- $P_{ad}$  : Carga admisible del clavo [N]
- $D$  : Diámetro del clavo [mm]

La norma EN 26891 (Determinación del módulo de corrimiento y de la capacidad de uniones mecánicas) recomienda considerar la parte lineal del diagrama carga-deformación entre la carga nula y 40% de la carga admisible. La norma establece la ecuación 3 para calcular el módulo de corrimiento inicial.

$$C_i = \frac{0,4 * F_{max}}{v_i} \quad (3)$$

**Donde:**

- $C$  : Módulo de corrimiento según norma EN 26891 [N/mm]
- $F_{max}$  : Fuerza máxima [N] (promedio de todas las prbbetas de una serie de experimentos)
- $v_i$  : Deformación inicial [mm]  $v_i = v_{04}$

En la presente investigación se ha considerado como medio de unión el clavo liso, tipo A (según la norma NCh 1269), de cabeza plana circular sin tratamiento superficial, por su amplia difusión en la construcción habitacional. Los diámetros utilizados fueron de  $D = 3,3$  y  $4,2$  mm. Se utilizó madera de la especie de *Pinus radiata*. La madera estaba disponible en los laboratorios de la Universidad del Bío-Bío. No fue clasificada estructuralmente.

Los resultados experimentales del presente trabajo se analizaron estadísticamente utilizando el programa STATGRAFICS, aplicando el procedimiento de pruebas de hipótesis. El programa entrega como resultado un valor  $p$ . Cuando éste es menor a 0,05 se debe rechazar la hipótesis nula, para valores mayores no se puede rechazar.

Se definen las resistencias mínimas probables (características)  $R_k$ , como aquellos valores que corresponden al fractil de rechazo permitido. Para el caso de distribuciones normales se establece la ecuación 4, la cual es válida para estimar resistencias del fráctil 5% a flexión, cizalle y otros (YÁÑEZ, 1995).

$$R_{mp} = \bar{X} - 1,645 * S \quad (4)$$

Debe considerarse, que para aplicar la ecuación 4 se requiere de un gran número de ensayos, lo que por razones de costo casi nunca sucede. Cuando el número de ensayos es reducido se debe usar un valor mayor a 1,645. En el presente trabajo se decidió utilizar el valor 1,645 independientemente del número de réplicas.

### Ensayos preliminares

El objetivo de los ensayos preliminares fue determinar la rigidez y la resistencia de las uniones clavadas para avalar los resultados de las etapas siguientes. Se fabricaron seis probetas de tres lamelas de madera unidas mediante seis clavos de 4,2 mm de diámetro y 100 mm de largo. Las dimensiones de las lamelas eran 5x10x30cm, los espaciamentos entre los clavos fue de 10 cm, la distancia al borde 5 cm y la penetración del clavo 50 mm. Tanto los espaciamentos entre los clavos como la penetración de ellos cumplen con las exigencias de la NCh-1198. La figura 2 muestra un esquema y una foto de los ensayos preliminares.

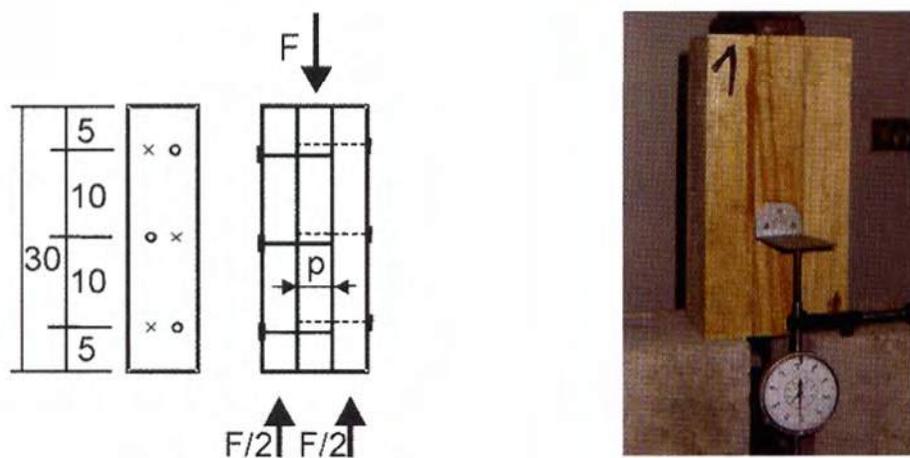


Figura 2: Esquema de ensayo preliminar

Los ensayos se realizaron en el Pabellón de Tecnología de la Madera (PTM) de la Universidad del Bío-Bío. Se utilizó una máquina universal de ensayos con una carga máxima de 50 kN. Las deformaciones se anotaron manualmente con un extensómetro mecánico. Las probetas se colocaron en el dispositivo, soportadas sobre dos bloques de hormigón y el extensómetro se fijó a la lamela central. Se aplicó la carga de manera semi-estática, aumentándola continuamente con una velocidad de 1 mm/min hasta alcanzar una deformación de 6 mm (ver figura 2).

### Ensayos de corte

El objetivo de esta etapa experimental fue determinar la resistencia y la rigidez de elementos laminados clavados bajos fuerzas de corte. Se estudió la influencia de la fricción entre las lamelas, la influencia de clavar en un ángulo y la influencia de clavar dos lamelas a la vez, utilizando probetas de corte, donde la fuerza estuvo aplicada en la lamela central y los apoyos en la segunda

y la penúltima lamela. Las lamelas laterales se necesitaron para garantizar el mismo número de clavos en cada plano de corte. Se obtuvieron tres planos de corte entre las fuerzas de acción y de reacción, con la fuerza de corte  $F/2$  constante en estos tres planos. La probeta se deformó en V, midiendo directamente la deformación central (ver figura 3).

Se ensayaron siete series de probetas con distintas configuraciones del esquema de clavado. Las probetas consistieron en nueve lamelas (siete lamelas para las series 6 y 7), las cuales se unieron con clavos de  $D = 3,3$  mm y  $l = 75$  mm (4,2 y 100 mm para las series 6 y 7), que corresponde a una configuración real para los espesores de las lamelas. Las dimensiones de las lamelas y de las probetas eran  $2,4 \times 10 \times 35$  cm y  $10 \times 21,6 \times 35$  cm respectivamente. Para las series 6 y 7 las dimensiones eran  $5,0 \times 10 \times 35$  cm y  $10 \times 35,0 \times 35$  cm respectivamente.

