

Dificultades docentes en el refuerzo de forjados de madera mediante la conexión de una losa de hormigón superior

González Yunta, F.

Dpto. Tecnología de la
Edificación, UPM

francisco.gonzalez.yunta@upm.es

Cobo Escamilla, A.

Dpto. Tecnología de la
Edificación, UPM

alfonso.cobo@upm.es

González García, M.N.

Dpto. Construcciones Arquitectónicas
y su Control, UPM

mariadelasnieves.gonzalez@upm.es

Bello Salguero, J.

Escuela Universitaria de
Arquitectura Técnica, UPM

jessicabellosalguero@gmail.com

Resumen

En este trabajo se analizan desde el punto de vista docente el conjunto de operaciones necesarias para dimensionar refuerzos de forjados de madera mediante recrecidos de hormigón.

La técnica posee un marcado carácter pluridisciplinar y todos los conocimientos necesarios para su implementación no se desarrollan a lo largo de los planes de estudio de la mayoría de las titulaciones técnicas.

Sin embargo, tal como se pone de manifiesto con el desarrollo de un caso, con unos conocimientos conceptuales de rehabilitación de estructuras y el manejo de algunas herramientas de cálculo de estructuras, pueden abordarse con éxito estas operaciones.

1. Introducción

El refuerzo de forjados de madera mediante la conexión de una losa de hormigón por su parte superior es una técnica con un comportamiento estructural muy interesante y ampliamente difundida en el sector de la rehabilitación de edificios.

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. Además se incrementa extraordinariamente la rigidez del forjado en su plano, haciendo posible que actúe como un diafragma rígido para la transmisión de acciones horizontales.

A las ventajas estructurales anteriores se unen la facilidad de ejecución y un coste moderado, lo que sin duda ha dado lugar a que esta técnica se utilice de forma importante como refuerzo de forjados de madera.

Sin embargo, muchas de las obras que se ejecutan con este procedimiento no presentan un proyecto de estructuras en el que estén detallados los cálculos y el dimensionamiento de la solución. En algunas ocasiones aparece el dimensionamiento de la losa superior a flexión y rara vez los conectores del forjado a la losa están dimensionados analíticamente.

Posiblemente, una de las razones de esta situación se debe a que esta técnica engloba un conjunto de materias de un carácter marcadamente pluridisciplinar.

La técnica puede dividirse en dos etapas:

- Evaluación de la estructura existente.
- Refuerzo estructural.

En cada una de estas etapas es necesario el conocimiento de diversas materias que se imparten en distintas asignaturas. En las tablas 1 y 2 se muestran para las distintas operaciones involucradas, las asignaturas en las que se imparten los conocimientos necesarios para abordarlas, tomando como ejemplo el Plan de Estudios de Ingeniero de Edificación de la Escuela Universitaria de Arquitectura Técnica de la Universidad Politécnica de Madrid.

EVALUACIÓN ESTRUCTURAL	
Inspección visual y toma de datos	Rehabilitación
Caracterización mecánica de la estructura	Ninguna
Esquema constructivo	Rehabilitación
Modelo de cálculo	Resistencia de materiales y Elasticidad
Obtención de solicitaciones	Análisis estructural y geotecnia
Obtención de resistencias últimas	Ninguna
Toma de decisiones	Ninguna

Tabla 1. Evaluación estructural. Conocimientos necesarios y asignaturas que los imparten.

REFUERZO ESTRUCTURAL	
Elección del tipo de refuerzo	Rehabilitación
Dimensionamiento del recocado (DR)	
(DR): Elección de materiales y geometría	Hormigón estructural
(DR): Modelo de cálculo	Resistencia de materiales y Elasticidad
(DR): Obtención de solicitaciones	Resistencia de materiales y Elasticidad
(DR): Dimensionamiento a flexión	Hormigón estructural
(DR): Dimensionamiento a cortante	Hormigón estructural
(DR): Dimensionamiento de conectores	Ninguna
(DR): Comprobación de flecha	Hormigón estructural

Tabla 2. Refuerzo estructural. Conocimientos necesarios y asignaturas que los imparten.

