



CONCURSO

INGENIERÍA Y CONSTRUCCIÓN

La VIII versión del concurso, tiene como objetivo destacar a aquellos alumnos de las carreras de Ingeniería y construcción civil que hayan desarrollado o se encuentren desarrollando **Memorias / Investigaciones / Proyectos de título / Patentes de Ingeniería y Construcción.**





EQUIPO ING2841

ENSAYO PUSH-OUT PARA CONECTORES DE CORTE DE LOSAS COMPUESTAS DE MADERA-HORMIGÓN

Fabián Arriagada, Edgard Jaque,
Grecia Núñez, Javiera Valenzuela

INTRODUCCIÓN

Un sistema mixto TCC (*Timber Concrete Composite*) está conformado por vigas de madera que soportan una ligera cubierta de hormigón, esta alternativa mantiene los beneficios estéticos y medioambientales que posee la madera, potenciando su capacidad estructural con la colaboración del hormigón.

La riqueza arquitectónica que aporta la madera en la percepción de los espacios, generación de ambientes de confort, y a su vez la apreciación de la misma en el contexto inmediato de su emplazamiento, se conserva en los sistemas mixtos de hormigón-madera.



UMass Amherst, EE.UU.



LifeCycle Tower, Austria

Producto de lo anterior, este compuesto mixto goza de una versatilidad que le permite tener parte en proyectos de rehabilitación de inmuebles patrimoniales o históricos, y así mismo participación en edificaciones de obras civiles como puentes.

La intervención de sistemas mixtos de hormigón-madera, nos podría acercar de manera gradual a la construcción en madera en una escala mayor a la actual y adicionalmente fomentar la reducción del uso de hormigón armado.

UMass Amherst y LifeCycle Tower son hitos que utilizan losas compuestas de hormigón-madera en su estructura

ENSAYO PUSH-OUT PARA CONECTORES DE CORTE DE LOSAS COMPUESTAS DE MADERA-HORMIGÓN

La propuesta de un sistema mixto madera - hormigón se fundamenta en el requerimiento de un elemento que soporte la tracción y compresión simultáneamente, aprovechando la capacidad estructural de la madera y hormigón respectivamente.

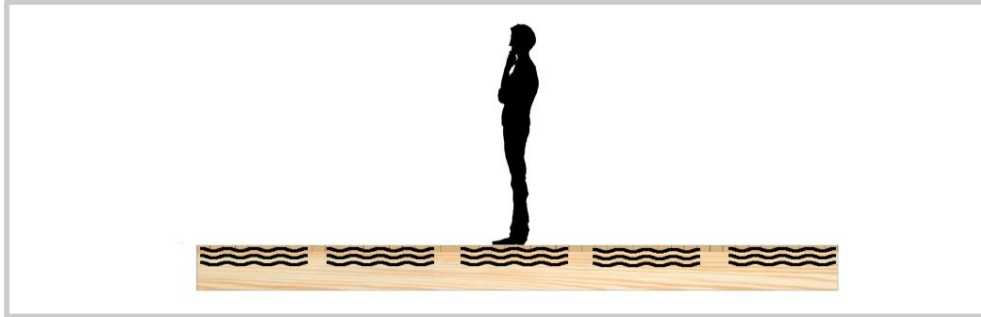
La acción compuesta del sistema genera un elemento eficiente, dependiendo principalmente del deslizamiento entre los materiales, el cual es inevitable en la práctica. Encontrar la configuración de conectores que genere los menores desplazamientos de interfaz dará como resultado un compuesto con mayor rigidez flexural.

El siguiente estudio busca establecer la mejor configuración de conectores tirafondo, mediante la obtención empírica de su módulo de deslizamiento K_s , el cual da cuenta del nivel de rigidez de la conexión.

Para lograr esta caracterización de la conexión, se llevan a cabo ensayos de tipo *push-out*, que determinan parámetros de interés tales como: modos de falla, ductilidad, resistencia y rigidez (asociada a K_s).