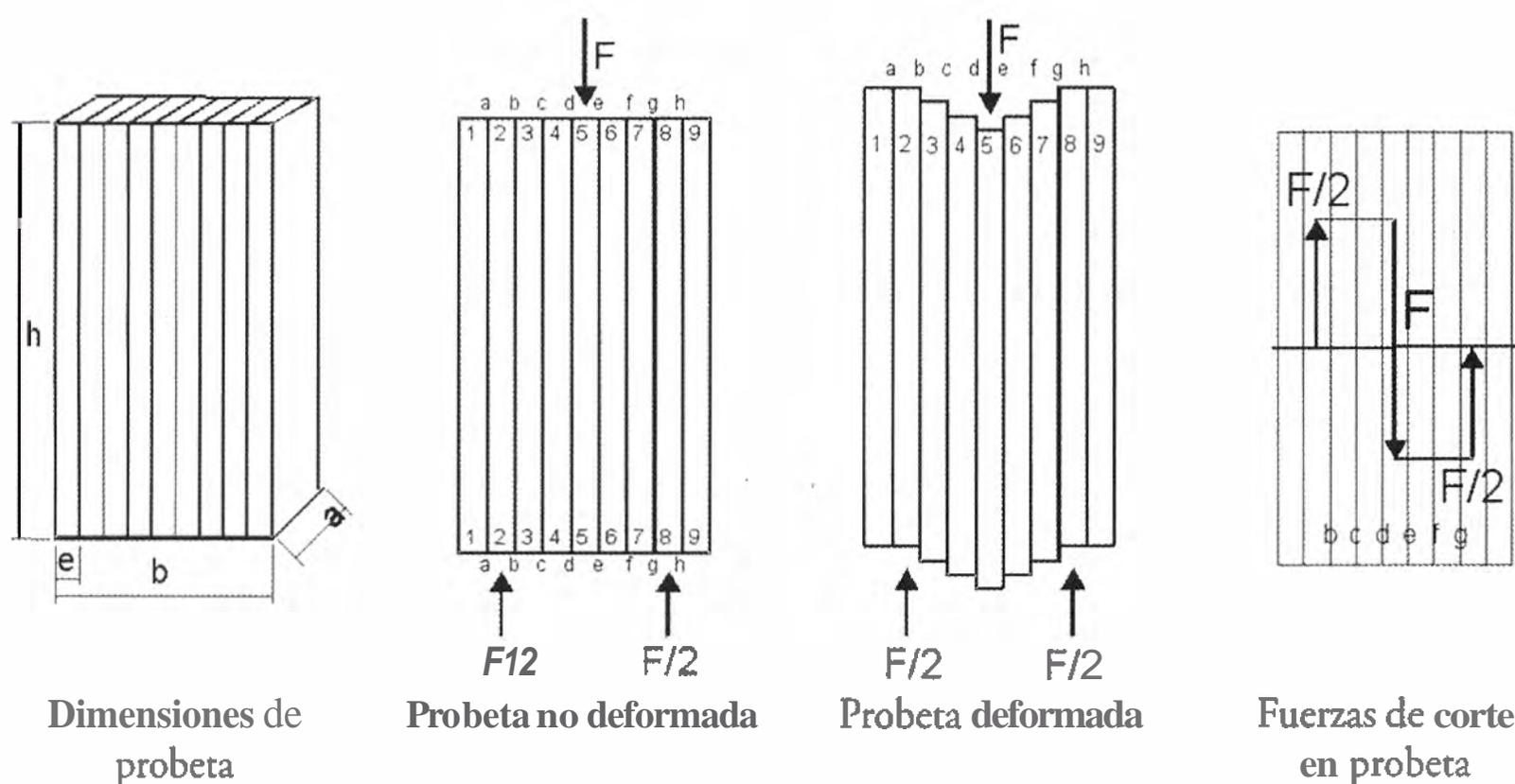


Figura 3: Probeta solicitada en ensayo de corte y deformación idealizada

Para evaluar la influencia de la fricción se fabricó la serie 3 con una lámina de polietileno entre las lamelas. Para evaluar la influencia de clavar dos lamelas a la vez, se fabricaron las probetas de las series 4 y 5 de esta manera y para la influencia de clavar con un ángulo se clavaron las probetas de las series 3, 5 y 7 con los clavos colocados en un ángulo de  $65^\circ$ . Se dispusieron los clavos respetando las recomendaciones de la norma NCh 1198.

Se determinaron la densidad y el CH de la madera utilizada, siguiendo los procedimientos de la norma NCh 176 "Determinación de la humedad y densidad. El promedio del CH fue de 14,8% con una desviación estándar de 2,5%. La densidad anhidra promedio fue de  $\rho_0 = 464$  kg/m<sup>3</sup>, con una desviación estándar de 52 kg/m<sup>3</sup>. A partir de tablas de madera de  $2,4 \times 10 \times 320$  cm se cortaron piezas de 35 cm de largo. Se tuvo cuidado de que todas las piezas para una probeta provinieran de la misma tabla, para obtener características parecidas en toda la probeta.

Para la definición del método de ensayo a utilizar, se recurrió a las especificaciones dadas por la norma EN 26891, modificando sólo el régimen de aplicación de carga. El resto del ensayo es similar al caso anterior.

### Ensayos de paneles a flexión

El objetivo de esta fase ~~he~~ estudiar el comportamiento semi-estático de las placas entabladas clavadas bajo solicitaciones de flexión. Las investigaciones de BLASS y KRÄMER (2002) y NATTERER *et al* (1999) trataron de la influencia del tipo del clavo, de la distancia entre los clavos, de un esquema concentrado de clavado casi de uniones de tope y de encolar adicionalmente las lamelas en las uniones de tope. Ninguno de estos factores tiene una influencia significativa en el MOE de placas entabladas. Uno de los principales resultados de estas investigaciones es el posible aumento del MOE. Según WERNER (2002) el MOE para madera de la clasificación S10 (norma alemana) puede ser elevado de 10.000 N/mm<sup>2</sup> a 11.000 N/mm<sup>2</sup>, según NATTERER *et al* (1999) a 11.500 N/mm<sup>2</sup> y según BLASS y KRÄMER (2002) a 12.500 N/mm<sup>2</sup>.

