



Revista de la Construcción

ISSN: 0717-7925

revistadelaconstrucion@uc.cl

Pontificia Universidad Católica de Chile
Chile

Cárdenas, M; Schanack, F; Ramos, O. R

Diseño, construcción y ensayo de una estructura de sección mixta madera laminada-hormigón para su uso en puentes

Revista de la Construcción, vol. 9, núm. 2, diciembre, 2010, pp. 63-75
Pontificia Universidad Católica de Chile
Santiago, Chile

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=127619215007>

- ▶ Cómo citar el artículo
- ▶ Número completo
- ▶ Más información del artículo
- ▶ Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica

Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

*Design, construction
and testing of a
composite glued
timber-concrete structure to
be used in bridges*

Diseño, construcción y ensayo de una estructura de sección mixta madera laminada-hormigón para su uso en puentes



Autores

- CÁRDENAS, M Ingeniero Civil en Obras Civiles UACH
Padre Harter #100, Puerto Montt, Chile
e-mail: mauro.ldc@gmail.com
- SCHANACK, F. Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos UNICAN - España
Instituto de Obras Civiles, U. Austral de Chile
e-mail: schanack@yahoo.de
- RAMOS, Ó. R. Doctor (c) Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos UNICAN - España
Departamento de Ingeniería Estructural y Mecánica
U. de Cantabria, España
e-mail: oramos@apiaxxi.es

Fecha de recepción 19/08/2010

Fecha de aceptación 01/12/2010

Resumen

El presente artículo aborda una investigación teórico-experimental acerca de estructuras de sección mixta madera laminada-hormigón. Se enfoca en la validación de simples tirafondos como conectores para su uso en puentes. Se diseñan vigas basándose en el método *gamma*, descrito en las normas NCh 1198 y Eurocódigo 5. Para validar este modelo de cálculo, se realizó una serie de ensayos consistentes por un lado en

ensayos de corte en probetas mixtas y por otro lado en un ensayo a flexión en una viga de sección mixta. Los resultados obtenidos de estos ensayos, en cuanto a la rigidez de la conexión, son muy favorables, resultando esta 2 a 3 veces mayor que lo calculado teóricamente. El estudio comprueba la eficacia estructural de la construcción mixta madera laminada-hormigón con conectores tipo tirafondo y su aptitud para el uso en puentes.

Palabras clave: Hormigón, madera laminada, sección mixta.

Abstract

This paper addresses a theoretical and experimental research conducted on glued laminated timber-concrete composite structures. It focuses on the validation of simple wood screws to be used as connectors in bridges. Beams are designed on the basis of the gamma method, described in the standards NCh 1198 and Eurocode 5. To validate this analysis model, a number of tests were performed consisting on the one hand of shear tests on composite

specimens and on the other hand of a bending test on a composite beam test specimen. The results of these tests, regarding the rigidity of the connection, are very positive. Said rigidity showed values 2 to 3 times bigger than that theoretically calculated. The research study demonstrates the structural efficacy of the glued laminated timber-concrete composite system with wood screw-type connectors and its suitability to bridges.

Keywords: Concrete, glued timber, composite section.

1. Introducción

La construcción de puentes mixtos de hormigón y madera ha sido desde hace muchos años muy exitosa, por el hecho de que se han obtenido resultados muy superiores a los previstos originalmente [1]; pero sus avances y desarrollo han sido poco difundidos. Sus orígenes se remontan al año 1932 en el estado de Oregón, Estados Unidos. Es ahí donde se desarrollan los primeros puentes compuestos de madera y hormigón, expandiendo su técnica y avances a diversos países, por medio del cuerpo militar del trabajo de los Estados Unidos. Estos primeros puentes fueron construidos en tramos cortos y buscando una solución intermedia entre viaductos de hormigón armado y los de madera en bruto. Estudios realizados por McCullough (1943) se enfocaron en la resistencia última y en las deformaciones de estas estructuras, así como también de su respuesta a cargas repetitivas y a temperatura. Investigaciones posteriores [2], han demostrado que este tipo de estructuras tiene una resistencia y durabilidad dos veces mayor que una construida solamente con madera y su rigidez mejora considerablemente, 3 a 4 veces superior. También se verificó que son ejecutadas de forma más rápida y con menor cantidad de moldajes, por la ayuda que proporcionan las vigas de madera para esto.

La clave del beneficioso comportamiento estructural es la conexión efectiva de la viga de madera con la losa de hormigón para garantizar la colaboración estructural. En la literatura se encuentra una amplia gama de conectores especialmente elaborados para su uso en puentes, pero que resultan difíciles de fabricar u obtener. El objetivo del presente estudio es el de evaluar y calibrar la construcción de vigas mixtas madera-hormigón para puentes con conectores simples, del tipo tirañondos. Los resultados del estudio permiten la fácil introducción de la construcción mixta madera-hormigón con los materiales usados comúnmente en el país.

2. Marco teórico

Sin duda es en Alemania donde a través de diversas investigaciones se ha innovado y perfeccionado la técnica de construcción mixta de madera y hormigón. Los principales estudios están enfocados en el sistema de conexión de ambos materiales, ya que es ahí donde reside la resistencia estructural del conjunto madera-hormigón. Uno de los más eficientes es el sistema de conexión HBV (Holz-Beton-Verbund System), el cual se encuentra patentado, y que consiste en una malla de acero embebida en el hormigón y pegada entre las láminas de la madera [3].