Los datos aportados por las tablas anteriores no tienen vocación de exhaustividad pero reflejan el carácter pluridisciplinar de la técnica.

Además, alguna de las materias no se imparten en ninguna de las asignaturas del plan de estudios.

Sin embargo, un conocimiento conceptual del proceso de evaluación y refuerzo de una estructura junto al dominio de algunas herramientas de cálculo de estructuras, pueden ser suficientes para abordar la operación con éxito.

A continuación se desarrolla un ejemplo, extraído de un caso real en el cual se muestra un posible proceso de evaluación y dimensionamiento de un refuerzo de forjado de madera mediante la conexión superior de una losa de hormigón.

2. Planteamiento del caso

Se debe evaluar un forjado de madera de un edificio residencial de las siguientes características:

Biapoyado, con una luz de 5,00 metros
 Intereje de 50,0 cm
 vigueta de 15 x 20 cm²
 madera tipo C.14
 Carga permanente + Peso propio: 350 kp/m²
 Sobrecarga: 300 kp/m²

2.1 Cálculo a flexión (por vigueta)

$$\sigma_d \leq f_{m,d}$$

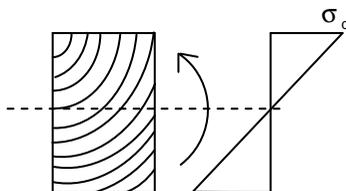
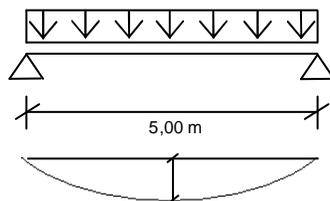
$$p_d = (1,35 \cdot 0,35 + 1,5 \cdot 0,3) \cdot \frac{1}{2} = 0,46 \text{ kp / m}$$

$$M_d = \frac{p_d \cdot L^2}{8} = 1,44 \text{ t}$$

$$W = \frac{b \cdot h^2}{6} = \frac{15 \cdot 20^2}{6} = 1000 \text{ cm}^3$$

Tensión de trabajo

$$\sigma_d = \frac{M_d}{W} = \frac{1,44 \cdot 10^5}{1000} = 144 \text{ kp / cm}^2$$



Tensión de cálculo de la madera

$$\left. \begin{array}{l} f_{m,d} = K_{\text{mod}} \cdot \frac{f_{m,k}}{\gamma_M} \\ K_{\text{mod}} = 0,60 \\ \gamma_M = 1,3 \end{array} \right\} f_{m,d} = 0,60 \cdot \frac{140}{1,3} = 64,6 \text{ kp / cm}^2$$

$64,6 < 144 \Rightarrow$ No cumple

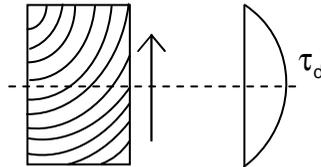
2.2 Cálculo a cortante (por vigueta)

$$\tau_d \leq f_{v,d}$$

$$\tau_d = \frac{3}{2} \cdot \frac{V_d}{A} = \frac{3}{2} \cdot \frac{1150}{15 \cdot 20} = 5,75 \text{ kp / cm}^2$$

$$V_d = \frac{P_d \cdot L}{2} = \frac{0,46 \cdot 5}{2} = 1,15 \text{ t}$$

$$\left. \begin{array}{l} f_{v,d} = K_{\text{mod}} \cdot \frac{f_{v,k}}{\gamma_M} \\ K_{\text{mod}} = 0,60 \\ \gamma_M = 1,3 \end{array} \right\} f_{m,d} = 0,60 \cdot \frac{17}{1,3} = 7,85 \text{ kp / cm}^2$$



