

# Análisis de los métodos experimentales de Turrini-Piazza y de Cappretti-Ceccotti para el diseño de secciones compuestas de madera-hormigón como refuerzo de forjados horizontales de madera

**Jennifer López Guevara**

[jlopezg@civil.cujae.edu.cu](mailto:jlopezg@civil.cujae.edu.cu)

**Marlon Cruz Benítez**

**Alejandro Antonio Fernández Mena**

Universidad Tecnológica de La Habana CUJAE (Cuba).

**Resumen:** El refuerzo de forjados horizontales de madera mediante el uso de métodos experimentales de cálculo requiere de una metodología para ser implementada bajo las condiciones de nuestro país. El estudio de los antecedentes en el campo de investigación de las secciones compuestas madera-hormigón abarca el refuerzo de forjados con el objetivo de incrementar la pérdida de capacidad portante ante sobrecargas por cambios de uso. El cálculo para la determinación de la capacidad portante de los forjados es basado en la norma cubana de madera con adaptación de los requerimientos actuales de seguridad ante el fuego, cálculo que puede ser generalizado a cualquier forjado. Los resultados obtenidos analíticamente, luego de aplicados los métodos experimentales de cálculo de los autores Turrini-Piazza y Cappretti-Ceccotti, a cinco casos de estudio ubicados en el Centro Histórico de La Habana, arrojan que se logra disminuir considerablemente la deformación, en alrededor de un 90-95 % con respecto a la deformación inicial del forjado una vez realizado el cálculo con estos métodos.

**Palabras clave:** Métodos experimentales de cálculo; sección compuesta madera-hormigón; capacidad portante; sobrecarga; deformación.

## **Analysis of Turrini-Piazza and Cappretti-Ceccotti experimental methods for designing wood-concrete composite sections as reinforcement of forged horizontal wood**

**Abstract:** The reinforcement of forged horizontal wood by using experimental calculation methods requires a methodology to be implemented considering conditions of our country. The study of the research record related to wood-concrete composite sections reaches the forged reinforcement with the aim of increasing the loss of bearing capacity due to overloads for changes in use. The calculation for determining the bearing capacity of the forge is based on the Cuban standards for wood using, adapting them to the current fire safety requirements, a calculation that can be generalized to any forged. The results obtained analytically; after applying Turrini-Piazza and Cappretti-Ceccotti calculation experimental methods to five case studies located in the Historic Center of Havana, show that the deformation is considerably reduced at about 90-95% with respect to the initial deformation of the forged once used these methods to do the calculation.

**Keywords:** Experimental calculation methods; wood-concrete section; bearing capacity; overload; deformation.

## Introducción

El interés de disímiles autores por las estructuras compuestas de madera-hormigón ha desencadenado el estudio de métodos de cálculo que tomen en cuenta todos los elementos y sus comportamientos ante las cargas. En ellos se busca optimizar el costo del proceso de ejecución, así como evitar deformaciones no deseadas. Como ya se ha corroborado, el punto clave del éxito de la sección compuesta madera-hormigón se halla en los conectores, el estudio de los modelos analíticos de cálculo por varios autores que han desarrollado experimentalmente esta solución ha demostrado que mediante esta técnica se mejora considerablemente la resistencia a flexión y a cortante del forjado existente y se obtienen soluciones más rígidas, que dan lugar a menores flechas y a la eliminación de vibraciones molestas (Ahmadi y Saka, 1993); (Gelfi y Giuriani, 1970); (Zúñiga, 2009); (Juan, 2016).

En una primera etapa de trabajo se ha desarrollado un compendio de lo ya examinado por otros autores sobre el tema. Los métodos de cálculo analizados siguen una similar formulación a la hora de realizar las comprobaciones necesarias para cada uno de los elementos que intervienen en el conjunto (hormigón-conectores-madera). Plantean la viga compuesta madera-hormigón como elemento estructural fundamental del forjado, es decir, homogeneizar la sección. Los autores basan el análisis en el comportamiento de una pieza en T de madera-hormigón, como una situación intermedia entre una conexión infinitamente rígida y la sección sin ningún tipo de unión entre sus partes. Igualmente, ambos utilizan en sus formulaciones parámetros para simular el comportamiento semi-rígido de la conexión, con el mismo nombre, aunque la forma de obtener sus valores es diferente.

Se busca limitar el desplazamiento entre el hormigón y la madera, a partir de las posibles acciones compuestas que se muestran en la Figura 1. De acuerdo con Yeoh (2010): "cuando la viga no tiene acción compuesta, el comportamiento de la viga (en este caso, vigas de madera laminada) es el de una viga individual de hormigón deformada sobre una viga individual de madera". En la Figura 1(C) se aprecia que la viga de hormigón y la viga de madera están tensionadas a flexión, donde ocurre el mayor deslizamiento entre vigas y, por tanto, una mayor deformación.

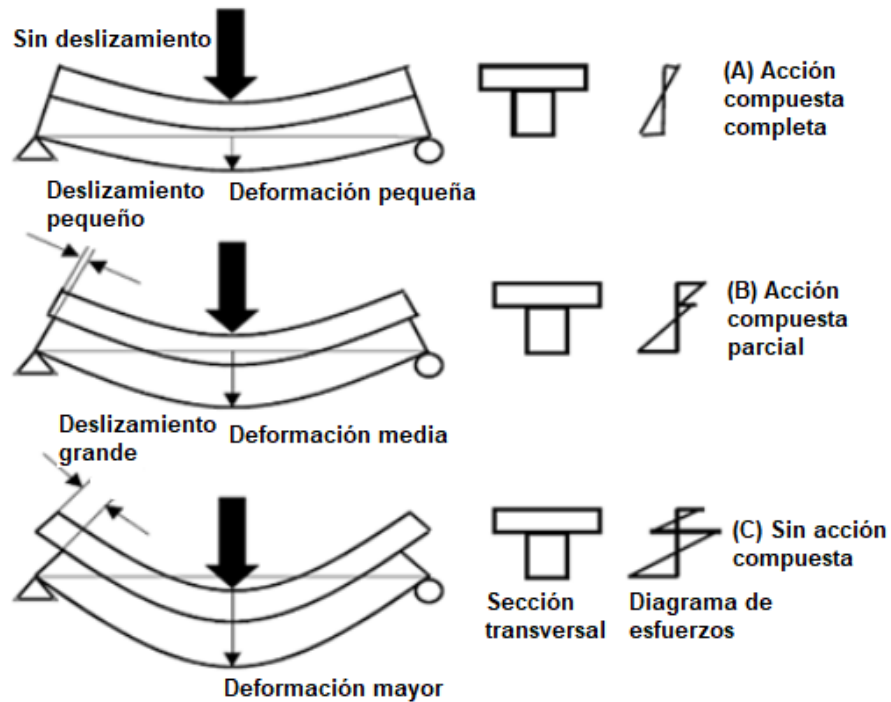


Figura 1. Definiciones de acción compuesta. Fuente: Yeoh, 2010.