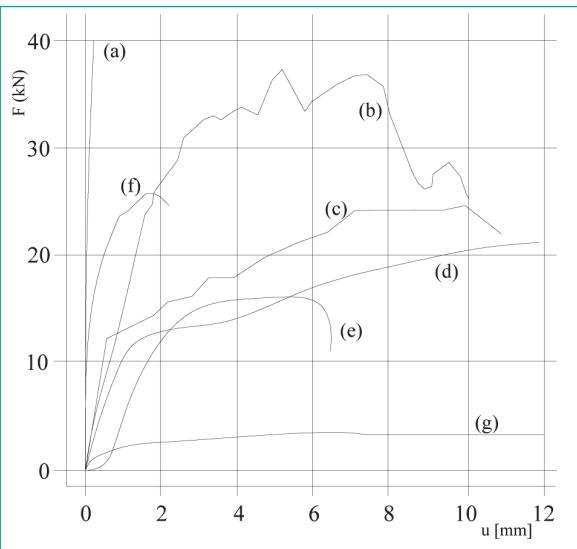
En Sudamérica, los principales estudios han sido realizados en universidades de Argentina y Brasil. En la Universidad Nacional del Nordeste, Argentina, a través del proyecto de investigación "Estructuras Mixtas de Hormigón Madera para Puentes" se han logrado avances significativos en el área. Se han realizado ensayos experimentales de prototipos y análisis numéricos de estructuras mixtas y sus conectores, destacando el ensayo de conectores en forma de "X" y de "V", formados por barras de acero de 12 mm de diámetro [4].

Para garantizar el funcionamiento en conjunto de ambos materiales, es necesario que exista un sistema de conexión capaz de transmitir los esfuerzos de cizallamiento longitudinales a lo largo de ellos, ya que la sola fricción de los materiales no es suficiente para lograrlo. Este sistema puede estar constituido por adhesivos estructurales, conectores metálicos cilíndricos (clavos, tornillos, tirañondos), conectores metálicos de superficie, entre otros, y pueden clasificarse en rígidos o semirrígidos (elásticos). Esta rigidez en la conexión es medida a través del *Módulo de Deslizamiento (K)*, el cual puede definirse como la fuerza paralela a la superficie de interacción necesaria para provocar un deslizamiento relativo unitario entre los dos materiales [5], y obtenido principalmente a través de ensayos realizados a probetas que representan el tipo de conexión, Figura 1, o también por medio de ecuaciones preestablecidas en normativas y códigos. Este coeficiente representa todos los parámetros mecánicos y elásticos de los materiales de dicha conexión, tales como: dimensiones y rigidez del conector, rigidez y resistencia a la penetración de la madera y el aplastamiento y fisuración del hormigón, además de todas las imperfecciones que pueda tener la probeta a ensayar.

El comportamiento no lineal mostrado por la gran mayoría de los conectores hace que sea más frecuente la determinación del *Módulo de Deslizamiento Secante* [6], tal como se muestra en la Figura 2, pero, debido a la ausencia de una unificación de criterios y normativas para la determinación de este módulo, los límites de los intervalos varían entre los diferentes autores que han realizado dichas investigaciones.

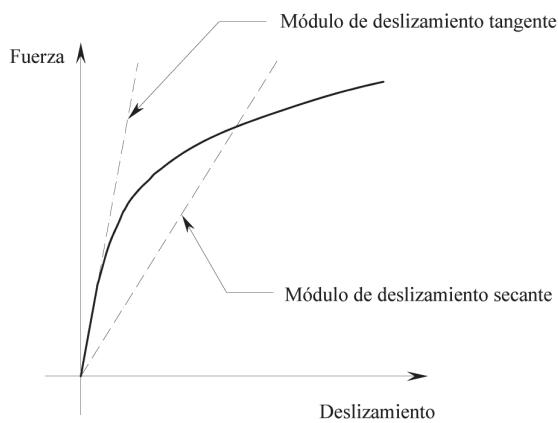
Las variables que principalmente influyen en el módulo de deslizamiento son: el tipo de conector, tanto en forma, rigidez, resistencia y diferentes formas de ubicación; el espacio entre el conector y los bordes de la pieza de madera; las variaciones en la rigidez y resistencia de la pieza de madera; la resistencia y módulo de elasticidad del hormigón; las dimensiones del elemento de hormigón usado y la cantidad y ubicación de la armadura usada.

Figura 1 Curva carga vs desplazamiento para conexiones solicitadas a tracción paralela [7]



- (a) Conexión encolada
- (b) Anillo partido
- (c) Placa dentada
- (d) Pasador
- (e) Tornillos
- (f) Placa con dientes estampados
- (g) Clavos

Figura 2 Módulo de deslizamiento secante y tangente [8]



Para el uso en puentes se han utilizado, a nivel internacional, principalmente los conectores tipo barra de armadura pegada mediante resina epoxi, sistema HBV y elementos especiales (tipo tarugo con conectores stud) de acero [9]. En este estudio se pretende utilizar conectores mucho más simples, como son los tirañones comerciales.

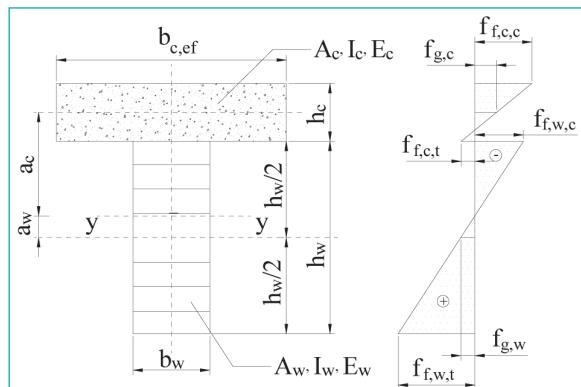
3. Modelo de cálculo

El método de cálculo utilizado en este estudio consiste en una adaptación del *método gamma* indicado en el punto 7.2.5 de la norma NCh 1198-2006 [10], para flexión uniaxial en vigas compuestas de madera, en conjunto con el capítulo 10 de dicha norma, que se refiere a madera laminada encolada.