De todas las 69 tablas utilizadas (de 5 x 10 cm de sección y de 230 cm de largo) se determinó el CH y la densidad, siguiendo los procedimientos de la norma NCh 176. Las tablas tenían un CH de 17,7% en promedio (S = 3,0%), la densidad anhidra era en promedio 473 kg/m<sup>3</sup> (S = 37 kg/m<sup>3</sup>). Siguiendo las recomendaciones de la norma DIN EN 408 y usando la ecuación 5 se determinó el MOE en flexión de todas las lamelas.

$$E = \frac{F * l^3}{48 * I * v} * \frac{23}{27} \quad (5)$$

Donde:

- E : Módulo de elasticidad [N/mm<sup>2</sup>]
- I : Momento de inercia [mm<sup>4</sup>],  $I = 1/12 * b * h^3$
- F : Fuerza aplicada [N]
- v : Deflexión registrada [mm]
- l : Distancia entre apoyos [mm]

El promedio del MOE fue de 7.753 N/mm<sup>2</sup>, lo cual es en un 11% superior al valor de referencia de la norma NCh 1198 para el grado estructural G2. Se hizo una prueba de hipótesis, suponiendo que las tablas cumplen con el requerimiento mínimo de dicha norma y el valor p entregado (p = 0,001) no da suficiente evidencia para rechazar esta hipótesis. Se hizo una relación entre la densidad de la madera y el MOE. El valor obtenido  $R^2 = 0,33$  significa, que el 33% de la variación muestral total está explicada por los valores de desviación estándar de la densidad. El 67% restante de la variación no ha sido explicado por esta evaluación, sin lugar a duda los defectos de la madera influyen significativamente en los resultados.

Los clavos con diámetro 4,2 mm tenían una distancia de 26 cm entre ellos y 5 cm al borde, respetando las exigencias de la norma NCh 1198. Se distribuyeron las tablas de tal manera, que todos los paneles tenían el mismo promedio del MOE. Se fabricaron seis paneles de dimensiones de 240 x 75 x 10 cm. Los paneles A, B y C tenían todas sus tablas continuas, a lo largo del panel. Los paneles D, E y F tenían uniones de tope en cada segunda lamela en los puntos que dividen el

tablero en tercios. En los extremos se colocó una lamela lateral cumpliendo la función de solera de amarre. La figura 4 muestra el esquema de la configuración de los paneles.

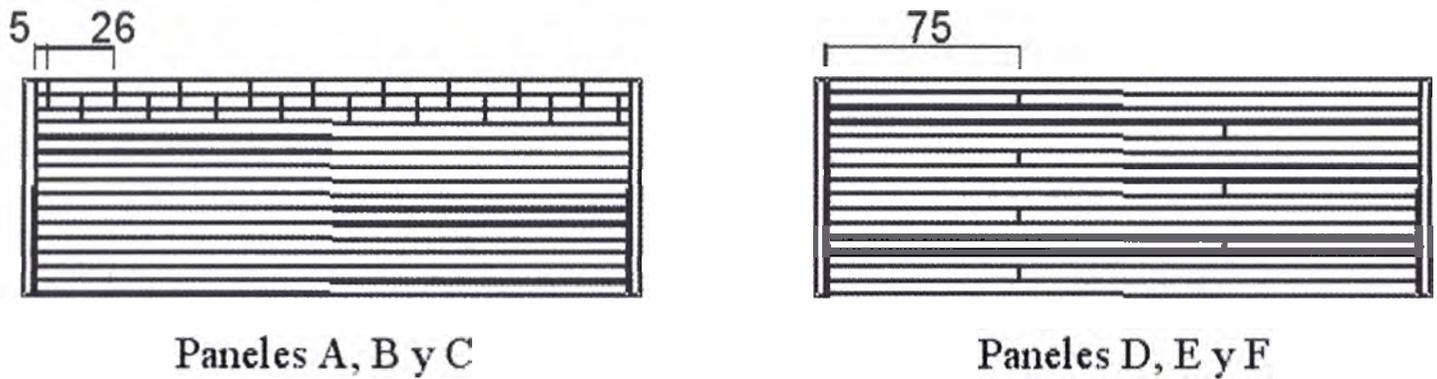


Figura 4: Esquema de fabricar los paneles fabricados para el estudio

Se ensayaron los paneles bajo cargas de flexión, primero con una carga distribuida en las líneas que dividen el tablero en tercios, luego con una carga concentrada en la lamela central y, finalmente, con dos cargas concentradas en las dos lamelas laterales (ver figura 5). La carga se aplicó continuamente hasta llegar a 14,2 kN (carga distribuida) y 6,9 kN (cargas concentradas). Se midieron las deflexiones de tres punros, de la lamela central y de las dos lamelas laterales, registrándolas en incrementos de 2 kN. Dado que el objetivo de esta etapa fue solamente determinar la rigidez del panel dentro del rango elástico de deformaciones, los mismos no fueron evaluados hasta la carga de rotura. Según HALLER y PANKE (1998) los paneles entablados clavados muestran un comportamiento completamente elástico hasta su rotura.



Figura 5: Fotos de los ensayos de flexión. Ensayos de paneles a cargas horizontales

Las paredes tienen que soportar, además de las cargas verticales de la losa superior también las cargas horizontales provenientes del viento o sismo. El comportamiento bajo cargas laterales no ha sido estudiado de manera suficiente para desarrollar un modelo matemático para predecirlo (BECKER et al, 1997). Para mejorar el comportamiento de la placa bajo sollicitaciones laterales en el plano se recomienda reforzar los elementos con revestimientos exteriores o interiores. La forma de colocación de un revestimiento, ya sea vertical, horizontal o en diagonal es un parámetro que el diseñador deberá fijar (JUNG, 1999).

Se utilizaron los mismos paneles de dimensiones de 10 x 75 x 240 cm que ya habían sido ensayados bajo cargas de flexión. Se tomó esta decisión por razones económicas. En esta etapa se ensayaron los paneles bajo fuerzas horizontales determinando su rigidez, usando un equipo del PTM de la Universidad del Bío Bío y siguiendo las recomendaciones de la NCh 802 que establece el método de ensayo para comprobar la resistencia de los paneles prefabricados a las cargas horizontales contenidas en su plano.

Se ensayaron los tres paneles sin uniones de tope (paneles A, B y C), primero sin reforzamiento y luego con dos diagonales de contrachapado colocados en las dos caras de los paneles de manera cruzada. Los tres paneles con uniones de tope (paneles D, E y F) se ensayaron con una placa de contrachapado de 9 mm de espesor puesto como refuerzo. Los paneles y los diagonales se unieron a los paneles con grapas de 1,0 mm de diámetro y largo de patas de 20 mm a una distancia de 5 cm. Finalmente se ensayó otra vez el panel D reforzado con una placa de contrachapado, pero unido al panel con clavos de  $D = 2,0$  mm y 65 mm de largo. La figura 6 muestran los paneles reforzados.



