

# Refuerzos activos de vigas y forjados mediante perfiles metálicos

## *Active Strengthening of Beams and Slabs Using Steel Profiles*

Raúl Rodríguez Escribano<sup>a,b</sup>, Enrique González Valle<sup>a</sup> y Jorge Ley Urzaiz<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Instituto Técnico de Materiales y Construcciones (INTEMAC)

<sup>b</sup> Escuela de Arquitectura, Ingeniería y Diseño de la Universidad Europea de Madrid

Recibido el 8 de diciembre de 2020; aceptado el 18 de mayo de 2021

### RESUMEN

Una técnica de refuerzo de vigas y forjados consiste en la disposición de perfiles metálicos bajo los elementos a reforzar y retacarlos a ellos. Este tipo de refuerzo a menudo se diseña desde un planteamiento pasivo, es decir, hasta que se incremente la carga, los perfiles no entran en carga o solo lo hacen ligeramente y de forma no controlada mediante acuñado con cuñas de acero.

Una alternativa es un enfoque activo: introducir fuerzas (por ejemplo, mediante gatos, barras roscadas, etc.) entre el perfil y el elemento a reforzar, y posteriormente retacar la viga de acero a la pieza en los puntos de introducción de las fuerzas, manteniendo la predeformación obtenida en el elemento de acero con mortero, cuñas de acero, etc. La fiabilidad del cálculo de flechas en elementos metálicos permite un control exhaustivo de los esfuerzos introducidos, tanto al reforzar como a lo largo de la vida de la estructura, mediante el seguimiento de los desplazamientos en el elemento de acero.

Este trabajo expone ejemplos de la aplicación de esta técnica, que muestran aspectos básicos a considerar en este tipo de refuerzo tanto en el diseño como en su posterior ejecución y control.

**PALABRAS CLAVE:** Refuerzo, rehabilitación, perfiles metálicos, presolicitud.

© 2021 Asociación Española de Ingeniería Estructural (ACHE). Publicado por Cinter Divulgación Técnica S.L. Todos los derechos reservados.

### ABSTRACT

A technique of reinforcing beams and slabs consists in the arrangement of metal profiles under the elements to be reinforced and challenged to them. This sort of strengthening is often designed from a passive approach; i.e., until the load is increased, the shapes are either not loaded or are only slightly loaded to some unquantified extent by caulking with steel shims.

An alternative is an active approach: to introduce forces (e.g., by means of jacks, threaded bars, etc.) between the profile and the element to be reinforced, and subsequently challenging the steel beam to the part at the points of introduction of the forces, maintaining the pre-deformation obtained in the steel element by mortar, steel shims, etc. The reliability of the calculation of deflections in metal elements allows a thorough control of the forces introduced, both when reinforcing and throughout the life of the structure, by monitoring the displacements in the steel element.

This work sets out examples of the application of this technique, which show basic aspects to consider in this type of strengthening both in the design and in its subsequent execution and control.

**KEYWORDS:** Strengthening, rehabilitation, metal profiles, preloading.

© 2021 Asociación Española de Ingeniería Estructural (ACHE). Published by Cinter Divulgación Técnica S.L. All rights reserved.

## 1. INTRODUCCIÓN

Una técnica de refuerzo de elementos flectados en general y, en particular, de vigas y forjados de hormigón armado, consiste

en la disposición de perfiles metálicos por debajo de los elementos a reforzar y retacados a ellos [1], [2] y [4]. Ejemplos de este tipo de refuerzos se muestran en la figura 1 (tomada de [3]), en la que se expone un caso de refuerzo mediante perfiles metálicos debajo de cada uno de los nervios de una de las direcciones de un forjado reticular en un centro comercial

\* Persona de contacto / Corresponding author.  
Correo-e / email: [rrodriguez@intemac.es](mailto:rrodriguez@intemac.es) (Raúl Rodríguez Escribano)



Figura 1. Ejemplos de refuerzos *pasivos* de forjados con perfiles metálicos.