Este método será usado para proyectar vigas mixtas, madera laminada-hormigón, de sección transversal T, como se muestra en la Figura 3, las cuales se originan a partir de una estructura mayor que es un panel mixto de losa de hormigón y vigas de madera laminada.

En este procedimiento la sección transversal inicialmente es transformada a un material de referencia, en este caso la madera. De esta sección se obtiene el momento de inercia eficaz, el cual toma en consideración la influencia del deslizamiento de la conexión en la sección compuesta, las características geométricas y físicas de los materiales de la sección y el ancho efectivo de la losa de hormigón. El momento de inercia eficaz es fundamental a la hora de trabajar con elementos de conexión que permiten pequeños desplazamientos relativos en la interfase de ambos elementos, ya que introduce una reducción en el momento de inercia teórico, producto de estos pequeños desplazamientos.

Figura 3 Representación de la geometría y distribución de tensiones en vigas mixtas de sección T



El momento de inercia eficaz o efectiva de la sección queda expresado de la siguiente forma:

$$I_{ef} = I_w + n_c \cdot I_c + \gamma_c \cdot n_c \cdot A_c \cdot a_c^2 + \gamma_w \cdot A_w \cdot a_w^2 \quad (1)$$

Donde se tiene que los coeficientes de reducción de inercia y la posición del eje neutro, según la Figura 3, son:

$$\gamma_c = \frac{1}{1 + k_c} \quad (2)$$

$$k_c = \frac{\pi^2 \cdot E_c \cdot A_c \cdot s}{L^2 \cdot K} \quad (3)$$

$$\gamma_w = 1 \quad (4)$$

$$a_w = \frac{\gamma_c \cdot n_c \cdot A_c}{\gamma_c \cdot n_c \cdot A_c + \gamma_w \cdot A_w} \cdot \left(\frac{h_c + h_w}{2} \right) \quad (5)$$

$$a_c = \frac{h_c + h_w}{2} - a_w \quad (6)$$

donde I_c es la inercia de la sección de hormigón, I_w es la inercia de la sección de madera, n_c es la razón modular, A_c área de hormigón, A_w sección de madera, h_c espesor de la losa de hormigón, h_w altura de la pieza de madera, E_c módulo de elasticidad del hormigón, s es el espaciamiento entre los conectores, K es el módulo de deslizamiento.

Para la determinación del módulo de deslizamiento, se ocupará la formula que establece el Eurocódigo 5 [11] para un estado límite de servicio, y que para uniones entre hormigón y madera es la siguiente:

$$K = 2 \cdot \left(\rho_w^{1,5} \cdot \frac{D}{23} \right) \quad (7)$$

donde K es el módulo de deslizamiento en N/mm, ρ_w es la densidad de la madera en kg/m³ y D es el diámetro del conector en mm.

Las expresiones para la obtención de las tensiones de trabajo en flexión, en el borde de las piezas individuales y en el centroide de ellas, considerando el momento de inercia efectivo y la razón modular, en N/mm², son las siguientes:

$$f_{f,c,c} = \frac{M}{I_{ef}} \cdot \left(\gamma_c \cdot a_c + \frac{h_c}{2} \right) \cdot n_c \quad (8)$$

Hormigón en el borde inferior:

$$f_{f,c,t} = \frac{M}{I_{ef}} \cdot \left(\gamma_c \cdot a_c - \frac{h_c}{2} \right) \cdot n_c \quad (9)$$

Hormigón en el centroide del elemento:

$$f_{g,c} = \frac{M}{I_{ef}} \cdot \gamma_c \cdot a_c \cdot n_c \quad (10)$$

Madera en el borde superior:

$$f_{f,w,c} = \frac{M}{I_{ef}} \cdot \left(a_w + \frac{h_w}{2} \right) \quad (11)$$

Madera en el borde inferior:

$$f_{f,w,t} = \frac{M}{I_{ef}} \cdot \left(a_w - \frac{h_w}{2} \right) \quad (12)$$

Madera en el centroide del elemento:

$$f_{g,w} = \frac{M}{I_{ef}} \cdot a_w \quad (13)$$

en que M es el momento flector, considerado de signo positivo cuando induce solicitudes de compresión en las fibras extremas del ala superior y de tracción en las fibras extremas del ala inferior, en kNm.

La unión de ambas piezas, madera-hormigón, se debe diseñar considerando el flujo de cizalle eficaz máximo, $t_{cz,ef,c}$, que se genera en la junta de contacto de los materiales. Se calcula incluyendo el momento de inercia eficaz, I_{ef} , y la fuerza de corte máximo, Q_{max} , de acuerdo con la siguiente expresión, en kN/m:

$$t_{cz,ef,c} = \frac{Q_{max}}{I_{ef}} \cdot \gamma_c \cdot n_c \cdot S_c \quad (14)$$

$$S_c = A_c \cdot a_c \quad (15)$$

donde S_c es el momento estático del ala, referido al eje neutro de flexión condicionante del diseño y-

El espaciado promedio mínimo requerido entre los medios de unión en m es:

$$S_{req} = \frac{P_{el,dis}}{t_{cz,ef,c}} \quad (16)$$

en que $P_{el,dis}$ es la capacidad de carga de diseño en extracción lateral en una superficie de cizalle del elemento de unión utilizado, en kN.

La tensión máxima de cizalle en el plano de la fibra neutra del alma, $f_{cz,máx}$, se obtiene a partir de la siguiente expresión (en N/mm²):

$$f_{cz,máx} = \frac{Q_{máx} \cdot S_w}{I_{ef} \cdot b_w} \quad (17)$$

$$S_w = \frac{b_w}{2} \cdot \left(\frac{h_w}{2} + a_w \right)^2 \quad (18)$$

donde S_w es el momento estático de la sección del alma dispuesto bajo el eje neutro condicionante del diseño y-y, referido a dicho eje.