Al tratar de unir los dos materiales individuales colocando conectores “entre las capas de hormigón y madera, generalmente se desarrolla una acción compuesta parcial. Aunque las diferentes capas están solicitadas a tracción y compresión, la situación es significativamente mejor que en el caso en que no hay acción compuesta” (Yeoh, 2010). Lo anterior se puede observar en la Figura 1(B), en donde el deslizamiento entre capas disminuye, así como la deformación total de la viga compuesta, debido a que la mayoría del hormigón se encuentra comprimido y la mayoría de la madera se encuentra traccionada (donde los materiales se comportan de la mejor manera). En la Figura 1(A) se observa la acción compuesta completa, siendo el comportamiento ideal buscado, se percibe una deformación menor en comparación con las acciones anteriores, además de un nulo deslizamiento entre capas. Es importante destacar que “el grado de acción compuesta logrado en un sistema compuesto madera-hormigón es dependiente únicamente del comportamiento del conector longitudinal de corte. El conector transfiere corte longitudinal entre los componentes de madera y hormigón para facilitar la acción compuesta” (Lehan, 2012).

## Materiales y métodos

La complejidad de los cálculos matemáticos, debido a la cantidad de coeficientes que se incorporan en el diseño, puede resultar no factible para su aplicación práctica en el reforzamiento de una estructura donde el proyectista decida emplear esta alternativa. Sin embargo, muchas de las obras que se ejecutan en el campo de la rehabilitación de estructuras de madera carecen de un procedimiento minucioso y no presentan un proyecto de estructuras en el que estén detallados los cálculos y el dimensionamiento de la solución. Por ello la comprensión de estos métodos experimentales, que plantean solo el cálculo de las tensiones que se generan en este tipo de secciones, requiere de la profundización del comportamiento del conector para desarrollar una metodología de cálculo que pueda ser implementada y que se logre obtener la cantidad de conectores necesaria para que se alcance el trabajo de conjunto de la sección compuesta.

Los métodos experimentales de cálculo analizados son de los autores Turrini-Piazza y de Cappretti-Ceccotti; estos métodos se aplicarán a cinco casos de estudio de forjados horizontales de madera, además del método simplificado. Con ello se podrá valorar el diseño de sección compuesta madera-hormigón, en cuanto a tensiones obtenidas y cantidad de conectores. Al ser métodos basados en ensayos experimentales, los coeficientes determinados por los autores para la afectación de las tensiones que se generan en cada material son los que influyen en los resultados.

En el método de Turrini-Piazza (Turrini y Piazza, 1983) se obtienen las tensiones en la fibra superior, interacción e inferior de la sección debido a esfuerzos combinados de cortante y flexión, luego se derivan las expresiones para el esfuerzo último y la rigidez de la conexión. Mientras que el método de Cappretti-Ceccotti (Cappretti y Ceccotti, 1992) determina las tensiones en cada fibra de manera independiente, es decir, debido a esfuerzo cortante y flexión por separado. En común, todos los métodos para el diseño de cualquier tipo de sección compuesta plantean la homogenización de la sección, simplificando de esta manera el cálculo (Ros, 1997).

El diseño posterior será implementado a partir de la consulta de las normas de los Eurocódigos 4 y 5, de secciones compuestas acero-hormigón y de estructuras de madera. Debido a que la variación en el comportamiento del conector a cortante depende de sus características, calidad, forma, posición y ángulo de colocación en la sección las investigaciones se enfocan en determinar experimentalmente la curva de carga-deslizamiento que más se asemeje al comportamiento real del conector,

completada en muchos estudios por la simulación numérica a través del MEF (Dias, 2005; Clemente, Piazza y Tomasi, 2008; Fragiaco y Lukaszewska, 2011; Monteiro, Dias y Negrão, 2013) y no así a desarrollar una metodología para la obtención de la cantidad de conectores; por ende, en esta primera etapa de investigación se dará continuación a los métodos experimentales de cálculo a partir de las formulaciones que se plantean en los citados eurocódigos.

Estos métodos serán aplicados analíticamente a cinco casos de estudio de estructuras de madera con valor patrimonial del Centro Histórico de La Habana. Las características de estos forjados horizontales, así como las propiedades físico-mecánicas y condiciones en que se encuentran, fueron facilitadas por el Departamento de Diagnóstico de la empresa RESTAURA de la Oficina del Historiador de la Ciudad; por lo que se deberá considerar que la propuesta de reforzamiento cumpla con las regulaciones establecidas para la protección de edificaciones patrimoniales.

Debido a que la madera es un material natural, cuyas propiedades mecánicas dependen, en gran medida, de sus singularidades y de la presencia de defectos en la pieza, para la interpretación de los resultados obtenidos a partir de la aplicación de los métodos teórico-experimentales se despreciarán estos desperfectos en el elemento de madera y se considera libre de defectos. No obstante, dado que las estructuras estudiadas ya poseen varias décadas, incluso siglos de creadas, las propiedades resistentes de la madera serán afectadas según los coeficientes de la norma NC 53-179 de 1988, considerando de esta manera el proceso de envejecimiento que presenta.