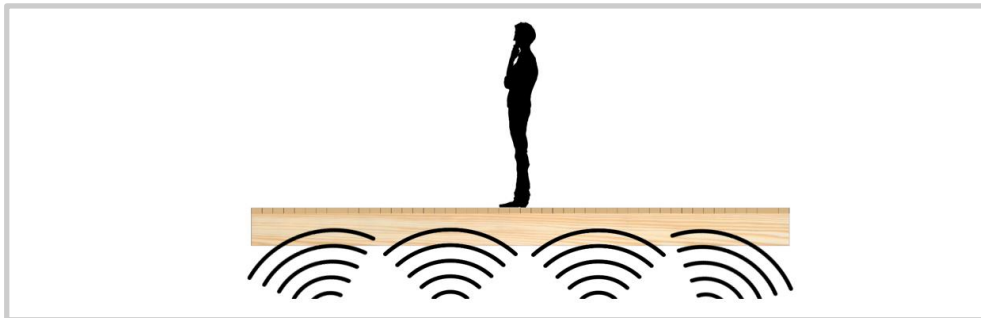


VENTAJAS POR SOBRE LOSAS DE MADERA



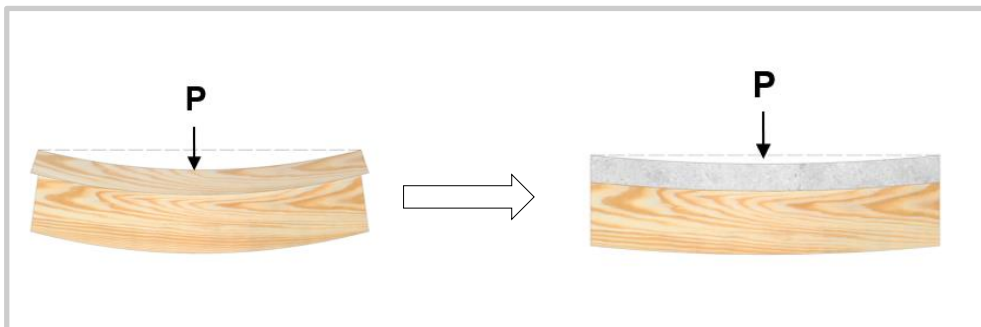
Reducción en vibraciones

El sistema compuesto tiene una mayor rigidez comprobada, en consecuencia, las vibraciones se reducen a raíz de un aumento en la razón de amortiguamiento de ≈ 1 a $\approx 2\%$ ¹.



Aumento de aislación acústica

La densidad que aporta el hormigón en el sistema mixto permite aumentar la barrera acústica, impidiendo que las ondas traspasen el compuesto fácilmente.

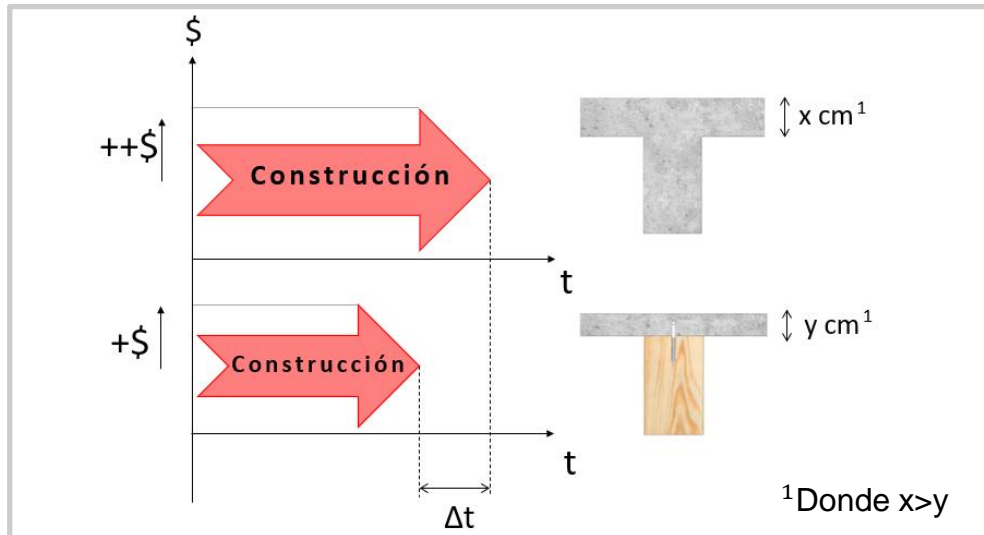


Mejor comportamiento estructural

El compuesto aumenta la rigidez, logrando una mayor capacidad de carga y menores deformaciones. Además, genera un diafragma rígido que permite un análisis de diseño simplificado.