Variante 1: Refuerzo con placa



Variante 2: Refuerzo con diagonal

Figura 6: Fotos de paneles reforzados

## Resultados y Discusión

### Ensayos preliminares

El gráfico de la figura 7 muestra las curvas de carga-deformación obtenidas en los ensayos.

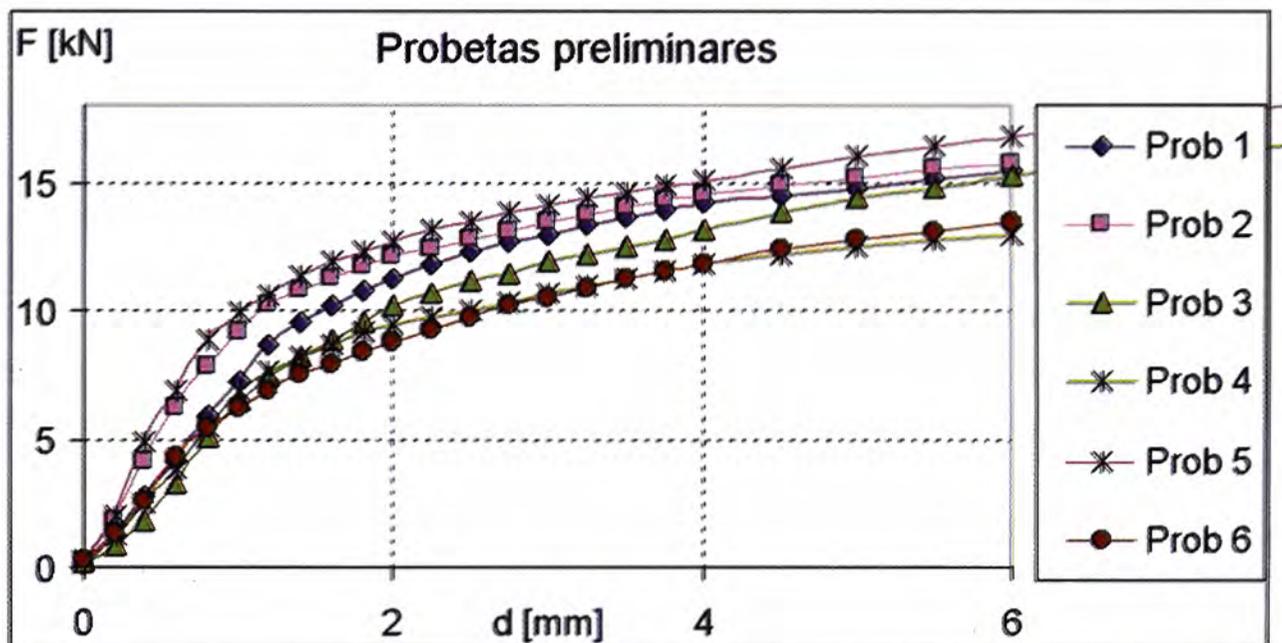


Figura 7: Gráfico Fuerza - Deformación probetas preliminares

Inicialmente, la unión es muy rígida, pero con cargas mayores de aprox. 8 kN se observan grandes deformaciones. **No se llega a una rotura completa y se fija la carga máxima admisible para la deformación en 1,5 mm (dentro de la parte lineal de la curva carga-deformación).**

Se calculó el valor característico para la capacidad de carga de los clavos de  $D = 4,2$  mm solicitados a cizalle simple a 1.143 N. La capacidad de carga obtenida experimentalmente es de 1.586 N promedio, con una desviación estándar de 162 N. Usando la ecuación 4 se llega a un valor característico de 1.157 N, lo que difiere solamente en un 1% del valor esperado. Por lo tanto, los resultados se acercan satisfactoriamente al valor establecido por la norma E DIN 1052.

El módulo de corrimiento es en promedio 1.326 N/mm con una desviación estándar de 400 N/mm. Usando la ecuación 4 se llega a un valor característico de 668 N/mm. Este valor también se acerca satisfactoriamente a los valores establecidos por la ecuación 2.

Otra comparación demostró que la densidad no tiene influencia significativa en los resultados obtenidos en estos ensayos. Una correlación entre la variación de los valores del módulo de corrimiento y la densidad dio como resultado, que la variación de  $C$  está explicada solamente en un 6% por la variación de la densidad.

## Ensayos de corte

El gráfico de la figura 8 muestra las curvas de los promedios de carga-deformación.

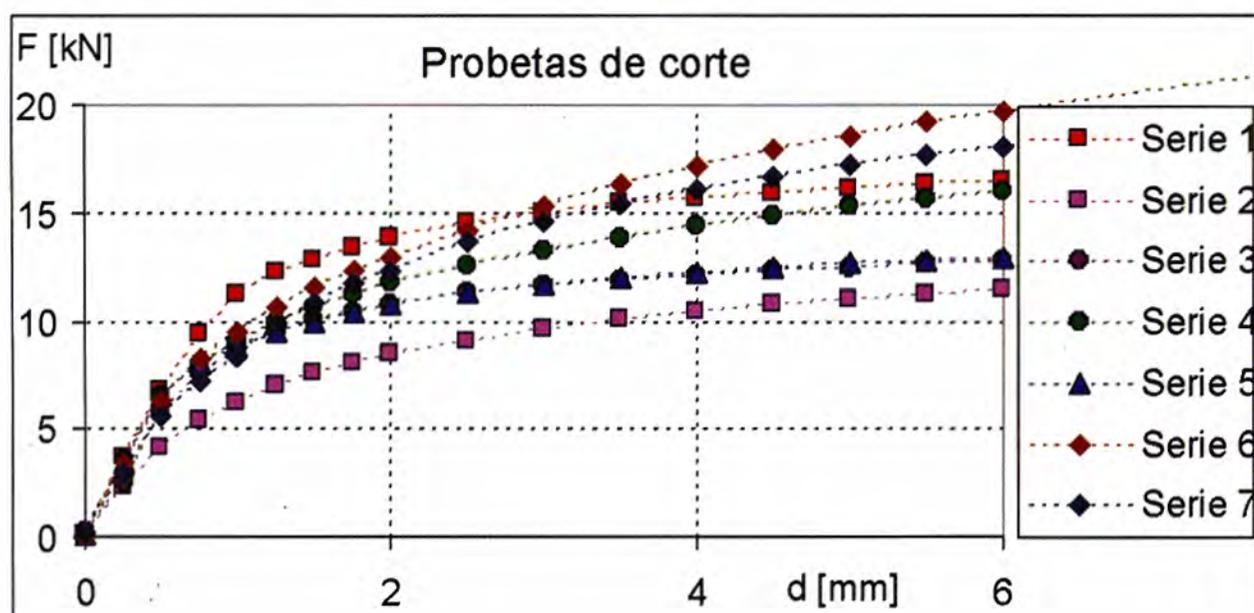


Figura 8: Gráfico Fuerza - Deformación de los ensayos de corte

Se calcularon las capacidades de carga características (según E DIN 1052) de los clavos de  $D = 3,3$  mm solicitados a cizalle doble a 1.285 N y de los clavos de  $D = 4,2$  mm solicitados a cizalle simple a 1.095 N. Para la densidad, se usó el valor de la norma NCh 1198  $\rho_0 = 450$  kg/m<sup>3</sup>.