### **Verificación de la capacidad portante de los elementos estructurales a intervenir**

Antes de acometer cualquier refuerzo en una estructura se debe comprobar cuál es el estado de deterioro que presenta y cuál es la capacidad portante que presentan los elementos que la conforman para, en función de ello, seleccionar el reforzamiento adecuado, asociado a la patología o lesión detectada y el uso que ha de tener esa estructura luego de intervenida. En el caso de estructuras de madera, forjados planos horizontales de viga y tablazón o de viga y losa por tabla, las vigas como elemento estructural del sistema en ambos casos deben ser revisadas por los proyectistas que realizarán la intervención. Para ello se deben chequear las solicitaciones que establece la norma NC 53-179: 1988. La normativa cubana establece en el apartado 4.4: En el

estado límite último de capacidad portante las solicitaciones de cálculo ( $S^*$ ) deberán ser iguales o menores que las solicitaciones de agotamiento de la sección calculada ( $S_u$ ), de manera que:  $S^* \leq S_u$ . A los valores característicos de resistencia de la madera se les aplica unos coeficientes de reducción por seguridad según la NC 53-179, por lo que las resistencias de cálculo se determinarán dividiendo las resistencias características por el coeficiente  $\gamma_m$  igual a 8. De esta manera se puede penalizar las propiedades mecánicas de la madera, que ya han sido disminuidas por la acción del tiempo y de agentes, tanto bióticos como abióticos, en la estructura.

En las estructuras de madera se tendrá en cuenta el estado límite de utilización por deformación, manteniéndose las flechas dentro de los límites que se consideren aceptables para cada caso específico. En el apartado 5.2.4 la norma establece un valor de flecha máxima admisible debido a carga accidental de  $L/360$ , siendo  $L$  la luz de la viga cuando debajo del forjado se coloca falso techo de yeso y de  $L/240$  sin este, este último valor se tomará también para carga total. La norma en este caso solo considera la flecha inicial del elemento, en función del tipo de carga y las condiciones de apoyo, determinada por la teoría clásica de las estructuras. La flecha de las vigas aumenta para largos periodos de carga, considerando larga duración más de 10 años, siendo el caso de investigación general superior a este periodo, se consultó la norma NBE-AE/88. El comportamiento reológico de la madera, como ya se ha explicado, exige tener en cuenta un incremento de la deformación frente a cargas de larga duración. Su análisis es complejo, influyendo factores como la influencia de la historia de las cargas, las tensiones máximas alcanzadas, tamaño de la sección, humedad, etc., (Basterra, 2004). Para simplificar el cálculo la norma NBE-AE/88 utiliza un único factor de fluencia  $k_{def}$  (Tabla 1) que incrementa la deformación inicial en función de la clase de servicio y de duración de la carga. Siendo la deformación inicial afectada de la siguiente manera:

$$f_{diferida} = f_{instantánea}(1 + k_{def})$$

Tabla 1. Valores del factor de fluencia ( $k_{def}$ ) según la clase de servicio

Acción	Clase de servicio		
	CS1	CS2	CS3
Permanente	0,60	0,80	2,00
Sobrecarga de uso en viviendas y oficinas	0,18	0,24	0,60
Sobrecarga de uso en locales de reunión y comerciales	0,36	0,48	1,20
Sobrecarga en almacenes	0,48	0,64	1,60

Las verificaciones anteriores deben realizarse teniendo en cuenta el diagnóstico previo realizado a las vigas que componen el forjado. La inspección con un punzón o herramienta similar permite conocer la profundidad afectada en la sección. Normalmente las zonas con mayor profundidad corresponden a las aristas de la sección, ya que es donde más cantidad de albura puede existir. Tampoco inciden de igual manera en todas las caras de la pieza. Un criterio conservador para estimar la pérdida de capacidad portante consiste en descontar la profundidad afectada a las dimensiones reales de la sección de la pieza. Como el deterioro de la zona afectada no es completo, ya que la afectación por insectos xilófagos es mediante galerías que estos realizan en la madera dejando zonas intactas, puede descontarse una profundidad menor, en función de la intensidad del ataque (Arriaga *et al.*, 2002).

Para la determinación de las solicitaciones actuantes se considerarán las normas (NC 283: 2003; NC 284: 2003) y para la combinación de cargas la norma (NC 450: 2006); las solicitaciones se obtuvieron por el método de estados límites de acuerdo a la vigente norma de madera (NC 53-179: 1988) explicado anteriormente. Otra de las comprobaciones de la capacidad estructural de un elemento de madera, fundamental a considerar por el este tipo de material de construcción, es la verificación de su estabilidad ante el fuego. La norma cubana no contempla algún chequeo en este caso, para esto se recurrió a la norma NBE-AE/88, que utiliza el método simplificado de la sección reducida. "La comprobación de la estabilidad al fuego se efectúa comprobando la pieza con una sección reducida, con una resistencia mayor que la utilizada en situación normal de cálculo y sometida a acciones con intensidades menores" (Arriaga *et al.*, 2002). La sección reducida se obtiene restando a las dimensiones de la sección transversal una profundidad carbonizada:  $d_{car}$ , en cada cara expuesta al fuego, según la siguiente Ecuación:

$$d_{car} = \beta \cdot t + k_0 \cdot d_0$$

siendo,

$\beta$ : velocidad de carbonización (0,8 mm/min en coníferas y 0,5 mm/min en frondosas.

$t$ : tiempo de estabilidad al fuego requerido en minutos.

$k_0$ : coeficiente que depende del tiempo  $t$  (para  $t < 20$  min es  $k_0 = t/20$ ; para  $t \geq 20$  min es  $k_0 = 1$ ).

$d_0$ : 7 mm.



La resistencia bajo situación de incendio debe ser más elevada que bajo una situación normal; el coeficiente parcial de seguridad es la unidad (referido a nuestra norma, es el coeficiente de minoración) y el valor característico se incrementa en un 25 % en la madera maciza, con el fin de alcanzar el percentil 20. Así, la resistencia de cálculo en situación de incendio  $R_{f,d}$ , queda definida por la siguiente expresión:

$$R_{f,d} = 1,25 \cdot R$$

siendo:

$R_{f,d}$ : resistencia de cálculo en situación de incendio para la propiedad mecánica evaluada.

$R$ : resistencia característica de la propiedad mecánica evaluada.

