

## EVALUACIÓN DE FORJADOS DE MADERA REFORZADOS CON RECRECIDOS DE HORMIGONES LIGEROS ESTRUCTURALES

### **A. COBO**

Prof. Grado Edificación  
ETSEM - UPM  
Madrid, España  
Alfonso.cobo@upm.es

### **F.B. DIAZ**

Segment Manager  
Lafarge  
Madrid; España  
borja.diaz@lafarge.com

### **M.A. VIDAL**

Responsable Calidad productos Especiales  
Lafarge  
Madrid; España  
Maria-angeles.vidal@lafarge.com

### **F.GONZÁLEZ**

Prof. Grado Edificación  
ETSEM - UPM  
Lisboa; Portugal  
francisco.gonzalez.yunta@upm.es

### **M. N. GONZÁLEZ**

Prof. Grado Edificación  
ETSEM - UPM  
Madrid, España  
Mariadelasnieves.gonzalez@upm.es

## **RESUMEN**

El refuerzo de forjados existentes de madera incrementando su capacidad resistente y/o su rigidez es una intervención estructural muy extendida. El refuerzo mediante recrecidos de hormigón unidos solidariamente a las viguetas de madera mediante conexiones metálicas presenta las siguientes ventajas: Incremento de la resistencia y rigidez del forjado inicial; el forjado se transforma en un diafragma rígido frente a las acciones horizontales y, cuando es posible ejecutar el refuerzo sin necesidad de apuntalar, puede mantenerse el uso de la zona inferior al forjado que se está reforzando. El principal inconveniente de la técnica radica en la carga añadida por el peso del hormigón.

El empleo de hormigones ligeros estructurales (HLE) constituye una alternativa atractiva frente a los hormigones convencionales (HC), al aunar todas las ventajas de la técnica y disminuir considerablemente los inconvenientes debido al menor peso del hormigón ligero.

Se han comparado los resultados obtenidos en la evaluación de forjados de madera de distintas luces, secciones y sobrecargas, reforzados con recrecidos de HC y de HLE. En concreto se han estudiado 3 luces (4.0, 4.5 y 5.0m) y 2 sobrecargas de uso ( $2\text{kN/m}^2$  y  $3\text{kN/m}^2$ ). En todos los casos la sección de la madera se ha obtenido con criterios antiguos de dimensionamiento, utilizando las luces y acciones de los forjados a evaluar.

## **1. INTRODUCCIÓN**

El refuerzo de forjados existentes de madera incrementando su capacidad resistente y/o su rigidez es una intervención estructural muy extendida [1], [2].

El refuerzo estructural puede realizarse de varias maneras. En general, se incorpora otro material que trabaja de forma solidaria con la madera existente para contribuir a resistir las acciones que se producen una vez ejecutado el refuerzo. Este tipo de refuerzo, denominado pasivo, es el que más se emplea en la práctica y el de más fácil ejecución.

Los refuerzos pasivos se ejecutan habitualmente incorporando elementos metálicos conectados mecánicamente a la madera, materiales compuestos pegados con resinas epoxi o recrecidos de hormigón unidos a las viguetas de madera mediante conexiones metálicas.

El refuerzo mediante recrecidos de hormigón presenta las siguientes ventajas:

- Aumenta la resistencia del forjado inicial. Se incrementan la resistencia a flexión y a cortante, por lo que es posible aumentar las cargas de servicio.
- Aumenta la rigidez del forjado existente. En la estructura reforzada se disminuyen las flechas y las vibraciones respecto de la estructura inicial.
- El forjado se transforma en un diafragma rígido frente a las acciones horizontales. Se crea una losa capaz de transmitir las acciones horizontales provocadas por el viento o el sismo hasta los elementos estructurales verticales.
- No es necesario intervenir en la cara inferior del forjado. Además, cuando es posible ejecutar el refuerzo sin necesidad de apuntalar, puede mantenerse el uso de la zona inferior al forjado que se está reforzando.
- Esta técnica presenta los siguientes inconvenientes.
- La carga añadida por el peso del hormigón se transmite a los elementos verticales de la estructura, la cimentación y el terreno.
- En ocasiones es necesario apuntalar. En los casos en los que el forjado de madera existente no es capaz de resistir su propio peso y el de la losa de hormigón, es necesario apuntalar hasta que el hormigón endurece.

Según lo anterior, se trata de una técnica que presenta indudables ventajas resistentes y constructivas e inconvenientes motivados por el peso de la capa de hormigón. El empleo de hormigones ligeros estructurales constituye una alternativa atractiva frente a los hormigones tradicionales, al aunar todas las ventajas de la técnica y disminuir considerablemente los inconvenientes debido al menor peso del hormigón ligero.