4. Modelo experimental

4.1 Probetas mixtas de corte

Se realizó un ensayo de corte para 6 probetas mixtas madera laminada-hormigón, para así poder determinar la rigidez del sistema de conexión por medio del módulo de deslizamiento. Estas probetas están divididas en 2 series, de acuerdo a la disposición de los conectores, en forma perpendicular o inclinada al elemento de fijación.

Al no encontrarse normado este tipo de ensayo, se utilizará la configuración propuesta por el investigadores alemán Glaser [12], en la cual realizaron ensayos en estructuras mixtas de hormigón-madera.

Las probetas están conformadas por una pieza de madera laminada de dimensiones 60 × 16 × 15 cm, al igual que el elemento de hormigón al cual va conectado. Este elemento de hormigón está reforzado por una armadura para pilar ACMA Pe-250. El esquema general del ensayo y las dimensiones y características de las probetas se pueden apreciar en la Figura 4.

La conexión entre ambos elementos se realiza por medio de tirafondos de dimensiones ½" × 6" (12,7 mm × 152,4 mm), los cuales estarán dispuestos en 3 probetas

de forma inclinada (45°) a la fibra de la madera, y en las 3 restantes en forma perpendicular (90°) a la fibra de la madera. Cada probeta estará conformada por 3 tirafondos, introducidos y separados entre sí de acuerdo a lo estipulado en la norma NCh 1198, tal como se muestra en la Figura 5.

Las probetas son colocadas bajo un marco de acero, el cual soporta un pistón hidráulico y que ejerce la carga con que se efectuará el ensayo y que se ve esquematizado en la Figura 4. Esta carga será medida por un lector, el cual va conectado a una celda de carga.

La forma en que están apoyadas las probetas para el ensayo y la aplicación de la carga, tiene relación con los esfuerzos que se requieren para el análisis en la zona de conexión de los elementos (madera-hormigón). Tal como se puede apreciar en la Figura 4, el ensayo se modela como una viga con dos apoyos y dos fuerzas actuantes, con lo cual se obtiene un diagrama de momento, tal que, en el centro de la viga (unión de los elementos) el momento es nulo. Por el contrario, en el

Figura 4 Características generales del ensayo y dimensiones de las probetas [12]

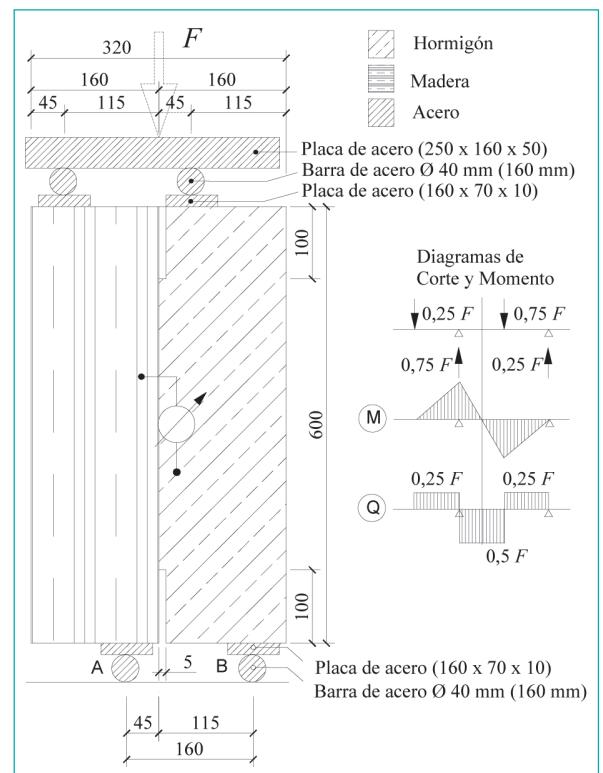


Figura 5 Esquema de las probetas a ensayar y distancias entre conectores

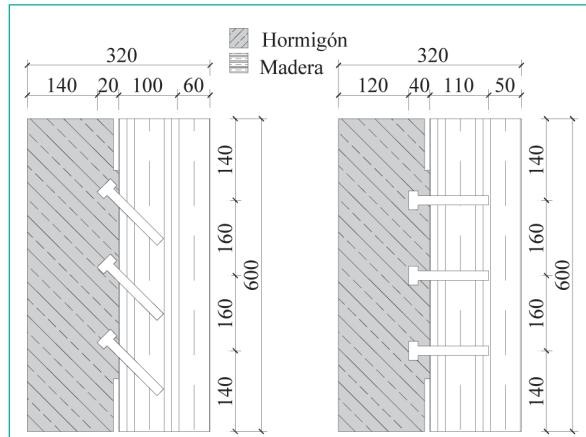
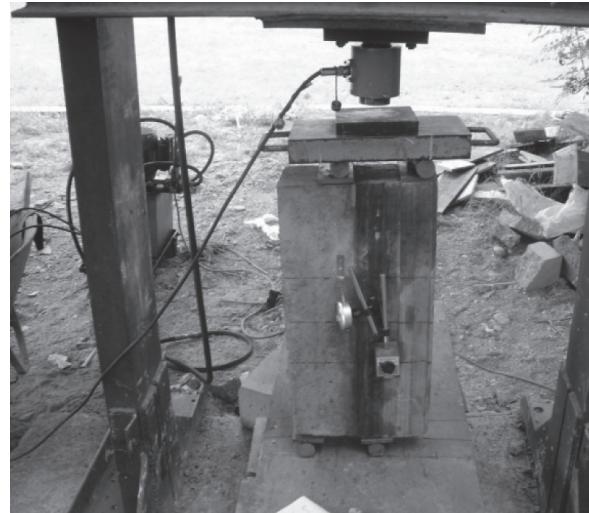


Figura 6 Montaje de las probetas previo a su ensayo



caso del diagrama de corte, se obtiene que el esfuerzo de corte sea máximo en el punto central, con lo cual se tiene la zona de unión de ambos materiales trabajando exclusivamente al corte.