¹ Hu, Chui & Onysko, 2001

VENTAJAS POR SOBRE LOSAS DE HORMIGÓN ARMADO



Reducción del peso propio

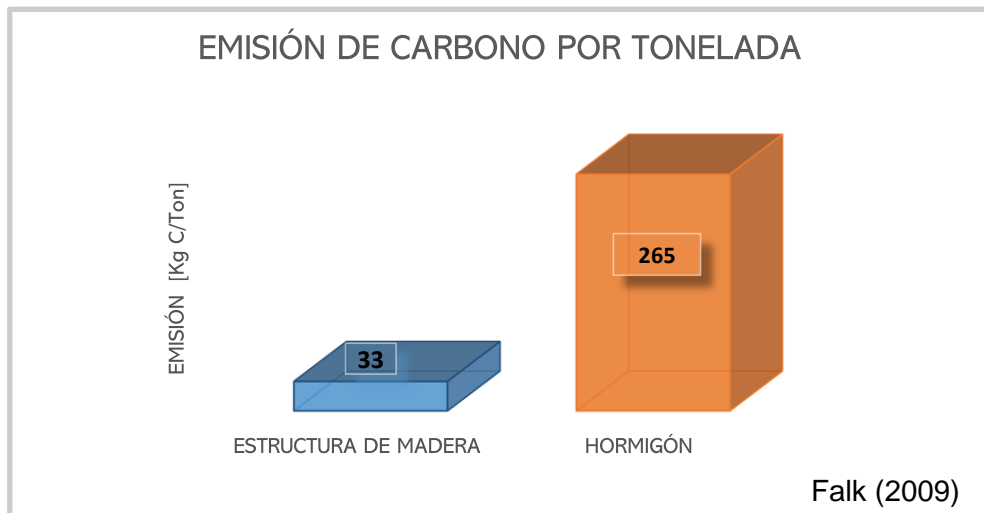
El menor espesor de losa en la sección de hormigón sumado al menor peso específico de las viguetas de madera permiten hacer evidente un menor peso propio, lo cual conllevará a elementos de menor dimensión en la estructuración del proyecto.

Recorte en costos y tiempos de ejecución

El compuesto posee una conexión fácil y eficaz de materializar, además, debido a la disminución de uso de hormigón se genera una reducción de costos.

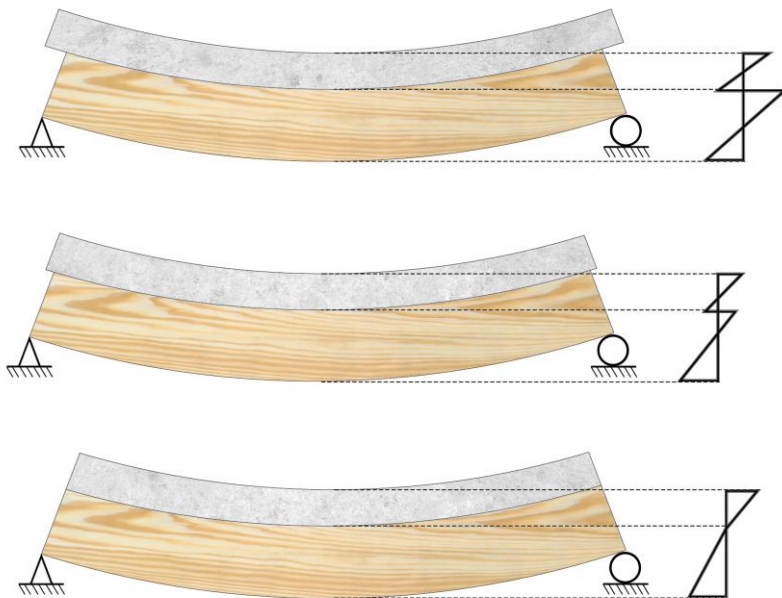
Disminución en la emisión de gases de efecto invernadero

El hormigón armado posee una alta emisión de gases de efecto invernadero, sin embargo, su eficiencia estructural pesa por sobre esta característica. Es así como los sistemas compuestos son una alternativa viable que permite reducir el uso de este material.