Se compararon los valores calculados con los obtenidos experimentalmente para la capacidad de carga de los clavos. Todos los valores experimentales obtenidos bajo una deformación total de la probeta de 1,5 mm, son menores que los valores calculados. En cambio, los valores obtenidos bajo una deformación de 4,5 mm, equivalente a una deformación de 1,5 mm por plano de cizalle,

son mayores que los valores calculados, siendo la serie 2 una excepción. El mayor aumento de resistencia entre las deformaciones 1,5 mm y 4,5 mm se registraron para las series 6 y 7.

Se hicieron evaluaciones estadísticas comprobando la hipótesis, que el valor característico de la capacidad de carga de un davo es igual a 1.285 N para las series 1 a 5 y 1.095 N para las series 6 y 7. Se pudo confirmar, que en todas las series (excepción serie 4) los valores característicos se ajustan satisfactoriamente al valor establecido por la norma E DIN 1052.

También se compararon los valores calculados característicos con los obtenidos experimentalmente para el módulo de corrimiento  $C$ , evaluando los valores de carga aplicada para las deformaciones de 1,5 mm y de 4,5 mm. Como valores de referencia se calcularon los módulos de corrimiento según la ecuación 3, se obtuvo 1.180 N/mm para los clavos de  $D = 3,3$  mm solicitados a cizalle doble y 761 N/mm para los clavos de  $D = 4,2$  mm solicitados a cizalle simple. Todos los valores de los ensayos son menores que los valores calculados.

Se hicieron evaluaciones estadísticas comprobando la hipótesis, que el valor característico de  $C$  es igual a 1180 N/mm para los clavos de  $D = 3,3$  mm y 761 N/mm para los clavos de  $D = 4,2$  mm. Se pudo confirmar que en todas las series (con excepción de la serie 2) los valores característicos obtenidos experimentalmente se ajustan satisfactoriamente al valor establecido por la norma E DIN 1052.

Para evaluar la influencia de la fricción entre las lamelas se compararon los resultados de dos series iguales con la excepción que una tiene láminas de plástico entre las lamelas de madera y por lo tanto se minimiza la fricción. La capacidad  $P$  de los clavos de probetas con lámina es 23% significativamente menor. El módulo de la serie con lámina es 43% significativamente menor. No existe una diferencia significativa entre clavar cada lamela individualmente y clavar dos lamelas a la vez. Entre clavar con un ángulo de  $90^\circ$  y un ángulo de  $65^\circ$  existe una diferencia significativa de las capacidades de carga por la menor penetración de los clavos. (combinación de lamelas  $b = 24$  mm y clavos  $l = 75$  mm). Con respecto al módulo de corrimiento no existe una diferencia significativa. La rigidez no aumenta clavando en un ángulo con clavos lisos.

Se evaluó la influencia de la densidad de la madera en la variación del módulo de corrimiento obtenido experimentalmente. El valor obtenido  $R^2 = 0,01$  para la correlación de las dos variables significa que solamente el 1% de la variación muestral total está explicada por los valores de desviación estándar de la densidad.

### Ensayos de paneles a flexión

El gráfico de la figura 9 muestra el promedio de las curvas de carga-deformación de los tres paneles de igual configuración para los ensayos con cargas distribuidas. Se consideró el promedio de las deformaciones de las dos lamelas laterales.

Los paneles no llegaron a su límite de proporcionalidad bajo una carga de aprox. 14,2 kN (1.400 kg), lo que equivale a una carga 18,9 kN (1.870 kg) por metro lineal. Las deflexiones asociadas a esta carga fueron 4,8 mm para los paneles sin uniones de tope y 5,5 mm para los paneles con uniones de tope. Los resultados obtenidos permiten clasificar los paneles en el grado RT 3c, la clasificación de mayor resistencia y rigidez de acuerdo la norma NCh 806.

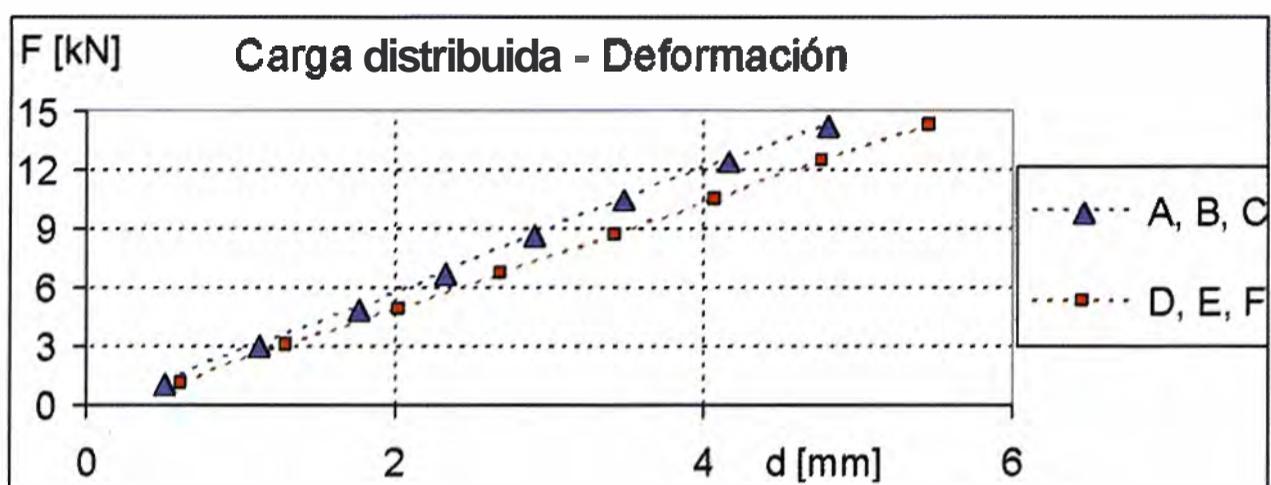


Figura 9: Gráfico de carga-deformación de paneles bajo carga distribuida

Con la ecuación 5, se determinó el MOE en flexión de los paneles. El promedio de los tres paneles sin uniones de rope fue de  $7.413 \text{ N/mm}^2$  ( $S = 154 \text{ N/mm}^2$ ). Teóricamente, los paneles sin uniones de tope deberían tener un MOE en flexión igual al promedio del MOE de sus lamelas ( $7.750 \text{ N/mm}^2$ ). La comparación estadística ( $p = 0,06$ ) no entrega suficiente prueba para rechazar esta hipótesis. El MOE de los paneles es 4% menor que el MOE promedio de sus lamelas.