Con la carga actuando en las probetas, se pueden tomar mediciones de los desplazamientos en la zona de unión de ambos materiales, a través de un dial, con lo cual se obtiene el módulo de deslizamiento en la conexión de la estructura mixta.

La identificación de cada una de las probetas se exhibe en la Tabla 1.

Tabla 1 Identificación de las probetas a ensayar

Identificación	Número de conectores	Dirección de los conectores (respecto a la fibra)
SR1	PR01	Perpendiculares 90°
	PR02	
	PR03	
SR2	PR04	Inclinados 45°
	PR05	
	PR06	

El montaje y el ensayo de las probetas se pueden ver en la Figuras 6, 7, 8 y 9.

Figura 7 Probeta con tirafondos perpendiculares después de resistir su carga máxima

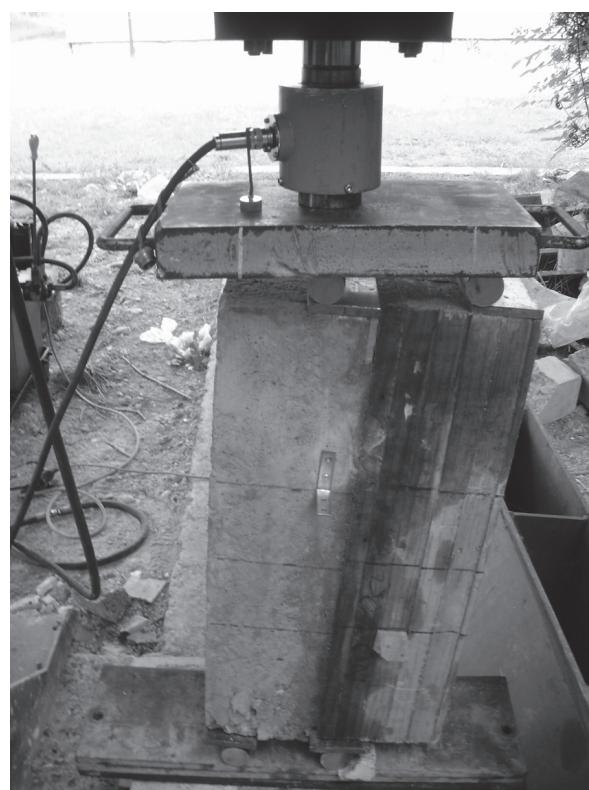


Figura 8 Separación y desplazamiento de los elementos de hormigón y madera laminada en las probetas con tirafondos inclinados



Figura 9 Desplazamientos relativos entre los materiales después de haber cargado las probetas (pernos perpendiculares)



4.2 Ensayo a flexión de una viga mixta madera laminada-hormigón

Se realizó un ensayo a flexión a una viga mixta madera laminada-hormigón, para poder determinar su resistencia máxima, medir las deformaciones verticales y el deslizamiento relativo entre los materiales, y así realizar una comparación con resultados obtenidos en el cálculo teórico de esta viga.

La viga de sección mixta está conformada por una viga de madera laminada de dimensiones $500 \times 26 \times 15$ cm, y una losa de hormigón armado a la cual va conectada por medio de tirafondos dispuestos perpendicularmente a la fibra de la madera. La losa de hormigón está reforzada por una armadura compuesta por una malla del tipo ACMA C139. El esquema general del ensayo y las dimensiones y características de la viga mixta se pueden apreciar en la Figura 10 y Figura 11.

Los tirafondos tienen una dimensión de $\frac{1}{2}'' \times 6''$. La viga de sección mixta estará conformada por 30 tirafondos, separados entre sí cada 15 cm, respetando las distancias mínimas estipuladas en la norma NCh 1198.

La viga es colocada bajo un marco de acero, el cual soporta un pistón hidráulico y que ejerce la carga sobre una viga de acero de gran rigidez y que distribuye la carga en dos puntos, en los tercios de la viga, como se observa en la Figura 10. Esta carga es medida por un lector, el cual va conectado a una celda de carga.

La forma en que está apoyada la viga para el ensayo y la aplicación de la carga, tiene relación con los esfuerzos que se requieren para el análisis del ensayo a flexión. Tal como se puede apreciar en la Figura 11, el ensayo se modela como una viga simplemente apoyada con dos

Figura 10 Características generales del ensayo y dimensiones de la viga mixta

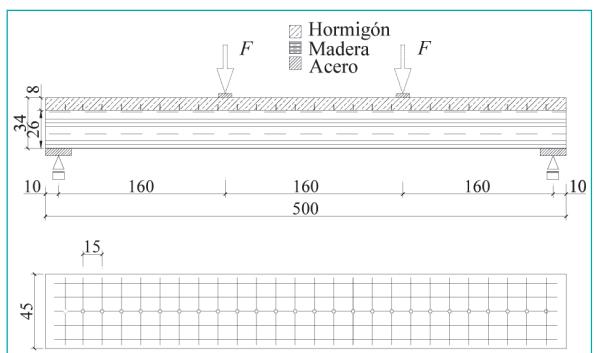
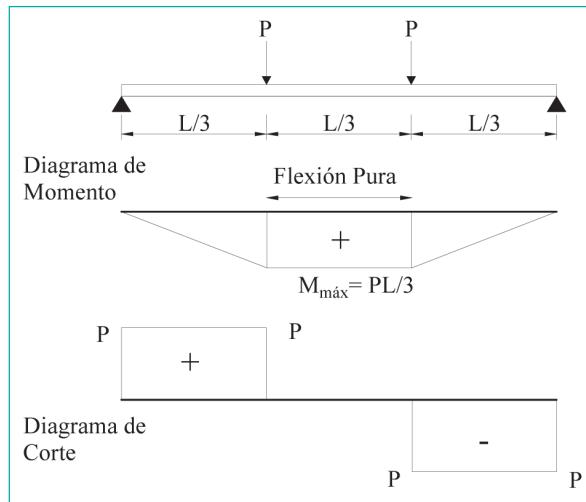