ENSAYOS *PUSH-OUT*

Los ensayos de tipo *push-out* son pruebas experimentales de baja escala, enfocadas en analizar la respuesta al corte de la conexión hormigón-madera. El objetivo principal es caracterizar el comportamiento mecánico de un conector.

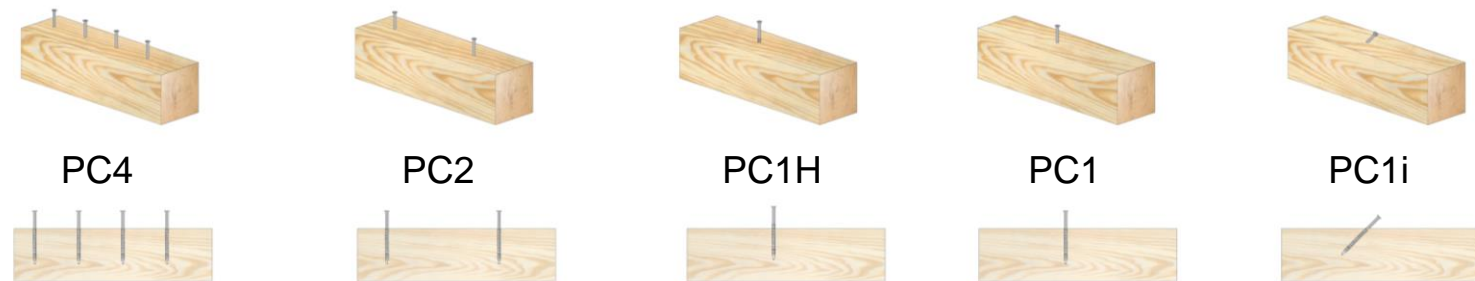


¿Por qué realizar ensayos *push-out*?

- La respuesta de un sistema mixto madera-hormigón depende en gran medida del conector, y el ensayo *push-out* caracteriza la conexión.
- La acción compuesta del sistema, su rigidez flexural, las deflexiones, los deslizamientos, y los esfuerzos internos, están sujetos al desempeño del conector.
- El diseño de losas compuestas madera-hormigón requiere parámetros que deben determinarse experimentalmente, como la resistencia al corte de la conexión, y su rigidez.

ENSAYOS *PUSH-OUT*

Esta investigación contempla el análisis del tornillo tirafondo, por ser una conexión fácil de instalar y de bajo costo. Se ensayan 20 probetas, con diferentes configuraciones de tirafondo, variando su empotramiento, espaciado e inclinación. Al final del ensayo se puede desprender cual configuración tiene mejor desempeño. El ensayo es conforme la normativa europea EN 26891 (CEN, 1991)



Para cada disposición de tornillo se fabrican 4 probetas, y se someten a corte midiendo carga y deslizamiento.

Materiales

Madera

- Aserrada, pino radiata
- 5"x5"