Los tres paneles con uniones de tope tenían en promedio un MOE en flexión de  $6.577 \text{ N/mm}^2$  ( $S = 370 \text{ N/mm}^2$ ). Para placas entabladas con uniones de tope en los puntos tercios la rigidez se disminuye en aprox. 20% (NATTERER et al, 1999). Para la configuración elegida en el estudio (uniones de tope en 7 de 15 lamelas) se espera una disminución de aprox. 9,5% a  $7.138 \text{ N/mm}^2$ . La comparación estadística ( $p = 0,12$ ) no entrega suficiente prueba para rechazar esta hipótesis.

Los gráficos de la figura 10 muestran los promedios de las curvas de carga-deformación de los tres paneles de igual configuración para los ensayos con una carga concentrada en la lamela central (izquierdo) y en las lamelas laterales (derecho). Para las deformaciones laterales se consideró el promedio de las deformaciones de las dos lamelas laterales.

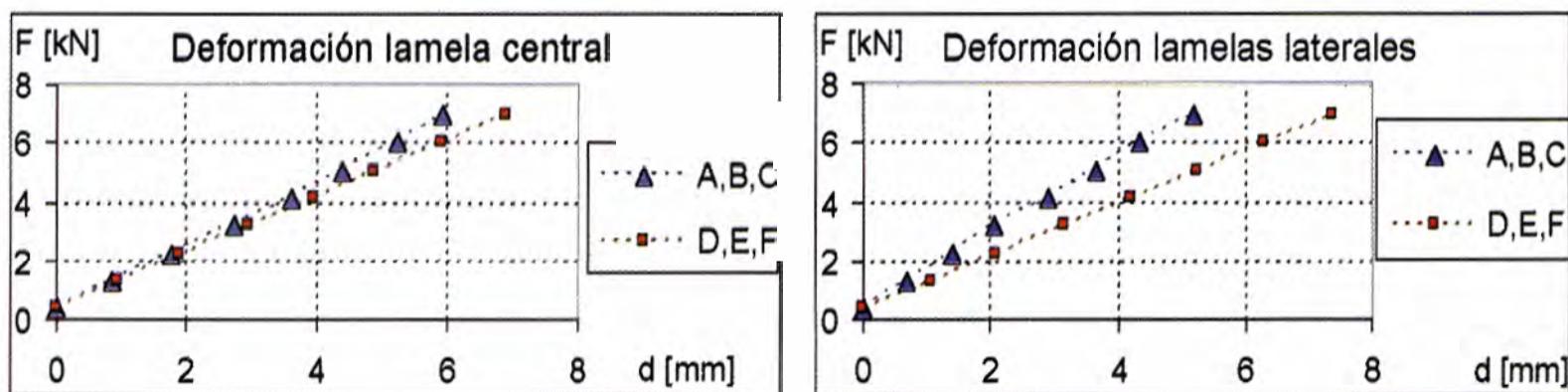


Figura 10: Gráficos de carga-deformación bajo cargas puntuales

BLASS y KRÄMER (2002) simularon el componamiento de elementos entablados con ayuda del método de elementos finitos, formularon ecuaciones para diferentes configuraciones de uniones de tope y diferentes cargas, evaluaron estas ecuaciones con ensayos experimentales y obtuvie-

ron buenas coincidencias. El momento efectivo de inercia se puede calcular para placas sin uniones de tope con la ecuación 6 y para placas con uniones de tope en los puntos tercios con la ecuación 7.

$$I^* = \frac{b * h^2 * l^{0,86}}{0,9 * e^{0,4}} \quad (6)$$

$$I^* = \frac{b * h^2 * l^{1,0}}{4,0 * e^{0,4}} \quad (7)$$

Donde:

- $I^*$  : Momento efectivo de inercia [ $\text{mm}^4$ ]
- $b, h$  : Espesor y altura de la lamela [mm]
- $l$  : Distancia entre apoyos de la placa [mm]
- $e$  : Distancia entre clavos [mm]

Las ecuaciones 6 y 7 son válidas para placas con 10 lamelas hacia cada lado de la carga puntual. La configuración de las placas del presente trabajo solamente tiene 7 lamelas hacia cada lado. Por lo tanto, se debe reducir el momento efectivo de inercia en un 70%. Considerando las dimensiones de los paneles utilizados en el presente estudio se determina el momento efectivo de inercia para los paneles sin uniones de tope a  $I^* = 27,9 * 10^6 \text{ mm}^4$  y para los paneles con uniones de tope en los puntos tercios a  $I^* = 17,2 * 10^6 \text{ mm}^4$ . Se debe considerar, que los paneles utilizados tienen uniones de tope solamente en 7 de 15 lamelas, por eso se interpola el momento de inercia a  $I^* = 22,9 * 10^6 \text{ mm}^4$ . La rigida obtenida experimentalmente con una carga puntual central se puede calcular con la ecuación 8:

$$E_{f,L} I^* = \frac{F * l^3}{48 * d} \quad (8)$$

Donde:

- $E_{f,L} I^*$  : Rigidez en flexión longitudinal [ $\text{Nmm}^2$ ]
- $F$  : Fuerza aplicada [N]
- $l$  : Distancia entre apoyos de la placa [mm]
- $d$  : Deflexión máxima de la placa [mm]

Con la ecuación 8 se determinó el momento efectivo de inercia de los paneles, utilizando para el MOE el promedio de las lamelas ( $E_{f,L} = 7.750 \text{ N/mm}^2$ ). El promedio del momento efectivo de inercia de los paneles sin uniones de tope es  $24,0 * 10^6 \text{ mm}^4$  ( $S = 25 * 10^6 \text{ mm}^4$ ); para los paneles con uniones de tope  $20,7 * 10^6 \text{ mm}^4$  ( $S = 2,6 * 10^6 \text{ mm}^4$ ). Con la evaluación estadística ( $p = 0,11$ ) no se puede rechazar la hipótesis de determinar los momentos efectivos con las ecuaciones 6 y 7.