Figura 11 Diagrama de momento y de corte de la viga mixta



fuerzas actuantes en los tercios de la estructura, con lo cual se obtiene un diagrama de momento, tal que, en el tercio central el momento es máximo y es una zona de flexión pura.

Con la carga actuando sobre la estructura, se pueden tomar mediciones de las deformaciones verticales en el centro de la viga a través de un dial, además de los desplazamientos relativos entre ambos materiales medidos en los extremos de la estructura.

Una vez dispuesto todos los elementos para el ensayo, se procede a la aplicación de la carga a la viga mixta madera laminada-hormigón, tomando lectura de los datos aportados tanto por el dial, el lector electrónico y las reglas de medición de desplazamientos. La realización del ensayo se documenta en las Figuras 12, 13, 14, 15, 16 y 17.

Figura 12 Montaje de la viga de transmisión de carga, pistón hidráulico y celda de carga

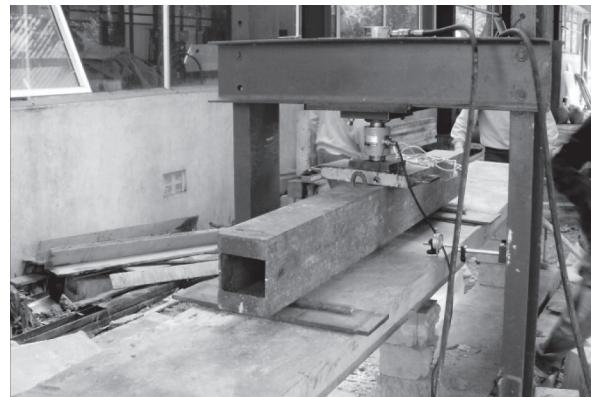


Figura 13 Aparición de la primera falla en la zona flexo-traccionada de la viga de madera laminada



Figura 14 Prolongación de la falla a lo largo de la viga de madera laminada



5. Resultados

Figura 15 Deslizamiento de la losa de hormigón sobre la viga de madera laminada

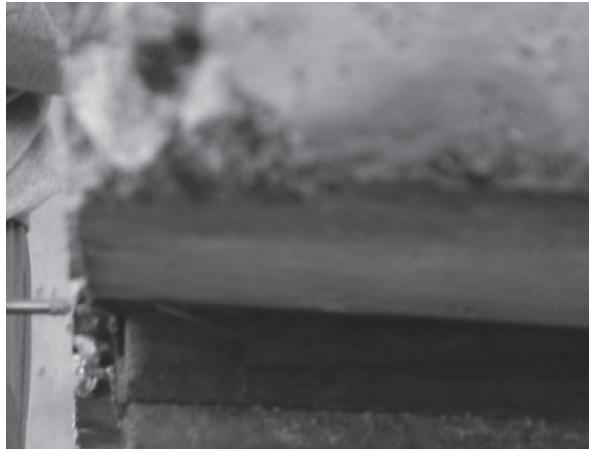


Figura 16 Colapso de la viga mixta



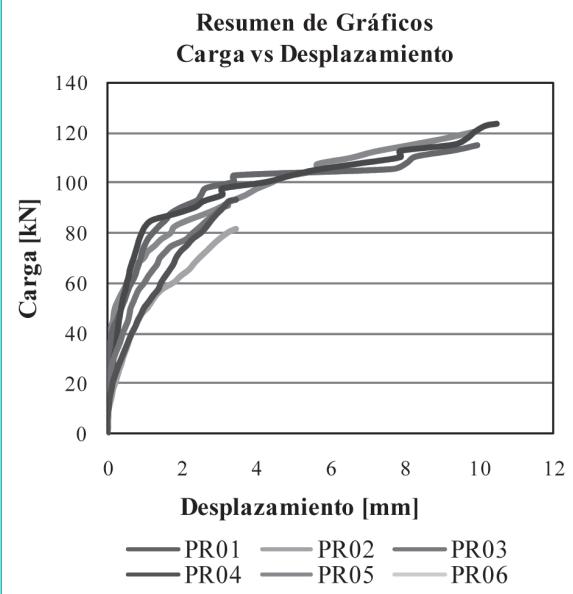
Figura 17 Tira fondos una vez ocurrida la rotura de la viga



5.1 Probetas mixtas de corte

La Figura 18 corresponde a los datos de carga y desplazamiento obtenidos de las probetas de corte, tanto con tirafondos inclinados como perpendiculares.