## 2. TRABAJO ANALÍTICO REALIZADO

### 2.1 Planteamiento del trabajo

Se han comparado los resultados obtenidos en forjados de madera de distintas luces, secciones y sobrecargas, reforzados con recrecidos de HC y de HLE. En concreto se han estudiado 3 luces (4.0, 4.5 y 5.0m) y 2 sobrecargas de uso (2kN/m<sup>2</sup> y 3kN/m<sup>2</sup>). En todos los casos la sección de la madera se ha obtenido con criterios antiguos de dimensionamiento, utilizando las luces y acciones de los forjados a evaluar (tabla 1).

Tabla 1 - Tipología de los forjados evaluados

|     | L (m) | b x h (cm x cm) | S <sub>u</sub> (kN/m <sup>2</sup> ) | HC | HLE |
|-----|-------|-----------------|-------------------------------------|----|-----|
| F1  | 4.0   | 12 x 20         | 2.0                                 | SI |     |
| F2  | 4.0   | 12 x 20         | 2.0                                 |    | SI  |
| F3  | 4.0   | 12 x 20         | 3.0                                 | SI |     |
| F4  | 4.0   | 12 x 20         | 3.0                                 |    | SI  |
| F5  | 4.5   | 12 x 20         | 2.0                                 | SI |     |
| F6  | 4.5   | 12 x 20         | 2.0                                 |    | SI  |
| F7  | 4.5   | 12 x 20         | 3.0                                 | SI |     |
| F8  | 4.5   | 12 x 20         | 3.0                                 |    | SI  |
| F9  | 5.0   | 12 x 20         | 2.0                                 | SI |     |
| F10 | 5.0   | 12 x 20         | 2.0                                 |    | SI  |
| F11 | 5.0   | 12 x 20         | 3.0                                 | SI |     |
| F12 | 5.0   | 12 x 20         | 3.0                                 |    | SI  |

La evaluación del forjado se realiza en dos etapas: En la primera etapa se supone que el forjado de madera está descargado superiormente y solo permanece en entrevigado. En ese momento se colocan los conectores, la armadura y

se vierte la losa de hormigón. En la segunda etapa, el forjado trabaja como estructura mixta (viguetas de madera y losa de hormigón conectada) y se evalúa para el resto de acciones permanentes y sobrecargas.

En la primera etapa se realiza un cálculo elástico y lineal para la madera, obteniendo las tensiones agotadas como consecuencia de las cargas existentes. En la segunda etapa se realiza un cálculo elástico y lineal cuando las tensiones en el hormigón no alcanzan el 33% de la tensión característica a compresión. En caso contrario la madera se calcula con un modelo lineal y el hormigón se calcula con un modelo plástico.

## 2.2 Estudio tensional de la estructura original

El estudio se realiza para dos valores de sobrecarga de uso  $2\text{kN/m}^2$  y  $3\text{kN/m}^2$ .

Acciones:

Forjado de madera existente:  $1,5\text{kN/m}^2$ .

Pavimento:  $1,5\text{kN/m}^2$ .

Tabiquería:  $1,0\text{kN/m}^2$ .

Sobrecarga:  $2,0\text{kN/m}^2$ ;  $3,0\text{kN/m}^2$ .

Carga de cálculo por vigueta:

$$q_{1d} = \frac{1}{2}(1,35 \cdot 4 + 1,50 \cdot 2,0) = 4,2\text{ kN/m} \quad (1)$$

$$q_{2d} = \frac{1}{2}(1,35 \cdot 4 + 1,50 \cdot 3,0) = 5,0\text{ kN/m} \quad (2)$$

Para obtener las máximas tensiones de trabajo, se realiza un cálculo elástico y lineal. Por una parte se evalúa la sollicitación más desfavorable, correspondiente a la sección central de la viga, donde solo existe momento flector ( $M_d$ ), mediante la expresión:

$$M_d = \frac{q_d \cdot L^2}{8} \quad (3)$$

donde  $q_d$  es la carga de cálculo ( $4,2\text{kN/m}$  o  $5,0\text{kN/m}$ ) y  $L$  son las luces correspondientes de los forjados ( $4,0$ ;  $4,5$ ;  $5,0\text{m}$ ).