Finalmente, las acciones que se consideran en situación de incendio tienen intensidades muy inferiores a las de la situación normal. En la Tabla 2 se indica una versión simplificada de los coeficientes parciales que ponderan las acciones en su combinación para la situación de incendio.

Tabla 2. Coeficientes parciales en situación de incendio

Carga permanente	Sobrecarga de uso
1,00 (0,90)*	0,70

\* corresponde a situaciones en las que el efecto de la carga es favorable; por ejemplo, el efecto de la succión del viento, equilibrio estático.

## 1 Aplicación de los métodos experimentales

Gracias a la cooperación del Departamento de Diagnóstico de la Empresa de Proyectos de Arquitectura y Urbanismo (RESTAURA) se obtuvieron los resultados del estudio de diagnóstico de cinco inmuebles objeto de estudio. A continuación, se resumen en la Tabla 3 las características fundamentales de cada forjado.

Tabla 3. Datos de los forjados casos de estudio

Casos de estudio	Tipo de forjado	Sección transversal (cm)	@ (cm)	Luz de cálculo (mm)	Tipo de madera
1	Viga y tablazón	9x30	38	5890	<i>Pinus sp.</i> (Pino)
2	Viga y tablazón	18x23,5	40	3700	<i>Pinus sp.</i> (Pino)
3	Viga y tablazón	16x17	45	5500	<i>Manilkara valenzuelana.</i> (Ácana)
4	Viga y losa por tabla	11,5x29	42	6000	<i>Cedrela odorata.</i> (Cedro)
5	Viga y tablazón	19x19	48	4900	<i>Bucida sp</i> (Júcaro)

### Comprobación de la capacidad portante de los forjados

Los forjados que habitualmente conforman las edificaciones del Centro Histórico de la Ciudad están conformados por dos tipos de sistemas compuestos por vigas de madera como elemento estructural principal, el resto de los elementos que los componen pueden variar si se trata de un entrepiso o de una cubierta; diferenciando el elemento que cubre el espacio entre vigas, este puede ser tablazón o losas de cerámica, siendo cuatro de los objetos estudiados forjados de viga y tablazón y uno de viga y losa por tabla. En el cálculo de las cargas actuantes se incluyen, como cargas permanentes, el peso de todas las partes componentes de un forjado de viga y tablazón (Figura 2).

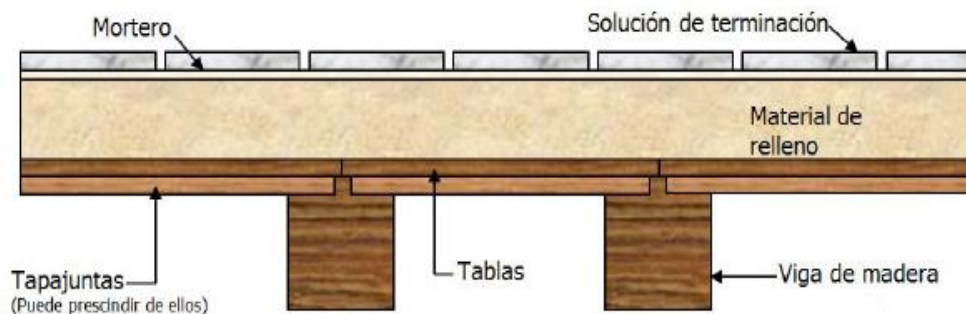


Figura 2. Esquema de elementos componentes del entrepiso de viga y tablazón.

Fuente: Rodríguez, 2006.

Verificando la capacidad portante del resto de los forjados se recogen en la Tabla 4 los resultados.

Tabla 4. Resumen de las verificaciones estructurales de los forjados

Casos de estudio	Flexión $\sigma^* = \frac{M^*}{W_n} \leq R^*$ (kN/cm <sup>2</sup> )	Cortante $\tau^* = 1,5 \frac{T^*}{b * h} \leq R_\tau^*$ (kN/cm <sup>2</sup> )	Deformación $f_{actuante} < f_{admisible}$ (cm)	Estabilidad al fuego $\sigma_{f,d} \leq R_{f,d}$ (kN/cm <sup>2</sup> )
1	1,38 > 1,125	0,07 > 0,056	2,76 > 2,45	5,52 < 11,25
	No cumple	No cumple	No cumple	Cumple
2	1,17 > 1,125	0,074 > 0,056	1,16 < 1,54	2,06 < 11,25
	No cumple	No cumple	Cumple	Cumple
3	2,77 > 1,00	0,09 > 0,081	8,27 > 2,3	10,1 < 12,5
	No cumple	No cumple	No cumple	No cumple
4	1,56 > 0,83	0,075 > 0,05	5,38 > 2,5	2,10 < 11,25
	No cumple	No cumple	No cumple	Cumple
5	2,60 > 1,5	0,085 < 0,088	4,77 > 2,04	15,34 > 15
	No cumple	En el límite	No cumple	No cumple

## Resultado de las comprobaciones

Al no cumplirse que las solicitaciones actuantes por flexión, por cortante y deformación sean menores que las que resiste la sección en la mayoría de los casos, se concluye que estas no resisten ante las cargas originadas debido al nuevo uso. Para aprovechar las ventajas que ofrece se propone reforzar con una capa en compresión de hormigón, de 5 cm de espesor. Primeramente, se parte de la intervención en las vigas lesionadas en la zona de la fogonadura con las técnicas tradicionales que se aplican para reforzar (Arriaga *et al.*, 2002; Brito, 2014; Morocho, 2014). Se deben reconstruir las vigas que han perdido parte de su peralte original por desfibramiento, con tablas que se colocan clavadas con un espesor hasta que se alcance el peralte original de la sección.

Posteriormente, se procede al refuerzo mediante sección compuesta la cual supone el incremento de la rigidez del conjunto y de la capacidad portante del entepiso del local de estudio, además de reducir las vibraciones y dar lugar a menores flechas. En los casos que no se cumple con el tiempo de una hora para que el elemento sea estable ante la acción del fuego, la sección transversal de la viga de madera es menor que las del resto, de escuadría española. Se pudo comprobar que en los casos que no cumple con la flecha admisible normada se debe a que la luz de cálculo de la viga es superior a los cuatro metros unido a la sobrecarga de uso a que está sometido el forjado, incide en que las deformaciones sean superiores. Los casos de estudio más críticos son la casa de Guayasamín y del Conde Cañongo, donde no cumple con ninguna de las verificaciones estructurales realizadas y la resistencia a cortante de las vigas del forjado en el caso de Conde Cañongo se encuentra en el límite.