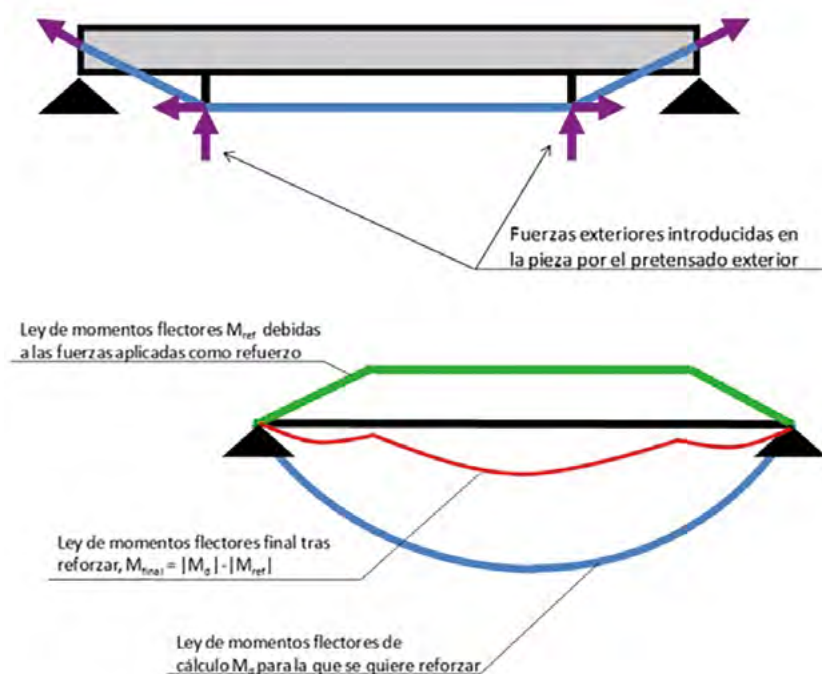


Figura 2. Planteamiento de un refuerzo activo de un elemento flectado.

sometido a tráfico de camiones pesados, y un refuerzo de forjado mediante un sistema de parteluces metálicos con apoyo en jácenas también metálicas que descansan sobre los pilares.

Estos ejemplos corresponden a un planteamiento pasivo del refuerzo, es decir, los perfiles no entran en carga hasta que no se incrementan las acciones, o lo hacen solo ligeramente y de forma cuantitativamente no controlada mediante cuñas metálicas. Solo para estructuras con poca edad, en las que quedan por desarrollarse flechas por fluencia (y, en menor medida, por retracción), estos refuerzos entran en carga sin incremento de las acciones.

Este planteamiento pasivo del refuerzo obliga a establecer un riguroso análisis de deformaciones del elemento a reforzar y de los perfiles de refuerzo, aparte de las lógicas comprobaciones de seguridad de los perfiles. En efecto, un planteamiento del refuerzo solo por criterios de seguridad puede llevar, en el

caso por ejemplo de refuerzos mediante parteluces, a que las deformaciones (flechas) que tiene que tomar el forjado resulten incompatibles con sus condiciones de seguridad, produciéndose el agotamiento del forjado antes de que el refuerzo colabore plenamente. Esto es especialmente importante cuando el refuerzo es necesario frente a esfuerzos que provocan un fallo de tipo frágil, como el cortante, el esfuerzo rasante o la flexión en casos de reducida o nula capacidad de redistribución. Este análisis de compatibilidad de deformaciones conduce en muchos casos a perfiles de un calibre considerable

Otro posible refuerzo de elementos flectados consiste en disponer un pretensado exterior [8], [9], [10], [11], [14], [15], [16]. En la figura 2 se muestra el planteamiento del refuerzo a flexión, que en líneas generales no se diferencia de un pretensado exterior convencional (con algunas particularidades en cuanto a los detalles constructivos). Como se observa