La máxima tensión de trabajo ( $\sigma_t$ ) se obtiene en las fibras externas mediante la expresión:

$$\sigma_t = \frac{M_d}{W} \quad (4)$$

donde  $W$  es el momento existente elástico de la sección de la viga ( $800\text{cm}^3$ ).

Utilizando las expresiones 3 y 4 se obtienen los valores de la tabla 2:

Tabla 2 - Tensiones de trabajo del forjado existente de madera

| L (m) | $S_u$ ( $\text{kN/m}^2$ ) | $q_d$ ( $\text{kN/m}$ ) | $M_d$ ( $\text{kN}\cdot\text{m}$ ) | $\sigma_t$ (MPa) |
|-------|---------------------------|-------------------------|------------------------------------|------------------|
| 4.0   | 2.0                       | 4.2                     | 8.4                                | 10.5             |
|       | 3.0                       | 5.0                     | 9.4                                | 11.8             |
| 4.5   | 2.0                       | 4.2                     | 10.6                               | 13.2             |
|       | 3.0                       | 5.0                     | 12.7                               | 15.9             |
| 5.0   | 2.0                       | 4.2                     | 13.1                               | 16.4             |
|       | 3.0                       | 5.0                     | 15.6                               | 19.5             |

Se supone que el forjado anterior es necesario reforzarlo y para ello se dispone un recrecido de hormigón conectando a las viguetas de madera. Se considera un espesor de recrecido de  $8.0\text{cm}$ , motivado por la flecha permanente del forjado de madera que no es posible recuperar. El estudio se realiza con dos tipos de hormigón, un HC con una densidad de

2400Kg/m<sup>3</sup>, lo que supone un peso de 1.9kN/m<sup>2</sup> y un hormigón ligero HLE con una densidad de 1700Kg/m<sup>3</sup>, lo que supone un peso de 1.4kN/m<sup>2</sup>.

### 2.3 Estudio del refuerzo sin apuntalar

En muchas ocasiones la ejecución de este tipo de refuerzos sin apuntalar el forjado es una alternativa atractiva. Para ello es necesario que el forjado existente de madera sea capaz de resistir su peso propio y el del recreado de hormigón. Las acciones a considerar en este caso son el peso del forjado (1.5kN/m<sup>2</sup>) y el peso de la losa de hormigón. En ocasiones se introduce también una sobrecarga de ejecución de 1.0kN/m<sup>2</sup>, que en este estudio no se ha considerado. Con los valores anteriores, las tensiones que se originan en las vigas de madera son las indicadas en la tabla 3:

Tabla 3 - Tensiones de trabajo del forjado existente de madera en el momento del refuerzo

| L (m) | F        | H (HC; HLE) | q <sub>d</sub> (kN/m) | M <sub>d</sub> (kN·m) | σ <sub>t</sub> (MPa) |
|-------|----------|-------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|
| 4.0   | F1, F3   | HC          | 4.6                   | 9.2                   | 11.5                 |
|       | F2, F4   | HLE         | 3.9                   | 7.8                   | 9.7                  |
| 4.5   | F5, F7   | HC          | 4.6                   | 11.6                  | 14.6                 |
|       | F6, F8   | HLE         | 3.9                   | 9.8                   | 12.4                 |
| 5.0   | F9, F11  | HC          | 4.6                   | 14.3                  | 17.9                 |
|       | F10, F12 | HLE         | 3.9                   | 12.3                  | 15.2                 |

Cuando el hormigón endurece, la sección trabaja como sección mixta para el resto de acciones (pavimento, tabiquería y sobrecarga de uso). Suponiendo que la relación entre los módulos de elasticidad del hormigón y de la madera es 3.0, el momento existente elástico de la sección mixta es de 2463 cm<sup>3</sup>. Utilizando la metodología anterior, pueden obtenerse las tensiones correspondientes a la madera y el hormigón originadas por las acciones que se introducen en esta etapa (tabla 4):

Tabla 4 - Tensiones de trabajo del forjado existente de madera y en el hormigón después de endurecido el hormigón

| L (m) | S <sub>u</sub> (kN/m <sup>2</sup> ) | F        | q <sub>d</sub> (kN/m) | M <sub>d</sub> (kN·m) | σ <sub>t</sub> (m) (MPa) | σ <sub>t</sub> (h) (MPa) |
|-------|-------------------------------------|----------|-----------------------|-----------------------|--------------------------|--------------------------|
| 4.0   | 2.0                                 | F1, F2   | 6.4                   | 12.8                  | 5.2                      | 4.5                      |
|       | 3.0                                 | F3, F4   | 7.9                   | 15.8                  | 6.4                      | 3.5                      |
| 4.5   | 2.0                                 | F5, F6   | 6.4                   | 16.2                  | 6.6                      | 5.7                      |
|       | 3.0                                 | F7, F8   | 7.9                   | 20.0                  | 8.1                      | 7.1                      |
| 5.0   | 2.0                                 | F9, F10  | 6.4                   | 20.0                  | 8.1                      | 7.1                      |
|       | 3.0                                 | F11, F12 | 7.9                   | 24.7                  | 10.0                     | 8.7                      |