Figura 18 Resumen de las curvas carga-desplazamiento de ambas series de probetas (tirafondos inclinados y perpendiculares)



Una vez obtenidos los datos de carga y deslizamiento de las probetas de corte, se procede a la determinación del módulo de deslizamiento, el cual se obtendrá de la parte lineal de la curva carga-desplazamiento. Para obtener esta parte lineal de la curva se trazará una recta secante que pasa por el 10% y el 50% de la fuerza de ruptura o de colapso de las probetas y su respectivo desplazamiento, tal como se formula a continuación:

$$K = \frac{\Delta F_u}{\Delta \delta} = \frac{0,5 \cdot F_u - 0,1 \cdot F_u}{\delta(50\%F_u) - \delta(10\%F_u)} \quad (19)$$

Después, se obtiene el módulo de deslizamiento promedio de todas las probetas ensayadas, el cual se utiliza para realizar el cálculo de la estructura mixta principal y

compararlo con el valor teórico obtenido a partir del Eurocódigo 5. Los resultados se resumen en la tabla 4.8.

Tabla 2 Obtención del módulo de deslizamiento según la posición del conector y comparación según el obtenido por el Eurocódigo 5

Serie	Probeta	Resist. Máxima [kN]	Módulo de Desliz. K [kN/mm]	Módulo de Desliz. Promedio [kN/mm]	Módulo de Desliz. EC5 [kN/mm]
	PR1	120,5	32,13		
SR1	PR2	114,5	27,26	30,54	
	PR3	123,3	32,23		11,47
	PR4	91,1	21,69		
SR2	PR5	81,2	16,65	17,65	
	PR6	93,1	14,60		

Según lo expuesto en la Tabla 2, las probetas con tirafondos dispuestos en forma perpendicular a la fibra de la madera poseen una gran capacidad de resistir la carga solicitante y demostraron tener una excelente rigidez en la conexión, según los valores obtenidos del módulo de deslizamiento, los cuales superan, en algunos casos, en tres veces los calculados teóricamente a través del Eurocódigo 5.

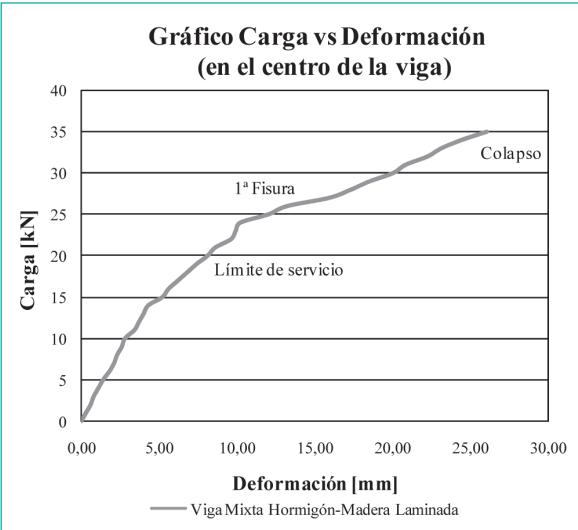
El comportamiento de las probetas con tirafondos inclinados en 45° trabajando en compresión, fue algo inferior comparado a los dispuestos perpendicularmente, registrando valores dos veces menores en su módulo de deslizamiento, y de hasta un 35% por debajo de la carga máxima resistida. Además, en el ensayo de esta serie de probetas todas presentaron separación entre el hormigón y la madera, debido al efecto de palanca que se genera entre la parte del tirafondo embebida en el hormigón y la introducida en la madera, incidiendo significativamente en la rigidez de la conexión y su capacidad de carga. No obstante, los módulos de deslizamiento de estas probetas, al igual que las con tirafondos perpendiculares, fueron superiores que al calculado por el Eurocódigo 5, variando entre un 50% y 100% más.

5.2 Viga mixta madera laminada-hormigón

Según los datos obtenidos de este ensayo, la viga mixta se comportó de manera similar a lo calculado teóri-

camente, en cuanto al origen de la falla producida, flexotracción en la madera, y a la deformación vertical resultante. En cuanto a la carga resistida, determinada a partir del límite superior del rango elástico, Figura 19, se produjo cierta variación a lo calculado teóricamente (-17%). La determinación de la carga resistida incorpora un factor de seguridad que se aplica a las tensiones básicas de la madera (1,2 para flexión), según la normativa vigente [13].

Figura 19 Tirafondos una vez ocurrida la rotura de la viga



Además, se midió el módulo de deslizamiento entre ambos elementos que componen la viga mixta, arrojando valores un dos veces mayor que el valor calculado con el Eurocódigo 5, demostrando la gran rigidez en la conexión por medio de tirafondos. El módulo de elasticidad experimental de la viga mixta madera laminada-hormigón fue comparado con el que se obtiene usando diferentes módulos de deslizamiento, según sea por Eurocódigo 5 o el obtenido experimentalmente. No se observaron grandes variaciones entre los diferentes valores (Tabla 3), pero prácticamente son el doble del que posee la madera, lo cual indica cuán beneficioso es el sistema mixto madera-hormigón.

6. Resumen y conclusiones

En el presente trabajo se ha diseñado y fabricado una estructura mixta de madera laminada-hormigón con conectores simples, tipo tirafondo. La estructura cumplió

a cabalidad las especificaciones del diseño, consiguiendo que ambos materiales se comporten y trabajen como un todo, demostrando así, la eficiencia del sistema de conexión, otorgando una alta rigidez en el plano de unión.

Este tipo de estructuras mixtas posee un gran potencial de utilización en puentes menores de vías secundarias, debido a la combinación precisa de los beneficios de ambos materiales. El hormigón, además de aportar su gran resistencia a la compresión, brinda a la madera la necesaria protección para las condiciones ambientales adversas y de desgaste al ser, el hormigón, utilizado como carpeta de rodadura. La madera a su vez otorga la rigidez necesaria a la estructura y reduce considerablemente el peso del conjunto.