Hormigón

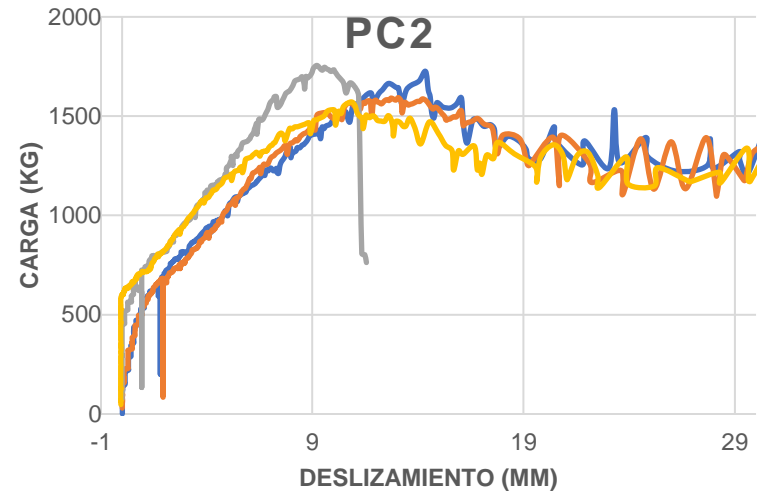
- G30
- 6 cm de espesor

Conector

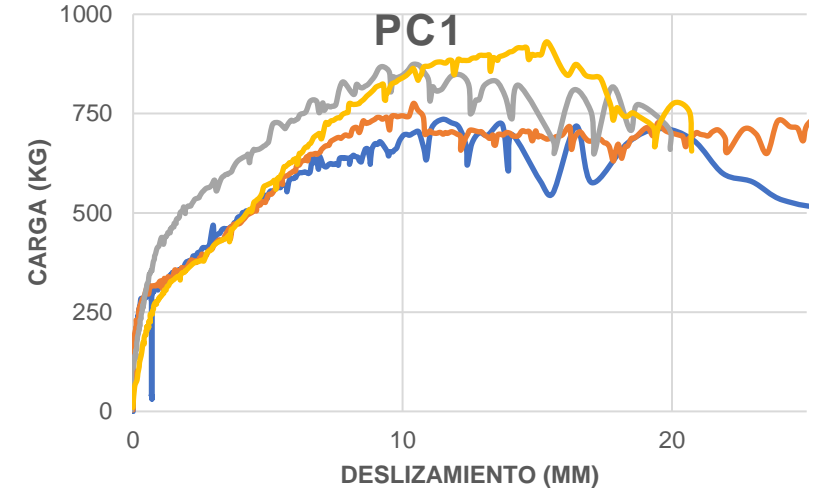
- Tornillo tirafondo
- L=5"
- Diámetro= ¼ "

RESULTADOS

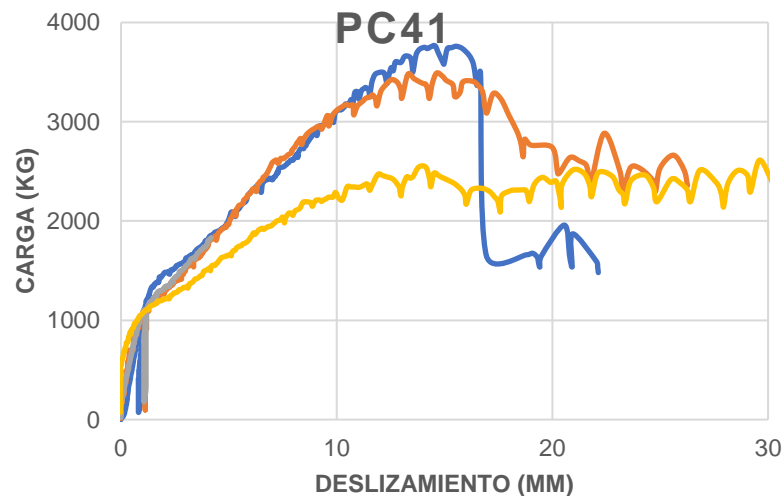
Se presentan las curvas de carga-deslizamiento para cada configuración. Cada color representa uno de los cuatro especímenes ensayados.