## Diseño de la sección compuesta madera-hormigón aplicada a los casos de estudio

Cada método se aplicará a los casos de estudio, entre los que existe maderas de calidad dura, media y blanda, lo que incidirá sobre la cantidad de conectores que se obtengan; objetivo fundamental a conseguir. Además, se comprobarán las tensiones obtenidas por los distintos métodos con las tensiones admisibles de cada material; dígame el hormigón y la madera. Para comprobar, desde el cálculo, si es posible emplear hormigón ligero u hormigón convencional, se determinarán los pesos propios en ambos casos para ser considerados en el diseño. Se considerará en el diseño la colocación de dos capas de papel asfáltico, de manera que se garantice que el agua de la mezcla de hormigón no afecte a las vigas de madera del forjado.

La sección T está constituida por dos piezas rectangulares (Figura 3) con módulos de elasticidad diferentes, por lo que se trabaja con las características geométricas de la sección en sí; en el caso de Turrini-Piazza con la inercia efectiva y en el de Cappretti-Ceccotti con la rigidez efectiva. El ancho de la losa de hormigón se define por la separación entre las vigas; como límite superior del ancho eficaz se puede tomar el valor de  $2/8l$  (siendo  $l$  la luz de cálculo de la viga) o igual al espaciamiento entre vigas, de acuerdo con el Eurocódigo 4 de estructuras mixtas.

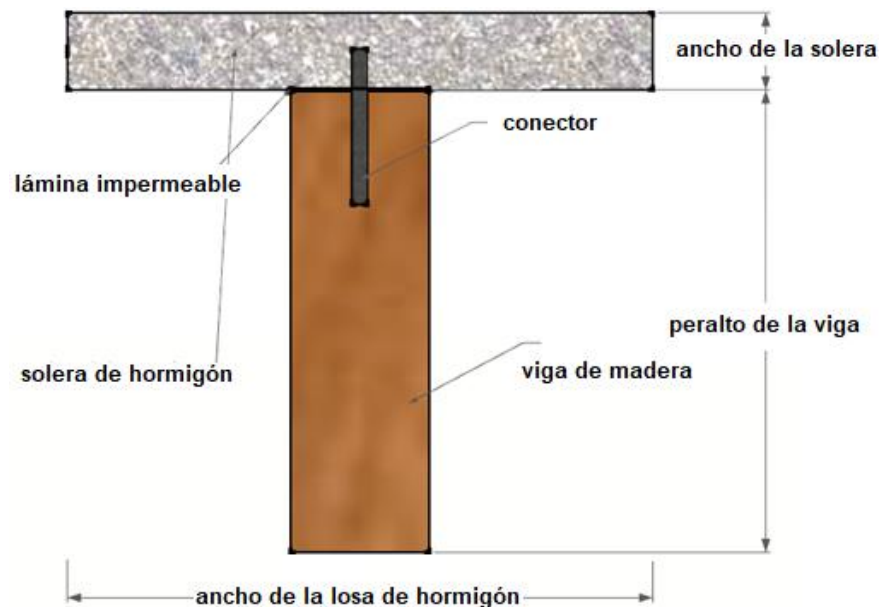


Figura 3. Sección de la viga de madera y la capa de hormigón para el diseño.

### Pautas de diseño según el Eurocódigo 5

Las ecuaciones para el diseño y determinación de la cantidad de conectores según el Eurocódigo 5, derivadas del trabajo de Johansen, se basan en un comportamiento plástico-rígido de la clavija o conexión bajo momento flector y de la madera bajo esfuerzos de compresión, tomando en cuenta la capacidad plástica de la clavija, como conector (Stojić y Cvetković, 2006). Los métodos son experimentales, por lo que se limitan a determinar las tensiones; de ahí que para continuar con el diseño se siguieron las pautas que ofrece el Eurocódigo 5. Para distribuir los conectores en la luz de cálculo de la viga se tomaron dos tramos, donde se define que en el tramo 1 los conectores estarán en función del cortante máximo que actúa en los apoyos de la viga, y en el tramo 2 se define a partir del 60 % del cortante máximo de los apoyos según el Eurocódigo 5. Esto permite racionalizar el diseño distribuyendo los conectores menos

espaciados entre sí donde el cortante es máximo y con más espaciamiento donde el conector no trabaja al 100 % de ese cortante (Figura 4). La tensión a cortante en la unión se define por la ecuación:

$$\tau_d = \frac{V \cdot A_c \cdot (r_c + \frac{h_c}{2})}{I_G \cdot b}$$

Siend

$V$ : cortante máximo en el apoyo.

$A_c$ : área de la solera de hormigón que tributa a una viga.

$r_c$ : distancia al centroide de la sección de hormigón.

$h_c$ : altura de la sección de hormigón.

$I_G$ : inercia global de la sección homogenizada (según el método empleado).

$b$ : ancho de la viga de madera.

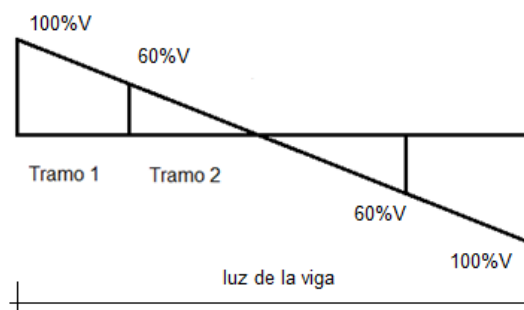


Figura 4. Gráfico de cortante con los tramos 1 y 2 definidos.