Se ensayaron dos configuraciones de conexión entre los elementos de hormigón y madera laminada, con tirafondos inclinados y perpendiculares a la fibra de la madera, cada probeta con 3 tirafondos (de $\frac{1}{2}'' \times 6''$). Los resultados obtenidos de los ensayos de corte fueron satisfactorios. Las probetas con tirafondos perpendiculares demostraron tener una gran rigidez en el plano de conexión, arrojando valores del módulo de deslizamiento 3 veces superiores a los calculados teóricamente con el Eurocódigo 5. La diferencia puede deberse a que la fórmula entregada por la norma europea resulta especialmente sensible a los valores de la densidad de la madera. También se debe tener en consideración que la fórmula entregada por el Eurocódigo en condición de servicio, supone la aplicación de un factor de seguridad elevado, dado el rango existente hasta la condición de rotura. Las probetas con tirafondo inclinados tuvieron resistencia alrededor de un 35% inferior a las con tirafondos perpendiculares, por la separación de los

materiales. Aun así se obtuvo valores del módulo de deslizamiento por sobre los de la norma europea, de hasta un dos veces mayor.

Se construyó una viga mixta de hormigón-madera laminada, la cual fue sometida a un ensayo de flexión hasta la rotura. La viga sufrió una falla en la zona flexotraccionada de la madera laminada, a los 26 kN de carga vertical (ruptura y colapso a los 35 kN), esto ocurrió dentro del tercio central de la viga, sector que está sometido a flexión pura. Esta falla se produjo en una unión de tope de la madera laminada, la cual había sido catalogada como una zona débil previo al ensayo, incidiendo directamente, en que la resistencia en el límite elástico (21,6 kN) fuese inferior a la que se calculó teóricamente. La conexión entre ambos elementos, por medio de tirafondos, se comportó con una elevada rigidez, hecho que quedó de manifiesto, en los mínimos desplazamiento relativos entre los materiales (alrededor de 2 mm) y un módulo de deslizamiento elevado, cercanos al doble que el calculado con el Eurocódigo 5.

Con los datos obtenidos del ensayo a flexión, se pudo obtener el módulo de elasticidad experimental de la estructura mixta. Este módulo de elasticidad fue calculado de tres formas diferentes, dependiendo del módulo de deslizamiento que se ocupara, ya sea el Eurocódigo o los obtenidos experimentalmente de los ensayos de corte y flexión. Estos módulos de elasticidad no presentaron una gran variación entre sus valores (entre un 15% y 30%), pero queda de manifiesto la gran eficiencia de este sistema estructural mixto, ya que los tres módulos calculados son muy superiores al de la madera laminada (dos veces mayor). Esto muestra el trabajo en conjunto que están realizando los materiales.

Tabla 3 Principales resultados obtenidos en el ensayo de flexión

VIGA MIXTA	Resistencia en el Límite de Servicio [kN]	Carga Máxima de Ensayo (teórica) [kN]	Deformación Vertical Máxima [mm]	Deformación Vertical máx. (teórica) [mm]
	21,6	26,1	13,2	11,9
Módulo de Deslizamiento [kN/mm]	E experimental según K EC 5 [kN/mm ²]	E experimental según K probetas de corte [kN/mm ²]	E experimental según K probetas de corte [kN/mm ²]	E experimental según K viga mixta [kN/mm ²]
	21,2	19,6	15,0	16,4

Referencias

1. Sánchez C. y Urzúa R. (2006). Diseño y Cálculo de Superestructura de Puente de Madera Laminada. Tesis Ing. Civ. Santiago, Universidad de Santiago de Chile.
2. Ceccotti A. (1995). Timber-concrete composite structures. Timber Engineering Step 2. The Netherlands: Centrum Hout. pp.1-12.
3. Bathon L. (2007). Green Technologies for Structural Retrofit and Refabrications with Wood. FH Wiesbaden University.
4. Astori R., Barrios D'ambra R., Solari F., Kosteski L. (2007). Análisis Numérico-Experimental de un Prototipo de Sección Mixta de Hormigón-Madera. Asociación Argentina de Mecánica Computacional Resistencia, vol. 2. pp. 111-128.
5. De Moraes V. (2007). Ponte Mista de Madeira-Concreto em Vigas Trelicadas de Madeira. Tesis Mag. Ing. Civ. São Paulo, Universidad Estadual Paulista.
6. Miotto J.L. (2009). Estructuras Mistas de Madeira-Concreto: Avaliação das Vigas de Madeira Laminada Colada Reforzadas con Fibra de Vidrio. Tesis doctoral. São Carlos, Universidad de São Paulo.
7. Alcántara P. (2005). Análisis Teórico-Experimental de un Tablero Mixto Madera-Concreto Compuesto por Vigas Circulares. Tesis Magíster. São Paulo, Universidad Estadual Paulista.
8. Pigozzo J. (2004). Estudos e aplicações de barras de aço coladas, como conectores em lajes mistas de madeira e concreto para tabuleiros de pontes. Tesis doctoral. São Carlos, Universidad de São Paulo.
9. Bletz O. y Bathon L. (2008). Holz-Beton-Verbund-Verkehrsbrücken. Holzbau – die neue Quadriga, no. 5/2008, pp. 43-48.
10. Instituto Nacional de Normalización (INN). (2006). NCh 1198 Of.2006; Madera-Construcciones en Madera-Cálculo. Santiago, INN-Chile.
11. European committee for standardization (2006). Eurocódigo 5; Proyecto de estructuras de madera; Part 1-1: Reglas generales y reglas para edificación. Bruselas.
12. Glaser R. (2005). Zum Kurz- und Langzeitverhalten von Holz-Beton-Verbundkonstruktionen. Tesis doctoral. Cottbus, Brandenburgischen Technischen Universität. Alemania.
13. Corporación Chilena de la Madera (CORMA). (2003). Centro de Transferencia Tecnológica-Pino Radiata. Santiago, CTT-Unidad de Educación.