Dado que no hay ecuaciones establecidas para determinar las deformaciones en puntos específicos resultantes de cargas concentradas en las lamelas laterales, se hizo una simple comparación entre los resultados de estos ensayos y los resultados de los ensayos con cargas concentradas en la lamela central. La hipótesis que se formula es, que la deformación de las lamelas laterales cargadas con  $F/2$  debe ser igual que la deformación central cargada con  $F$ . Esta hipótesis se basa en el número de lamelas colaborantes vecinas. Para cargas puntuales en la lamela central colaboran las lamelas veci-

nas en ambos lados, mientras que para cargas puntuales en las lamelas laterales solamente colaboran lamelas vecinas en un lado.

Para los paneles sin uniones de tope el promedio de la deformación central bajo una carga lateral es de 5,9 mm; para la deformación lateral bajo una carga lateral es de 5,2 mm. Para los paneles con uniones de tope la deformación central bajo una carga lateral es de 6,9 mm; para la deformación lateral bajo una carga lateral es de 7,4 mm. Las evaluaciones estadísticas entregan valor  $p = 0,11$  y  $p = 0,49$  y no se puede rechazar la hipótesis de la igualdad de los promedios.

No ha sido un objetivo del presente trabajo estudiar en detalle la distribución de cargas puntuales en elementos laminados clavados. Existen estudios al respecto (BLASS y KRÄMER, 2002) y otros investigadores recomiendan poner una placa para distribuir la carga a un número más grande de lamelas (WERNER, 2002).

### Ensayos de cargas horizontales

Basándose en las anotaciones de los ensayos se pudieron dibujar gráficos que establecen la relación carga-deformación. El gráfico de la figura 11 muestra el promedio de los tres paneles de igual configuración del desplazamiento horizontal total corregido en función de la carga horizontal aplicada y del panel reforzado adicional.

Durante la ejecución de las series experimentales no se observaron fallas. Cabe destacar, que no ocurrían daños en la madera y toda la deformación observada es consecuencia del corrimiento de los medios de unión. A partir de los ensayos realizados, no es posible establecer una carga de rotura. Los paneles sin refuerzo y los paneles reforzados con una diagonal y con una placa con grapas no llegaron a su límite de proporcionalidad bajo una carga de 3,41 kN (335 kg) lo que equivale a una carga 4,55 kN (447 kg) por metro lineal.

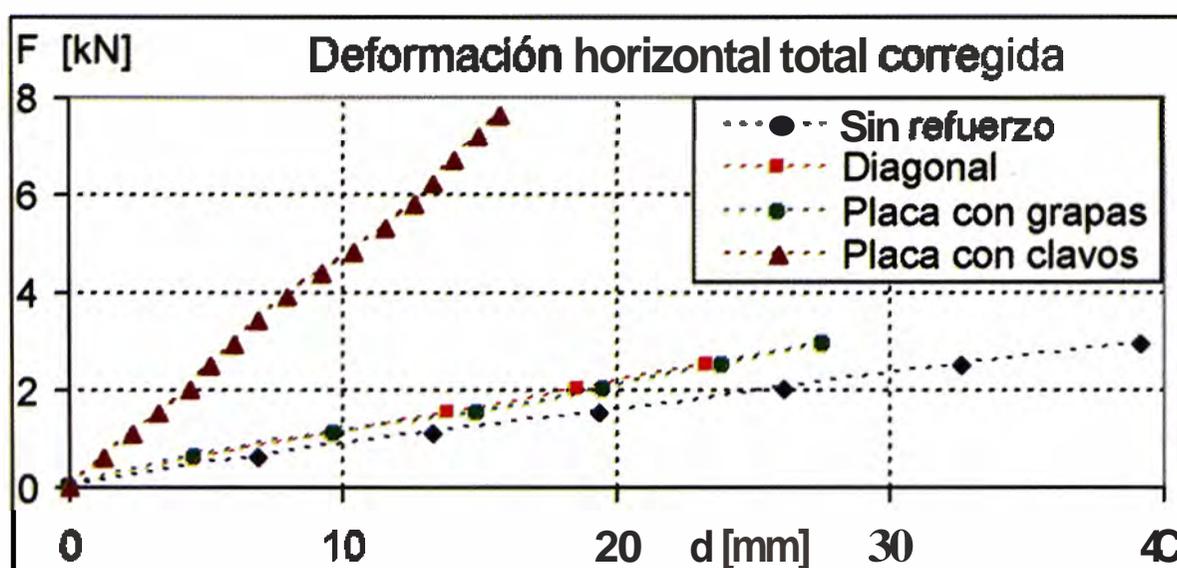


Figura 11: Gráfico de las deformaciones horizontales corregidas

Las deformaciones horizontales asociadas a esta carga fueron en promedio 39,2 mm para los paneles sin refuerzos y 27,6 mm tanto para los paneles reforzados con una diagonal como con una

placa de contrachapado unida mediante grapas. Los resultados obtenidos permiten clasificar los paneles en el grado RH 1a, la clasificación de menor resistencia y rigidez de acuerdo la norma NCh 806.

El panel reforzado con una placa de contrachapado unida mediante clavos no llegó a su límite de proporcionalidad bajo una carga de 7,65 kN (750 kg) lo que equivale a una carga 10,2 kN (1000 kg) por metro lineal. La deformación horizontal asociada a esta carga fue de 15 mm, lo que permite clasificar el panel en el grado RH 3c, la clasificación de mayor resistencia y rigidez de acuerdo la norma NCh 806.

El reforzamiento de los paneles, tanto con una diagonal de contrachapado, como con una placa unida mediante grapas, disminuye la deformación horizontal total corregida de 39,2 mm a 27,6 mm en promedio. Los paneles reforzados son 42% más rígidos (diferencia estadísticamente significativa). Para el panel reforzado con una placa de contrachapado unido al elemento entablado mediante clavos, se disminuye la deformación horizontal total corregida a 6,1 mm. Por lo tanto, este panel es 542% más rígido que el panel no reforzado y 352% más rígido que los paneles reforzados con las grapas. Debe considerarse que no existe validez estadística ya que se ensayó solamente un panel.