El estado tensional definitivo (tabla 5) se obtendría como la suma de los valores de las tablas 3 y 4:

Tabla 5 - Tensiones definitivas en forjados sin apuntalar

| L (m) | S <sub>u</sub> (kN/m <sup>2</sup> ) | F   | H (HC; HLE) | σ <sub>m</sub> (MPa) | σ <sub>h</sub> (MPa) |
|-------|-------------------------------------|-----|-------------|----------------------|----------------------|
| 4.0   | 2.0                                 | F1  | HC          | 16.7                 | 4.5                  |
|       |                                     | F2  | HLE         | 14.9                 | 4.5                  |
|       | 3.0                                 | F3  | HC          | 17.9                 | 3.5                  |
|       |                                     | F4  | HLE         | 16.1                 | 3.5                  |
| 4.5   | 2.0                                 | F5  | HC          | 24.2                 | 5.7                  |
|       |                                     | F6  | HLE         | 19.9                 | 5.7                  |
|       | 3.0                                 | F7  | HC          | 22.7                 | 7.1                  |
|       |                                     | F8  | HLE         | 20.5                 | 7.1                  |
| 5.0   | 2.0                                 | F9  | HC          | 26.0                 | 7.1                  |
|       |                                     | F10 | HLE         | 23.3                 | 7.1                  |
|       | 3.0                                 | F11 | HC          | 27.9                 | 8.7                  |
|       |                                     | F12 | HLE         | 25.2                 | 8.7                  |

## 2.4 Estudio del refuerzo apuntalado

En este caso se supone que el forjado se apuntala antes de verter la capa de hormigón. De este modo el estudio se realiza en dos etapas. En la primera etapa se obtienen las tensiones agotadas en la madera como consecuencia del peso propio del forjado ( $1.5\text{kN/m}^2$ ). En la segunda etapa se considera la sección mixta resistiendo el resto de acciones. Los valores obtenidos para las etapas anteriores y el estado definitivo se indican en las tablas 6, 7 y 8.

Tabla 6 - Tensiones de trabajo en el forjado de madera debido a su peso propio

| L (m) | F                   | $q_d$ (kN/m) | $M_d$ (kN·m) | $\sigma_t$ (m) (MPa) |
|-------|---------------------|--------------|--------------|----------------------|
| 4.0   | F1, F2<br>F3, F4    | 2.0          | 4.0          | 5.0                  |
| 4.5   | F5, F6<br>F7, F8    | 2.0          | 5.1          | 6.4                  |
| 5.0   | F9, F10<br>F11, F12 | 2.0          | 6.2          | 7.7                  |

Tabla 7 - Tensiones de trabajo en la madera y en el hormigón después de endurecido el hormigón

| L (m) | $S_u$ (kN/m <sup>2</sup> ) | F   | H (HC; HLE) | $q_d$ (kN/m) | $M_d$ (kN·m) | $\sigma_m$ (MPa) | $\sigma_h$ (MPa) |
|-------|----------------------------|-----|-------------|--------------|--------------|------------------|------------------|
| 4.0   | 2.0                        | F1  | HC          | 8.9          | 17.8         | 7.2              | 6.3              |
|       |                            | F2  | HLE         | 8.3          | 16.6         | 6.7              | 5.9              |
|       | 3.0                        | F3  | HC          | 10.4         | 20.8         | 8.4              | 7.3              |
|       |                            | F4  | HLE         | 9.8          | 19.6         | 8.0              | 6.9              |
| 4.5   | 2.0                        | F5  | HC          | 8.9          | 22.5         | 9.1              | 8.0              |
|       |                            | F6  | HLE         | 8.3          | 21.0         | 8.5              | 7.4              |
|       | 3.0                        | F7  | HC          | 10.4         | 26.3         | 10.7             | 9.3              |
|       |                            | F8  | HLE         | 9.8          | 24.8         | 10.1             | 8.8              |
| 5.0   | 2.0                        | F9  | HC          | 8.9          | 27.8         | 11.3             | 9.8              |
|       |                            | F10 | HLE         | 8.3          | 25.9         | 10.5             | 9.2              |
|       | 3.0                        | F11 | HC          | 10.4         | 32.5         | 13.2             | 11.5             |
|       |                            | F12 | HLE         | 9.8          | 30.6         | 12.4             | 10.8             |

El estado tensional definitivo se obtiene como suma de los valores de las tablas 6 y 7.