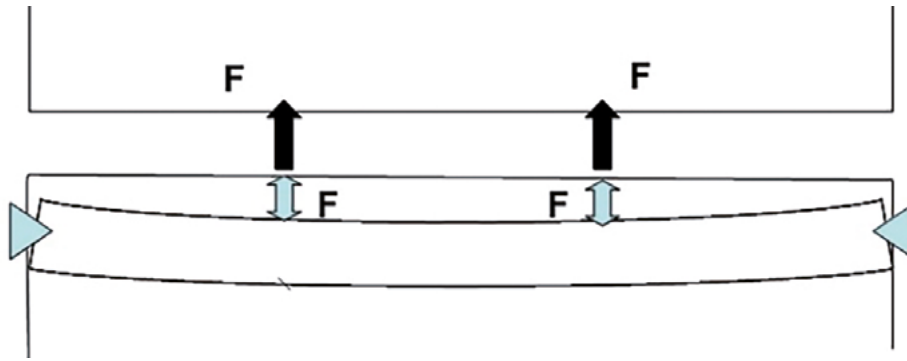


Figura 3. Croquis de introducción de fuerzas mediante la predeformación del perfil de refuerzo.

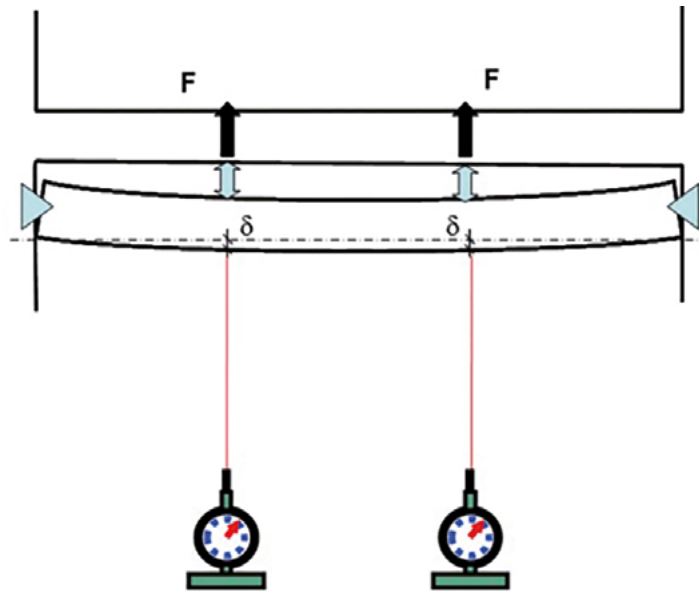


Figura 4. Control de las fuerzas introducidas mediante medida de las flechas en el perfil.

en la parte inferior de la figura, el pretensado exterior crea unas fuerzas exteriores sobre la pieza, que dan lugar a unos momentos flectores  $M_{ref}$  que se suman a los momentos de cálculo  $M_d$  sobre la pieza dando lugar a unos momentos finales  $M_{final} = M_d + M_{ref,d}$ . La pieza será segura si estos momentos finales son resistidos por la pieza. Análoga consideración cabe establecer respecto del cortante.

Una alternativa, analizada en la Tesis Doctoral [3] y en [18], es combinar los dos procedimientos de refuerzo expuestos, y que consiste en convertir el refuerzo *pasivo* mediante perfiles en un refuerzo *activo*, introduciendo unas fuerzas (por ejemplo, mediante gatos) entre el perfil y el elemento a reforzar como esquemáticamente se muestra en la figura 3, retacando posteriormente el perfil a la viga en los puntos de introducción de las fuerzas mediante cuñas metálicas, mortero, etc. Mediante el gato puede conocerse la fuerza introducida, con las incertidumbres inherentes a la precisión esperable del propio gato.

En la investigación realizada [3] se propone una simplificación en la forma de controlar las fuerzas introducidas por este sistema, al tiempo que se mejora el control sobre la magnitud de las mismas: controlar las fuerzas introducidas a través de la medida de las flechas que se obtienen al hacer reaccionar me-

dante gatos, barras roscadas, etc. el perfil de refuerzo contra la viga. Esto permite introducir la carga mediante procedimientos sencillos que no dispongan de dispositivos (manómetros, etc.) de medida de la carga introducida, o bien controlar la fiabilidad de tales dispositivos. La gran fiabilidad que tiene el cálculo de flechas en jácenas metálicas hace que mediante este procedimiento se pueda conocer con gran precisión el valor de las fuerzas introducidas (figura 4).