## CONCLUSIONES

- Con ensayos preliminares de uniones clavadas, se confirmó la validez de la normativa tanto nacional como las otras citadas para calcular la capacidad de carga  $P$  y el módulo de corrimiento  $C$ . Los resultados experimentales se acercan muy satisfactoriamente a los valores establecidos (1157 N y 668 N/mm para clavos de  $D = 4,2$  mm). La densidad de la madera no tiene influencia significativa en los resultados.
- Con ensayos de corte se determinaron y analizaron la resistencia y la rigidez de probetas de elementos clavados con distintos esquemas de clavado. Los resultados para la capacidad  $P$  de los clavos en probetas de nueve lamelas se acercan satisfactoriamente al valor característico establecido por la norma E DIN 1052 (1.285 N para  $D = 3,3$  mm y 1.095 N para  $D = 4,2$  mm). Los valores del módulo  $C$  son menores que los calculados pero se ajustan satisfactoriamente a los valores establecidos por la norma NCh 1198 (1180 N/mm para  $D = 3,3$  mm y 761 N/mm para  $D = 4,2$  mm). La densidad de la madera no tiene influencia significativa en los resultados.

Se evaluó la influencia de la fricción entre las lamelas. La capacidad  $P$  de los clavos de probetas con lámina es 23% significativamente menor. El módulo de corrimiento de la serie con lámina es 43% estadísticamente significativo menor. No existe una diferencia significativa entre clavar cada lamela individualmente y clavar dos lamelas a la vez, tanto para las capacidades de carga, como para el módulo de corrimiento de los clavos. Por la menor penetración de los clavos disminuye la capacidad de carga clavando con un ángulo de  $65^\circ$ . El módulo de corrimiento no aumenta la rigidez clavando en un ángulo y usando clavos.

- Se fabricaron seis paneles de 8 x 75 x 240 cm, tres de ellos con uniones de tope en los puntos tercios en 7 de 15 lamelas. Los paneles no llegaron a su límite de proporcionalidad bajo una

carga de flexión en los puntos tercios de 14,2 kN lo que equivale a una carga 18,9 kN por metro lineal. Las deflexiones asociadas a esta carga fueron 4,8 mm (sin uniones de tope) y 5,5 mm (con uniones de tope). Los resultados obtenidos permiten clasificar los paneles en el grado RT 3c, la clasificación de mayor resistencia y rigidez de acuerdo a la norma NCh 806.

- El promedio del MOE de los tres paneles sin uniones de tope fue de 7.413 N/mm<sup>2</sup>, siendo 4% menor que el MOE promedio de sus lamelas (diferencia estadísticamente no significativa). Los tres paneles con uniones de tope tienen en promedio un MOE en flexión de 6.577 N/mm<sup>2</sup>, cumpliendo la disminución de rigidez esperada (aprox. 9,5%) para su configuración.
- Evaluando las deformaciones bajo cargas concentradas se pudo determinar el momento efectivo de inercia a  $24,0 \cdot 10^6$  mm<sup>4</sup> para los paneles sin uniones de tope y a  $20,7 \cdot 10^6$  mm<sup>4</sup> para los paneles con uniones de tope. Estos valores se ajustan satisfactoriamente a los valores calculados según ecuaciones establecidas. La deformación de las lamelas laterales cargadas con F/2 fue igual a la deformación de la lamela central cargada con F, explicándose en el número de lamelas vecinas colaborantes.
- A partir de los ensayos realizados con carga horizontal en el plano del panel, no es posible establecer una carga de rotura. Los paneles no llegaron a su límite de proporcionalidad bajo una carga de aprox. 3,4 kN, lo que equivale a una carga 4,6 kN (477 kg) por metro lineal. Las deformaciones horizontales asociadas permiten clasificar los paneles en el grado RH 1a, la clasificación de menor resistencia y rigidez de acuerdo a la norma NCh 806.
- Se ensayó un panel adicional reforzado con una placa de contrachapado unido mediante clavos. El panel no llegó a su límite de proporcionalidad bajo una carga de 7,7 kN, la deformación asociada a 3,4 kN fue 6,1 mm, siendo 542% más rígido que el panel no reforzado y se clasifica en el grado RH 3c (mayor resistencia y rigidez de acuerdo a la norma NCh 806).
- El presente trabajo es un apoyo para la introducción del concepto de elementos laminados clavados y sus resultados experimentales una base para futuras investigaciones. En futuras investigaciones se deberán aclarar las dudas existentes con respecto al comportamiento mecánico de elementos laminados clavados. Dentro de los factores pendientes a estudiar se encuentra la influencia del número de lamelas unidas en la rigidez de probetas y un estudio detallado de la influencia de la fricción entre las lamelas, considerando el efecto del cepillado.
- Dentro del presente trabajo no ha sido un objetivo estudiar en detalle la distribución de cargas puntuales en elementos laminados clavados. Se deberían realizar más ensayos para definir la influencia de uniones de tope. Las cargas aplicadas han sido estáticas, faltando aún experiencias con cargas dinámicas.
- No se ha realizado un estudio con viviendas a escala natural. Sería interesante construir una casa modelo para demostrar la factibilidad de realizarla con los materiales de construcción y las herramientas disponibles en Chile. Es indispensable destacar que el estudio expuesto se debe complementar con un estudio económico ya que el sistema solamente se podría introducir en el mercado ofreciendo, además de sus ventajas estructurales, también ventajas económicas.

**BIBLIOGRAFÍA**

- BECKER, K., WOLF, T., TICHELMANN, K. y PFAU, J., 1997, Brettstapelbauweise, Infoschrift des BDZ, TU Darmstadt
- BLASS, H.J. y KRÄMER, V., 2002, Lastverteilung, Tragwirkung und Verformungsverhalten für Brettstapelelemente, Fraunhofer IRB Verlag
- CHERET, M., GROHE, G., MÜLLER, A., SCHWANER, K., WINTER, S. y ZEITTER, H., 2000, Holzbausysteme, Informationsdienst Holz
- HALLER, P. y PANNKE, K., 1998, Structural and physical behaviour of nailed laminated timber elements, World Timber Engineering Conference, Lausanne, 1998
- JUNG, P., 1999, Die Brettstapelbauweise, Informationsdienst Holz
- NATTERER, J., BURGER, N. y EBERSBÄCHER, D., 1999, Tragverhalten von Konstruktionselementen in Brettstapelbauweise, Fraunhofer IRB Verlag
- WERNER, H. 2002, Genagelte und gedüpelte Brettstapelelemente, Holzbaukalender, Verlag Ernst und Sohn
- YÁÑEZ CAÑETE, M., 1995, Caracterización del comportamiento estructural de tabiquerías de madera, Tesis, Universidad de Chile