$\tau_d \leq f_{v,d} \Rightarrow$ Cumple

2.3 Cálculo de la flecha

Total

$$u_{\text{fin}} = (1 + K_{\text{def}}) \cdot u_{\text{ins}}$$

$$I = \frac{1}{12} \cdot 15 \cdot 20^3 = 10000 \text{ cm}^4$$

$$K_{\text{def}} = 0,60$$

$$\begin{aligned} u_{\text{ins}} &= \frac{5 \cdot q \cdot L^4}{384 \cdot E \cdot I} \cdot \left[1 + \frac{24 \cdot E_{o,\text{medio}}}{25 \cdot G_{\text{medio}}} \cdot \left(\frac{h}{L} \right)^2 \right] = \\ &= \frac{5 \cdot 10^9 \cdot 0,65}{384 \cdot 70000 \cdot 10000} \cdot \left[1 + \frac{24 \cdot 70000}{25 \cdot 4400} \cdot \left(\frac{15}{500} \right)^2 \right] = \\ &= 3,78 + 0,05 = 3,83 \text{ cm} \end{aligned}$$

$$u_{\text{fin}} = (1 + 0,60) \cdot 3,83 = 6,13 \text{ cm} > \frac{L}{200} = 2,5 \text{ cm}$$

Activa

$$u_{q,fin} = \frac{0,3}{0,65} \cdot u_{fin} = 2,83 \text{ cm} > \frac{L}{200} = 2,5 \text{ cm}$$

2.4 Refuerzo

Evaluar el forjado anterior cuando se refuerza mediante una losa superior de hormigón H-25 de 5,0 cm de espesor. Suponer un forjado de madera descargado y apeado.

Hormigón

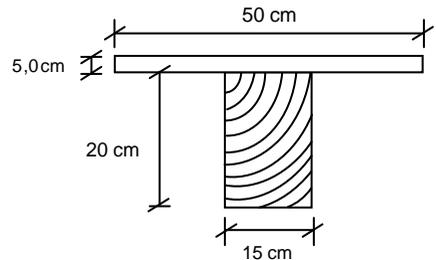
$$f_{ck} = 250 \text{ kp / m}^2$$

$$E = 8500 \cdot \sqrt[3]{25 + 8} = 27264 \text{ N / mm}^2$$

$$\gamma_c = 1,5$$

$$\phi = 3,0$$

$$E_c = \frac{E}{\phi} = 90000 \text{ kp / m}^2$$



Madera

$$f_{m,k} = 140 \text{ kp / m}^2$$

$$f_{v,k} = 17 \text{ kp / m}^2$$

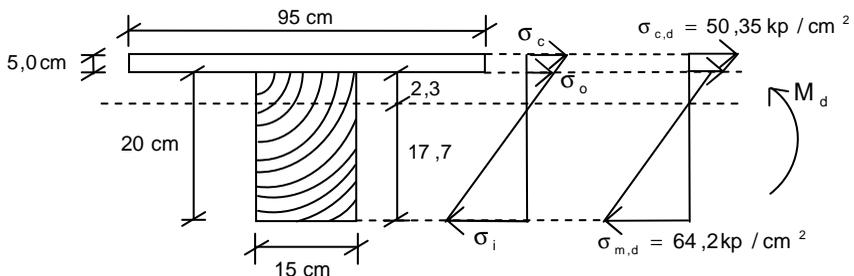
$$E_{o,medio} = 70000 \text{ kp / m}^2$$

$$E_{0,05} = 47000 \text{ kp / m}^2$$

$$G_{medio} = 4400 \text{ kp / m}^2$$

$$n = \frac{E_c}{E_{0,05}} = 1,9$$

2.4.1 Tensiones normales



$$y_G = \frac{15 \cdot 20 \cdot 10 + 100 \cdot 5 \cdot 2,5}{15 \cdot 20 + 100 \cdot 5} = 17,7 \text{ cm}$$

$$I_z = \frac{1}{3} \cdot 15 \cdot 17,7^3 + \frac{1}{3} \cdot 95 \cdot 7,3^3 - \frac{1}{3} \cdot 80 \cdot 2,3^3 = 39721 \text{ cm}^4$$

$$\sigma_i = \frac{M_d \cdot y_i}{I_z} = \frac{1,44 \cdot 10^5 \cdot 17,7}{39721} = 64,2 \text{ kp / cm}^2$$

$$\sigma_c = \frac{M_d \cdot y_s}{I_z} = \frac{1,44 \cdot 10^5 \cdot 7,3}{39721} = 26,5 \text{ kp / cm}^2$$