A partir del gráfico de la Figura 4 se definen dos fuerzas horizontales:  $F_{H1}$  que actúa en el primer tramo y  $F_{H2}$  que actúa en el segundo tramo, determinadas por las siguientes expresiones 5 y 6.

$$F_{H1} = \tau_d \cdot b \cdot L \quad \text{Ecuación 5}$$

$$F_{H2} = \tau_d \cdot \frac{0,6V}{V} \cdot L \quad \text{Ecuación 6}$$

Siendo:

$\tau_d$  : tensión rasante en la interacción entre la madera y el hormigón.

$b$  – ancho de la viga de madera.

$L$  – longitud unitaria de 1 m en cada tramo.

El Eurocódigo 5 establece que la resistencia de la unión madera-madera, para uniones con tirafondos, se determina en función de la resistencia de cálculo de la madera al

aplastamiento ( $f_{h,1,d}$ ), siendo  $f_{h,1,d} = \frac{f_{h,k}}{2}$ . Según la norma analizada  $f_{h,k}$  tiene dos formulaciones, una para cuando se realiza un taladrado previo y otra para cuando no se taladra previamente, expresadas en N/mm<sup>2</sup>.

sin taladrado previo:  $f_{h,k} = 0,082 \cdot \rho_k \cdot d^{-0,3}$  Ecuación 7

con taladrado previo:  $f_{h,k} = 0,082 \cdot \rho_k \cdot (1 - 0,01d)$  Ecuación 8

Debe realizarse el pretaladrado cuando el espesor de las piezas de madera sea menor que:

$$7d \quad \text{Ecuación 9}$$

$$(13d - 30) \cdot \frac{\rho_k}{400} \quad \text{Ecuación 10}$$

Donde:

- t – espesor mínimo (mm)
- $\rho_k$  – densidad de la madera (kg/m<sup>3</sup>)
- d – diámetro del conector

Siendo: d=9,5 mm (diámetro del conector) y t1=100 mm (espesor de empotramiento en la madera) en todos los casos (Figura 5).

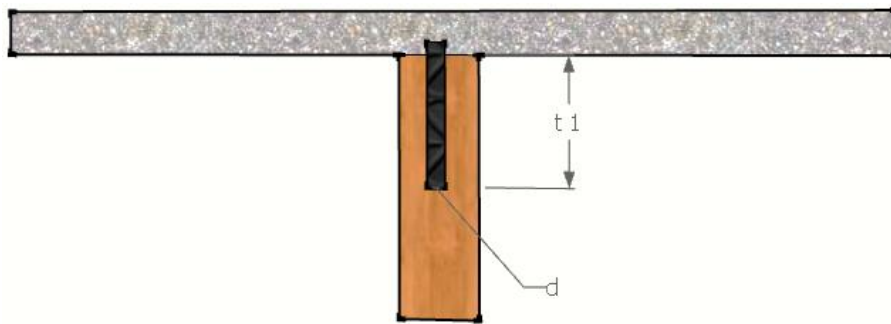


Figura 5. Profundidad del conector en la madera en función de su diámetro.

Las bases de las ecuaciones de carga última son derivadas del trabajo de Johansen: la capacidad de carga en cortante simple en uniones madera-madera y acero-madera (Figura 6). Se asume que el conector y la madera son materiales idealmente rígido-plásticos (Stojić y Cvetković, 2006). Para determinar los valores de capacidad de carga de la conexión para el plano de cizallamiento en cortante simple, en conexiones tipo madera-madera trabajando perpendicular en relación con el eje en dirección de la

conexión, es necesario tomar la resistencia de la conexión como la menor de las dos expresiones siguientes (EC-5 1995).

$$R_d = 1,1 \cdot f_{H,1,d} \cdot t_1 \cdot d \left( \sqrt{2 + \frac{4 \cdot M_{y,d}}{f_{H,1,d} \cdot d \cdot t_1^2}} - 1 \right) \quad \text{Ecuación 11}$$

$$R_d = 1,5 \cdot \sqrt{2 \cdot M_{y,d} \cdot f_{H,1,d} \cdot d} \quad \text{Ecuación 12}$$

Siendo:

$M_{y,k}$ : valor característico del momento plástico.

$M_{y,d}$ : momento plástico de cálculo de un elemento mecánico de fijación.

Definidos por las expresiones:

- $M_{y,k} = 180 \cdot d^{2,6}$
- $M_{y,d} = \frac{M_{y,k}}{2}$

Resumiendo, la cantidad de conectores en los tramos 1 y 2 quedaría, para cada tramo, dividiendo cada fuerza horizontal entre la resistencia de la conexión.

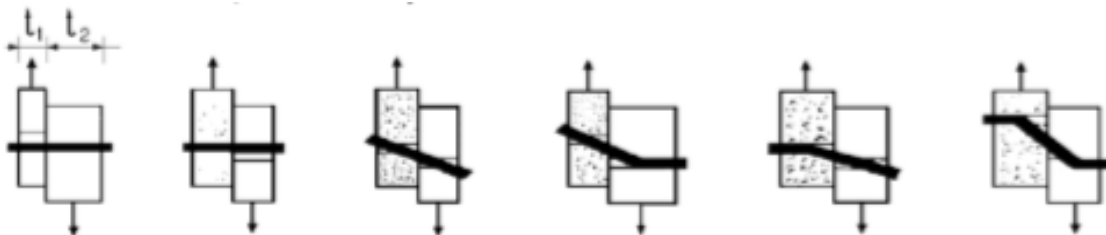


Figura 6. Conexiones de cortante simple. Fuente: Stojić y Cvetković, 2006.

### Análisis de los resultados

Como se enuncia en las hipótesis consideradas para el cálculo de una sección compuesta, ambos materiales se consideran que son lineales y continuos. Por esta razón se pueden aplicar las tensiones límites para comparar con las tensiones obtenidas por los métodos de cálculo desarrollados. En el hormigón la tensión límite es  $0,45f'c$ , correspondiente a un módulo secante, definido como la pendiente de la línea trazada, desde un esfuerzo igual a cero hasta un esfuerzo a la compresión igual a ese valor, como puede apreciarse en la Figura 7. En la madera es el cociente entre su resistencia a flexión y el coeficiente de seguridad de la resistencia.