Tabla 8 - Tensiones de trabajo definitivas en los forjados apuntalados

| L (m) | $S_u$ (kN/m <sup>2</sup> ) | F   | H (HC; HLE) | $\sigma_m$ (MPa) | $\sigma_h$ (MPa) |
|-------|----------------------------|-----|-------------|------------------|------------------|
| 4.0   | 2.0                        | F1  | HC          | 12.2             | 6.3              |
|       |                            | F2  | HLE         | 11.7             | 5.9              |
|       | 3.0                        | F3  | HC          | 13.4             | 7.3              |
|       |                            | F4  | HLE         | 13.0             | 6.9              |
| 4.5   | 2.0                        | F5  | HC          | 15.5             | 8.0              |
|       |                            | F6  | HLE         | 14.9             | 7.4              |
|       | 3.0                        | F7  | HC          | 17.1             | 9.3              |
|       |                            | F8  | HLE         | 16.5             | 8.8              |
| 5.0   | 2.0                        | F9  | HC          | 19.0             | 9.8              |
|       |                            | F10 | HLE         | 18.2             | 9.2              |
|       | 3.0                        | F11 | HC          | 20.9             | 11.5             |
|       |                            | F12 | HLE         | 20.1             | 10.8             |

## 3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los elevados valores de tensión de trabajo obtenidos para las vigas de madera en la primera etapa del refuerzo (tablas 3 y 6) muestran que esta primera etapa es un momento crítico en esta operación y requiere un estudio cuidadoso. Cuando

el forjado se apuntala antes de verter el hormigón (tabla 6), los valores de tensión alcanzados son significativamente menores a los obtenidos cuando el forjado no se apuntala, debido a las menores cargas que actúan. Además, los valores alcanzados en este último caso no pueden ser asumidos por muchas calidades de madera y superan a los obtenidos en la evaluación preliminar (tabla 2).

Los valores definitivos de tensión alcanzados por la madera son inferiores en el caso de los forjados apuntalados. Esto es debido a que en el caso de apuntalar los forjados, la acción debida al peso propio del hormigón actúa sobre la sección reforzada que posee un momento resistente triple al de la sección sin reforzar, lo que origina menores tensiones. En el caso del forjado sin apuntalar, todo el peso del recrecido del hormigón actúa únicamente sobre las piezas de madera.

El empleo del hormigón ligero en vez del convencional supone una menor carga, lo que implica menores tensiones sobre la estructura. En el caso de que el forjado no se apuntale, las ventajas del empleo del hormigón ligero son superiores (tabla 5) debido a que esta carga debe ser asumida solo por la estructura de madera (con un momento resistente inferior al de la estructura mixta). Cuando el forjado se apuntala, el empleo del hormigón ligero también implica una reducción en el valor de las tensiones definitivas (tabla 8) pero en este caso la reducción es porcentualmente menor a la alcanzada en el caso anterior.

#### **4. CONCLUSIONES**

La primera etapa del refuerzo es un momento crítico y requiere un estudio cuidadoso. Los valores de tensión alcanzados son significativamente menores cuando el forjado se apuntala.

Los valores definitivos de tensión alcanzados por la madera son inferiores en el caso de los forjados apuntalados.

El empleo de hormigón ligero estructural en vez del convencional supone una menor carga, lo que implica menores tensiones sobre la estructura.

En el caso de que el forjado no se apuntale, las ventajas del empleo del hormigón ligero estructural son superiores.

Para el caso de situaciones en las que no es posible apuntalar el forjado que se está reforzando, el empleo de hormigones ligeros estructurales frente a hormigones convencionales, se muestra como una alternativa viable y muy atractiva.

#### **5. AGRADECIMENTOS**

Los autores desean agradecer la financiación y ayuda recibida de la empresa LAFARGE, necesarios para la realización de este trabajo.

#### **6. REFERENCIAS**

- [1] Bouhaya L., et al. "Simplified environmental study on innovative bridge structure", *Environ Sci Technol*, 2009, n°43(6), pp. 2066–71.
- [2] P.J. Yttrup P.J., "Concrete enhanced timber", Timber building in Australia, 2005.