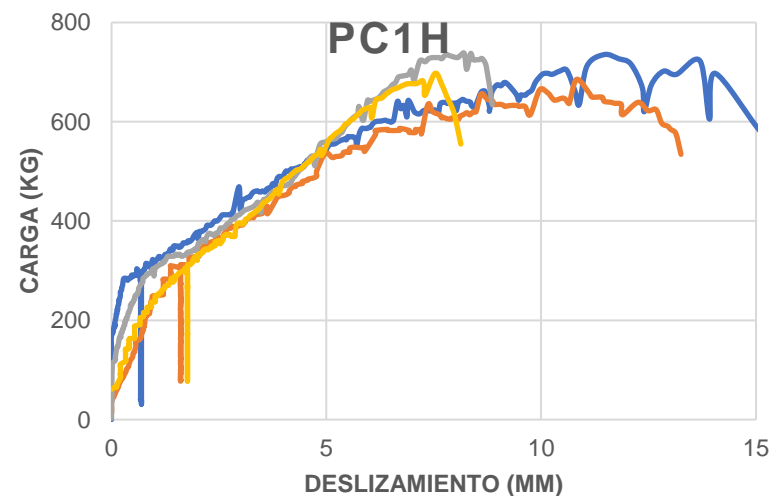
2 tornillos en 90°, espaciado de 25 cm



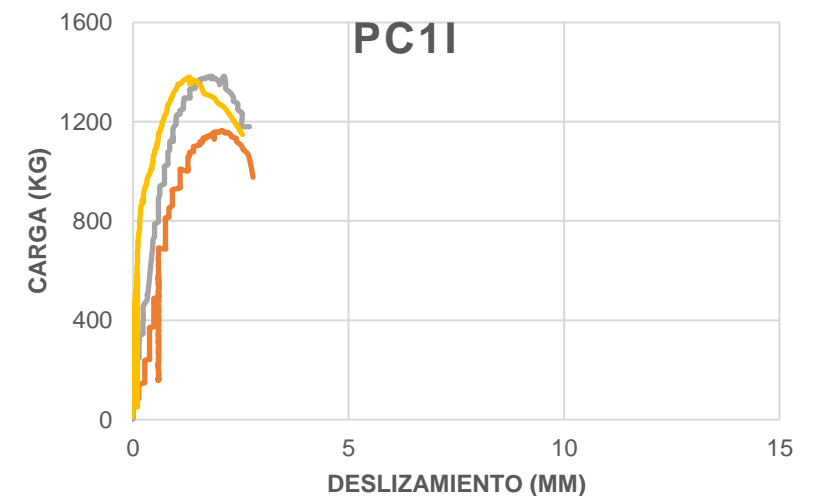
1 tornillo en 90°, hilo empotrado en la madera



4 tornillos en 90°, espaciado de 10 cm



1 tornillo en 90°, porción del hilo expuesto al hormigón



1 tornillo en 45°, hilo empotrado en la madera

RESULTADOS

La carga máxima registrada en el ensayo da cuenta de la resistencia de la conexión, en tanto que el módulo de deslizamiento K_s refleja la rigidez. Se muestra una tabla resumen de cada configuración

Configuración	Resistencia (kg)	K_s (kg/mm)
PC1	828.8	428.4
PC1i	1309.0	2263.1
PC1H	714.0	233.7
PC2	1660.7	600.5
PC4	3627.3	940.0

- La figura indica la resistencia promedio que alcanza cada disposición de tirafondo.
- La resistencia promedio por conector en PC2 es de 830 kg.
- La resistencia promedio por conector en PC4 es de 906 kg.

Módulo de deslizamiento

El módulo de deslizamiento K_s se entiende como la carga necesaria para generar un deslizamiento unitario en la interfaz, y en definitiva representa la rigidez del conector. La normativa europea EN 26891 expone una formulación ampliamente usada para determinar el módulo de deslizamiento K_s .

$$K_s = \frac{0.4 F_{est}}{\frac{4}{3} (v_{04} - v_{01})}$$

- F_{est} : Carga máxima alcanzada.
- v_{04} : Deslizamiento en el 40% de F_{est} .
- v_{01} : Deslizamiento en el 10% de F_{est} .