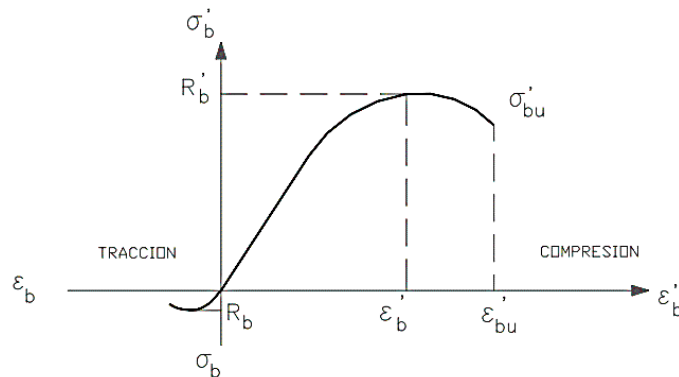


Figura 7. Diagrama tensión-deformación del hormigón. Fuente: NC:207 2003.

En cada uno de los diagramas tensionales se representaron las tensiones obtenidas por esfuerzos normales en la sección, mostrando en primer lugar los resultados alcanzados con hormigón ligero y en segundo con hormigón convencional, según haya quedado por el método correspondiente. Los estados tensionales que se generan en la sección compuesta madera-hormigón, mediante los métodos de cálculo experimentales empleados, no superan en ningún caso las tensiones límites del hormigón y de la madera, como se puede observar en la Figura 7. Siendo  $0,45f'c = 1,35 \text{ kN/cm}^2$  la tensión límite en la fibra superior del hormigón y en la fibra inferior de la madera depende de la resistencia a flexión minorizada por el coeficiente que establece la norma NC 53-179: 1988 de  $\gamma_m=8$ .

Con esto se demuestra que los estados tensionales que se generan, producto del empleo de los métodos de cálculo de sección compuesta por Turrini-Piazza, por Capretti-Ceccotti y el Método Simplificado, no difieren en porcentaje de las tensiones límites de la madera y el hormigón, en general, por lo que se pudiera decir que se puede emplear para el cálculo de las tensiones cualquiera de estos métodos.

En el caso del diseño empleando la homogenización, los valores de tensiones en cuanto a porcentaje difieren dependiendo de la variante de hormigón; en todos los casos son los valores tensionales máximos que se obtienen con respecto a los obtenidos por los métodos experimentales. Dado que estos últimos incorporan coeficientes que consideran el comportamiento de este tipo de secciones compuestas, entre el método de Turrini-Piazza y el de Cappretti-Ceccotti, se pudiera realizar el diseño de la sección de manera racional, atendiendo a que con el de Cappretti-Ceccotti se obtiene menor cantidad de conectores. Aun así queda por evaluar, en función del tipo de conector a emplear y bajo las condiciones de los materiales, forjados y



tecnología de nuestro país, el diseño de la sección, adecuando los parámetros necesarios de los métodos experimentales.

De igual manera se puede destacar una de las principales ventajas, como declaran los autores, en la reducción considerable al realizar la sección compuesta de madera y hormigón de la flecha inicial con respecto a la que se obtiene una vez aplicado el refuerzo. La Tabla 5 refleja los valores de la flecha total que presenta el forjado antes del refuerzo mediante sección compuesta madera-hormigón y la deformación obtenida una vez aplicado. Como puede observarse, los porcentajes que se obtienen de reducción de la deformación son considerables, todo esto por supuesto desde el punto de vista teórico y analítico, para lograr dicha reducción en la flecha del forjado se debe lograr la adecuada conexión de ambos materiales, la resistencia mecánica necesaria para el anclaje de los conectores en la madera y la calidad requerida por proyecto del hormigón.

Tabla 5. Deformación con y sin refuerzo de los forjados y porcentaje de reducción de la flecha

Caso de estudio	Deformación (cm)		Reducción de la deformación (%)
	Sin refuerzo	Con refuerzo	
1	2,76	0,18	93,5
2	1,16	0,10	91,4
3	8,27	0,25	97,0
4	5,38	0,15	97,2
5	4,77	0,16	96,6

En cuanto al diseño, atendiendo al punto más vulnerable que son los conectores, se obtuvieron de forma general los resultados que se muestran:

- En todos los casos, la mayor cantidad de conectores se obtiene aplicando el método simplificado, con respecto a los métodos de Turrini-Piazza y de Cappretti-Ceccotti.
- El método que permite racionalizar el diseño, brindando menor cantidad de conectores, es el de Cappretti-Ceccotti.
- Los resultados, mediante la utilización de hormigón convencional, ofrecen una menor disposición de conectores con respecto al uso del hormigón ligero y al empleo de los métodos experimentales, no así en el simplificado.
- El coeficiente  $p$  que establecen los autores Turrini-Piazza para que el hormigón quede en su mayoría trabajando a compresión, es el que rige el diseño en cuanto al uso de un hormigón u otro; en este caso, cumpliendo para hormigón convencional, excepto en el caso de estudio de Belén, donde la madera es de densidad baja.

## Conclusiones

La sección compuesta madera-hormigón, como técnica de refuerzo, brinda amplias posibilidades de lograr una mayor rigidez en el forjado que se emplee y de reducir los efectos de la deformación ante la sobrecarga debido a nuevo uso a que se ven sometidos en ocasiones.

Comprobando estructuralmente lo que son capaces de admitir los forjados ante las nuevas cargas que le son impuestas, se determina que se debe tener cuidado a la hora de cambiar el uso de estas estructuras; el incremento de las cargas trae consigo grandes deformaciones a construcciones que llevan años de explotación y que deben ser respetadas por los valores históricos y arquitectónicos que poseen. La aplicación de los métodos experimentales de cálculo de Turrini-Piazza y de Cappretti-Ceccotti, así como del método simplificado a cinco forjados de edificaciones patrimoniales del Centro Histórico de La Habana, demuestra de manera analítica que la implementación de este refuerzo puede dotar al conjunto de una mayor eficacia de trabajo ante las sollicitaciones y esfuerzos que se originan en ella.

Las tensiones obtenidas por cada uno de los métodos se encuentran dentro del límite de lo que cada material resiste, siendo mayores e incluso sobrepasando esos valores en el caso de estudio de la farmacia "La Mariposa", por el método simplificado.