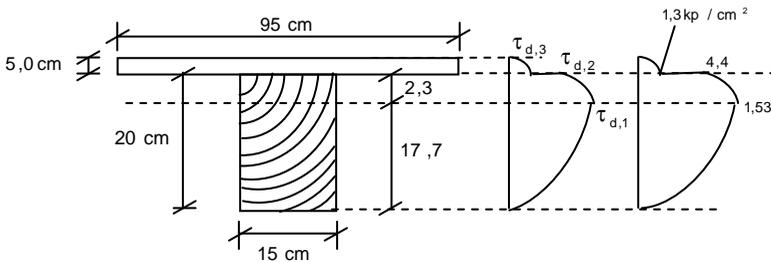
$$\sigma_o = \frac{M_d \cdot y_o}{I_z} = \frac{1,44 \cdot 10^5 \cdot 2,3}{39721} = 8,3 \text{ kp / cm}^2$$

$$\sigma_{m,d} = \sigma_i \quad ; \quad \sigma_{c,d} = \sigma_s \cdot n = 26,5 \cdot 1,9 = 50,35 \text{ kp / cm}^2$$

$$\sigma_{m,d} < f_{m,d}$$

$$\sigma_{c,d} < f_{c,d} = \frac{250}{1,5} = 167 \text{ kp / cm}^2$$

2.4.2 Tensiones cortantes



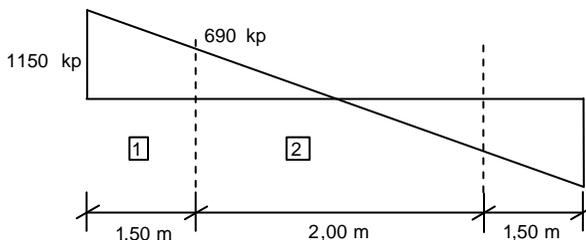
$$V_d = 1,15 \text{ t}$$

$$\tau = \frac{V \cdot U_y^{y_{\max}}}{I_z \cdot b}$$

$$\tau_{d1} = \frac{1150 \cdot 15 \cdot \frac{17,7^2}{2}}{39721 \cdot 15} = 4,53 \text{ kp / cm}^2$$

$$\tau_{d2} = \frac{1150 \cdot 95 \cdot 5,0 \cdot 4,8}{39721 \cdot 15} = 4,4 \text{ kp / cm}^2$$

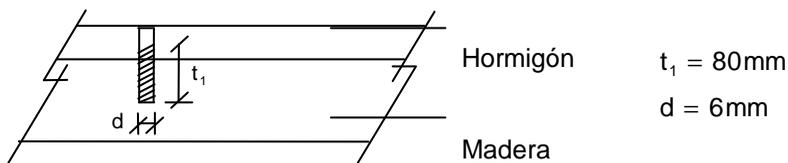
$$\tau_{d3} = \frac{1150 \cdot 95 \cdot 5,0 \cdot 4,8 \cdot \frac{17,7^2}{2}}{39721 \cdot 95} = 0,7 \text{ kp / cm}^2$$



$$F_{H1} = \tau_d \cdot b \cdot L = 4,4 \cdot 15 \cdot 100 = 9900 \text{ kp}$$

$$F_{H2} = 4,4 \cdot \frac{690}{1150} \cdot 15 \cdot 100 = 3960 \text{ kp}$$

2.4.3 Resistencia de la unión según el Eurocódigo



La resistencia de la conexión es la menor de las dos siguientes:

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

$$R_d = 1,5 \cdot \left(\sqrt{2 \cdot M_{y,d} \cdot f_{h,1,d} \cdot d} \right)$$

$f_{h,1,d}$ = Resistencia de cálculo de la madera al aplastamiento

$$f_{h,1,d} = \frac{f_{h,k}}{2}$$

$$f_{h,k} \text{ (N / mm}^2\text{)} = 0,082 \cdot \rho_k \cdot d^{-0,3} \begin{cases} \rho_k = \text{densidad de la madera (kg/m}^3\text{)} \\ d = \text{diámetro de conexión (mm)} \end{cases}$$

$$M_{y,d} = \frac{M_{y,k}}{2}$$

$$M_{y,k} \text{ (N} \cdot \text{mm)} = 180 \cdot d^{2,6} \quad d \text{ (mm)}$$

$$M_{y,k} = 180 \cdot 6^{2,6} = 18987 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

$$f_{h,k} = 0,082 \cdot 290 \cdot 6^{-0,3} = 13,9 \text{ N / mm}^2$$

$$R_d = 1,1 \cdot \frac{13,9}{2} \cdot 80 \cdot 6 \cdot \left(\sqrt{2 + \frac{4 \cdot 1898712}{\frac{13,9}{2} \cdot 6 \cdot 80^2}} - 1 \right) = 1700 \text{ N}$$

$$R_d = 1,5 \cdot \left(\sqrt{2 \cdot \frac{18987}{2} \cdot \frac{13,9}{2} \cdot 6} \right) = 1334 \text{ N}$$

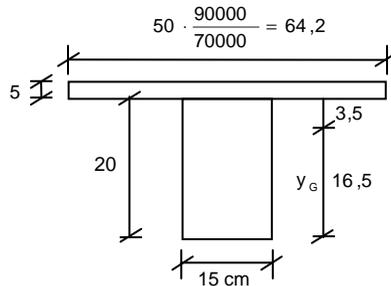
$$R_d = 133,4 \text{ kp}$$

$$\text{Tramo 1: } \frac{9900}{133,4} = 74 \text{ conectores}$$

$$\text{Tramo 2: } \frac{3960}{133,4} = 30 \text{ conectores}$$

2.4.4 Cálculo de la flecha

$$f = \frac{5}{384} \cdot \frac{q \cdot L^4}{E \cdot I}$$



$$y_G = \frac{15 \cdot 20 \cdot 10 + 64,2 \cdot 5 \cdot 22,5}{15 \cdot 20 \cdot 10 + 64,2 \cdot 5} = 16,5 \text{ cm}$$

$$I_z = \frac{1}{3} \cdot 15 \cdot 16,5^3 + \frac{1}{3} \cdot 64,2 \cdot 8,5^3 - \frac{1}{3} \cdot 49,2 \cdot 3,5^3 = 34900 \text{ cm}^4$$

$$f = \frac{5 \cdot 10^9}{384} \cdot \frac{0,65 \cdot 2 \cdot 5^4}{34900 \cdot 70000} = 1,08 \text{ cm} \quad (\text{Total instantánea})$$

3. Conclusiones

- El refuerzo de forjados mediante la conexión de una losa de hormigón por su cara superior constituye una técnica muy difundida con notables ventajas estructurales respecto de otras soluciones.

- El dimensionamiento de este tipo de soluciones se realiza en muchas ocasiones de una forma incorrecta o incompleta.
- El conjunto de operaciones necesarias para realizar esta técnica constituye una materia con un carácter profundamente pluridisciplinar.
- El conjunto de los conocimientos necesarios para la realización de esta técnica no se imparten en los planes de estudios de la mayoría de las titulaciones técnicas.
- Un conocimiento conceptual de los procedimientos de rehabilitación de estructuras, junto con el dominio de lagunas técnicas de evaluación y dimensionamiento de estructuras pueden ser suficientes para realizar un análisis lo suficientemente riguroso de este tipo de soluciones.