CONCLUSIONES

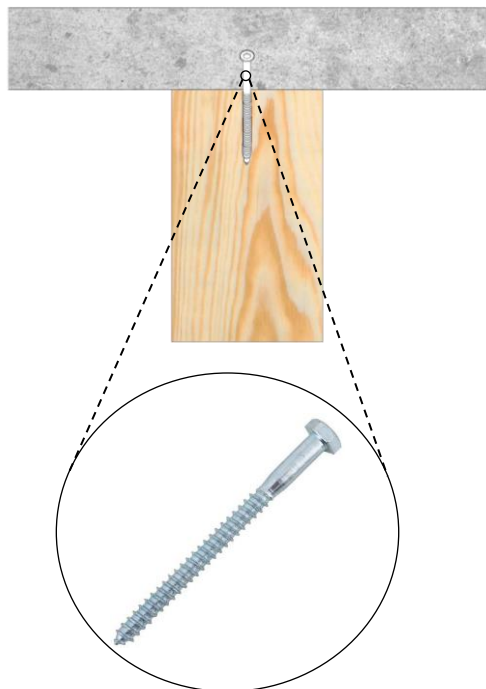
- Comportamiento del conector es predominantemente no lineal.
- La resistencia de la conexión es inversamente proporcional a la humedad de la madera.
- Exponer parte del hilo del tornillo en el hormigón podría generar más adherencia, pero produce una disminución en la resistencia, porque el plano de corte se sitúa en una zona débil del tirafondo.
- No se observa efecto grupo en la resistencia producto de la acumulación de conectores hasta espaciamientos de 10 cm.
- El tirafondo es una conexión con una favorable capacidad de deformación dúctil. La rigidez y resistencia de este conector son aceptables y funcionales.
- Es recomendable instalar los tornillos con una inclinación de 45° , porque es la configuración que tiene mejor desempeño. Esta disposición induce la tracción del conector y para eso en un sistema de losa compuesta la inclinación debe ser con las cabezas del tirafondo apuntando a los apoyos.



DISEÑO DE LOSA COMPUESTA CON MÉTODO GAMMA

Se desarrolla un ejemplo práctico de diseño de losa mixta de hormigón-madera, aplicando los parámetros experimentales del tirafondo inclinado en 45°, y otras consideraciones que se desprenden del ensayo.

Los métodos de diseño tradicionales para elementos compuestos que contemplan la sección equivalente o transformada, no son válidos para las losas TCC, producto del inevitable deslizamiento en la interfaz madera-hormigón. Por el mismo motivo, el cálculo de las tensiones solicitantes no es trivial. Existen varias metodologías que estiman estas tensiones, dentro de ellos se encuentra el método Gamma, especificado en el Eurocódigo 5 y NCh 1198.



Consideraciones iniciales

- Hormigón G30
- Espesor 6 cm
- Armadura de retracción

- Madera laminada encolada pino radiata
- Sección 20x12
- Luz de viga $l = 3.6 m$
- Espaciamiento entre vigas 35 cm

- Resistencia $R_c = 1309 kg$
- Rigidez $K_s = 2263 kg/mm$
- Espaciamiento entre conectores $s = 10 cm$

Cargas y sobrecarga

Las cargas son estimadas según NCh 1537. La combinación de carga es la que produce una flexión más desfavorable NCh 3171.

- PP madera = $700 \frac{kg}{m^3}$
- PP hormigón armado = $2500 \frac{kg}{m^3}$
- Sobrecarga = $5 kPa$
- Combinación de carga: $q = 1.2D + 1.6L$

DISEÑO DE LOSA COMPUESTA CON MÉTODO GAMMA

Los parámetros propios del método consideran la elasticidad de los materiales (E_w , E_c), el área de la sección (A_w , A_c), la rigidez del conector (K_s), el espaciamiento entre conectores (s), la luz de la viga (l), la inercia (I_w , I_c) y distancias al eje neutro compuesto (a_w , a_c).

Tanto la elasticidad de la madera, como sus tensiones admisibles de diseño, son determinadas conforme NCh 2165 y NCh 1198.

Parámetro gamma y rigidez flexural efectiva

$$\gamma_c = \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 \cdot E_c \cdot A_c \cdot s}{K_s \cdot l^2}} = 0.333$$

$$a_w = \frac{\gamma_c \cdot E_c \cdot A_c \cdot H}{2\gamma_c \cdot E_c \cdot A_c + 2\gamma_w \cdot E_w \cdot A_w} = 6.4 \text{ cm}$$

$$a_c = \frac{H}{2} - a_w = 6.8 \text{ cm}$$

$$EI_{ef} = E_c \cdot I_c + E_w \cdot I_w + \gamma_c \cdot E_w \cdot A_c \cdot a_c^2 + \gamma_w \cdot E_w \cdot A_w \cdot a_w^2$$

$$EI_{ef} = 208.21 \text{ ton} \cdot \text{m}^2$$

γ_c es también llamado el parámetro gamma, que representa el grado de acción compuesta o eficiencia del conector. En conectores discontinuos el máximo es 0.4, por lo tanto es aceptable. γ_w es constante e igual a 1.

a_w y a_c son distancias desde el centro de gravedad de la madera y hormigón respectivamente hasta el eje neutro de tensiones compuestas. H es la altura total de la sección compuesta.