## Recomendaciones

La reducción que se logra numéricamente de la deformación, siendo en todos los casos superior al 90 %, debe ser comprobada aplicando este refuerzo a un forjado de manera práctica, en el cual se pueda monitorear durante un periodo de tiempo el comportamiento de la flecha en la sección, para con ello obtener los valores de flecha instantánea y de larga duración reales; esto requiere de varios años de seguimiento por lo que no es parte de los objetivos de esta investigación. Valorar y adecuar cuál de estos métodos corresponde con las características de los forjados horizontales nuestros y de los materiales para realizar este tipo de intervención, ya sea de los conectores o del hormigón, requiere experimentación. Evaluando el comportamiento que tendrán los conectores en la interacción entre la madera y el hormigón se podrán ajustar los métodos a los parámetros físico-mecánicos que se obtengan.

## Agradecimientos

A la empresa RESTAURA de la Oficina del Historiador de La Ciudad de La Habana y a los profesores: el Dr. Ing. Braulio Lima y al Dr. Ing. Rafael Larrúa, por toda su ayuda.

## Referencias bibliográficas

- AHMADI, B. AND SAKA, M. 1993. Behavior of composite timber-concrete floors. *Journal of structural engineering* 119(11): 3111-3130.
- LÓPEZ, I. A.; VEGA, J. G. & PUERTO, F. P. 2017. Métodos de trabajo y resultados de refuerzos en madera de un forjado del siglo XVII de la Sacristía de San Miguel en Morón de la Frontera (Sevilla). *Informes de la Construcción* 69(545): 180.
- ARRIAGA, F.; PERAZA, F.; ESTEBAN, M.; BOBADILLA, I. & GARCÍA, F. 2002. Intervención en estructuras de madera. Editora AITIM Asociación de Investigación Técnica de las Industrias de la Madera. España. ISBN: 8487381243.
- BASTERRA, N. 2004. Apuntes de construcción en madera. Grupo de Investigación de Estructuras de Madera. España, Universidad de Valladolid.
- BRITO, L. D. 2014. Patologia em estruturas de madeira: metodologia de inspeção e técnicas de reabilitação. Tesis de maser. Universidade de São Paulo. Brasil.
- CLEMENTE, P.; PIAZZA, M. Y TOMASI, R. 2008. Una particolare connessione legno-calcestruzzo. Analisi sperimentale e simulazione numerica. VII Workshop Italiano sulle Strutture composte. Università Degli Studi del Sannio, Benevento, Italia.
- CAPRETTI, S. & CECCOTTI, A. 1992. Solai composti legno-calcestruzzo: metodo di calcolo secondo l'Eurocodice 5. *L'Edilizia* (12): 747-752.
- DIAS, A. M. P. G. 2005. Mechanical behaviour of timber-concrete joints. Doctoral Thesis. Universidade de Coimbra. Portugal.
- EC-5. 1995. Design of timber structures. Part 1-1: General Common rules and rules for buildings. The European Union Per Regulation 305/2011. The European Union.

- FRAGIACOMO, M. AND LUKASZEWSKA, E. 2011. Development of prefabricated timber-concrete composite floor systems. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings 164(2): 117-129.
- GELFI, P. AND GIURIANI, E. 1970. Behaviour of stud connectors in wood-concrete composite beams. WIT Transactions on The Built Environment (42).
- JUAN, B. M. 2016. Elemento estructural mixto de hormigón y madera. Análisis estructural y criterios de diseño. Tesis doctoral. Universidad de Alicante. España.
- LEHAN, A. R. 2012. Development of a Slab-on-Girder Wood-Concrete Composite Highway Bridge. Doctoral dissertation. University of Toronto.
- MONTEIRO, S. R. S.; DIAS, A. M. P. G. & NEGRÃO, J. H. J. O. 2013. Assessment of timber-concrete connections made with glued notches: Test set-up and numerical modeling. Experimental Techniques 37(2): 50-65.
- MOROCHO, D. E. E. 2014. Reforzamiento estructural para forjados de madera en edificaciones patrimoniales y contemporáneas. Tesis de licenciatura. Universidad de Cuenca. Ecuador.
- NC:207. 2003. Requisitos generales para el diseño y construcción de estructuras de hormigón. Oficina Nacional de Normalización, La Habana, Cuba.
- NC:283. 2003. DENSIDAD DE MATERIALES NATURALES, ARTIFICIALES Y DE ELEMENTOS DE construcción como carga de diseño. Oficina Nacional de Normalización, La Habana, Cuba.
- NC:284. 2003. Edificaciones. Carga de uso. Oficina Nacional de Normalización, La Habana, Cuba.
- NC:450. 2006. Edificaciones. Factores de carga o ponderación. Combinaciones. Oficina Nacional de Normalización, La Habana, Cuba.
- RODRÍGUEZ, O. A. 2006. Metodología para realizar el estudio de diagnóstico para la rehabilitación estructural de forjados planos de madera en edificaciones ubicadas en el Centro Histórico de La Habana. Tesis doctoral. Universidad Tecnológica de La Habana Jose Antonio Echeverría.

- ROS, J. L. P. 1997. Estructuras mixtas de hormigón-madera aplicadas a la rehabilitación de forjados. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Valencia.
- STOJIĆ, D. AND CVETKOVIĆ, R. 2006. Design of connections in composite timber-concrete structures. *Facta universitatis-series: Architecture and Civil Engineering* 4(2): 127-138.
- TURRINI, G. & PIAZZA, M. 1983. Il comportamento statico della struttura mista legno-calcestruzzo. *Recuperare* (6): 314-325.
- YEOH, D. 2010. Behaviour and design of timber-concrete composite floor system. Tesis Pos Doctoral. University of Canterbury. New Zealand.
- ZÚÑIGA, A. P. 2009. La recuperación de edificaciones mediante soluciones compuestas en el Centro Histórico de La Habana. *Apuntes. Revista de estudios sobre patrimonio cultural* 22(2). Disponible en: <https://revistas.javeriana.edu.co/index.php/revApuntesArq/article/view/8938>