EI_{ef} es la rigidez flexural efectiva de la losa mixta de madera-hormigón. Este parámetro permite determinar finalmente las tensiones solicitantes.

DISEÑO DE LOSA COMPUESTA CON MÉTODO GAMMA

Previamente se debe determinar el momento y corte máximo en la sección, suponiendo condición de apoyo simple en ambos extremos de la losa. $Mu = \frac{q \cdot l^4}{8} = 0.6 \text{ ton} \cdot m$; $Vu = \frac{q \cdot l}{2} = 0.67 \text{ ton}$. Posteriormente, se comparan los esfuerzos solicitantes, con las tensiones resistentes.

Tensiones solicitantes

Tracción y flexión en la madera

$$\sigma_t = \frac{Mu}{EI_{ef}} \cdot Ew \cdot aw = 16.35 \text{ kg/cm}^2$$

$$\sigma_f = \frac{Mu}{EI_{ef}} \cdot \frac{hw}{2} \cdot Ew = 25.37 \text{ kg/cm}^2$$

Compresión del hormigón

$$\sigma_c = \frac{Mu}{EI_{ef}} \cdot Ec \cdot (ac \cdot \gamma_c + \frac{hc}{2})$$

$$\sigma_c = 42 \text{ kg/cm}^2$$

Corte en el tirafondo

$$V_c = \frac{Vu}{EI_{ef}} \cdot Ec \cdot Ac \cdot ac \cdot \gamma_c \cdot s = 436 \text{ kg}$$

Tensiones resistentes de diseño

Tracción y flexión en la madera

$$R_f = 82.3 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$R_t = 25.7 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

Compresión del hormigón

$$f_c = 300 \text{ kg/cm}^2$$

Corte del tirafondo

$$R_c = 1309 \text{ kg}$$

Verificaciones

Tracción y flexión en la madera

$$\frac{\sigma_t}{R_t} + \frac{\sigma_f}{R_f} = 0.944$$

Compresión del hormigón

$$\frac{\sigma_c}{f_c} = 0.168$$

Corte en el tirafondo

$$\frac{V_c}{R_c} = 0.333$$

Deflexiones

$$\Delta = \frac{5 \cdot q \cdot l^4}{384 \cdot EI_{ef}} = 3.9 \text{ mm} \quad \Delta_{adm} = \frac{l}{300} = 12 \text{ mm}$$

A través del método Gamma se ha verificado el diseño de este sistema usando un conector común, confirmando la factibilidad de las losas compuestas y comprobando que la propuesta es funcional. Este diseño se puede optimizar variando el espaciamiento conforme cambia el corte o usando un diámetro de tirafondo mayor. Para que esta alternativa sea más competitiva con el resto de opciones, y penetre en el mercado, es conveniente la prefabricación de estos sistemas.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos la asistencia brindada en los laboratorios del Departamento de Ingeniería civil en Obras Civiles de la Universidad de Santiago de Chile, al personal y académicos que nos prestaron su tiempo y colaboración, especialmente a Sergio Yáñez Cart, Carlos Felipe Guzmán y Felipe Peña Galaz.

BIBLIOGRAFÍA

Clouston, P., & Schreyer, A. (2006). Wood-concrete composites: A structurally efficient material option. *Civil engineering practice* 21(1), 5-22.

Mushina, J., Mushina, W., Ghafar, N. A., Yeoh, D., & Boon, K. H. (2019). Experimental test of nail and screw connectors for timber concrete composite deck. *International journal of civil engineering and technology* 10(3), 361-375.

Yeoh, D. (2010). Behaviour and design of timber-concrete composite floor system. Nueva Zelanda: Tesis doctoral, Universidad de Canterbury.