Las medidas de las flechas se pueden llevar a cabo mediante los procedimientos de instrumentación habituales en pruebas de carga. La precisión del instrumental empleado en dichas pruebas es más que suficiente para conocer con la fiabilidad necesaria las flechas provocadas por las fuerzas en el perfil de refuerzo, y consiguientemente el valor de dichas fuerzas.

Los aspectos críticos de este tipo de refuerzo son:

- En el planteamiento del refuerzo, la localización óptima de las fuerzas a introducir y sus valores límite, mínimos y máximos, en función de la capacidad resistente del elemento que se refuerza y de la que se le exige una vez reforzado.
- La variación que experimentan las fuerzas de refuerzo en el tiempo, por distintos aspectos (fluencia, variación en las cargas que actúan sobre la viga, etc.).

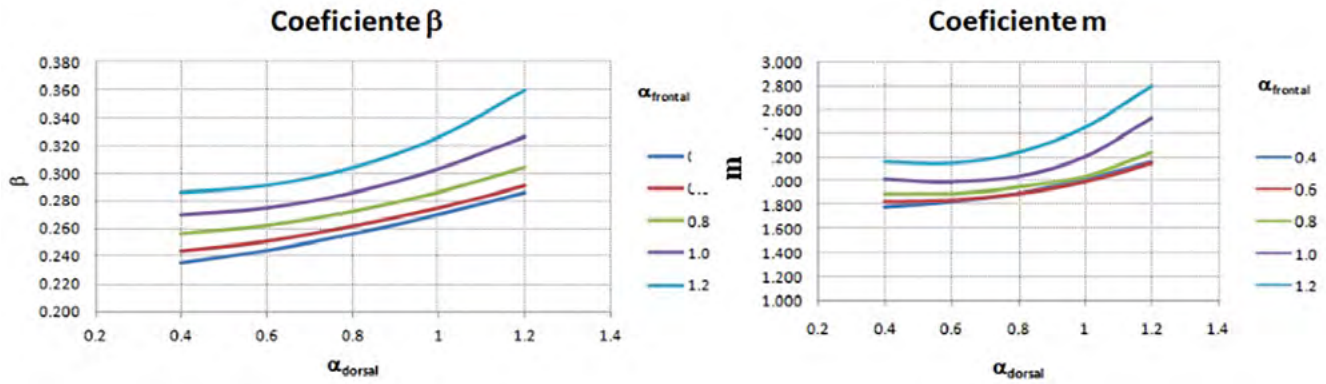


Figura 5. Parámetros para definir el valor y la posición óptimos de las fuerzas de refuerzo en una viga en la que su ley de capacidades a flexión se ajuste de forma estricta a la ley de momentos flectores.

- Procedimiento de control de las fuerzas introducidas y su evolución en el tiempo mediante la auscultación del perfil de refuerzo.

Estos aspectos han sido analizados en [3]. A continuación, se exponen los aspectos más relevantes deducidos de este análisis y los resultados obtenidos.

## 2. ASPECTOS A CONSIDERAR EN EL PLANTEAMIENTO DEL REFUERZO

La aplicación de fuerzas exteriores como forma de refuerzo a flexión en piezas lineales sometidas a flexión supone un cambio en la forma de la ley de momentos flectores respecto a la debida a las cargas para la que fue diseñada la pieza, especialmente notable cuando actúan únicamente las cargas permanentes.

Ello obliga a evaluar la seguridad a todo lo largo del vano, determinando las leyes de capacidad a flexión de la pieza en cada punto del vano frente a momentos positivos y negativos, y calculando las fuerzas de refuerzo de manera que frente a la totalidad de la carga para la que se diseña el refuerzo, y frente a la mínima carga que puede estar presente desde su ejecución, las leyes de momentos flectores finales (decaladas en función del efecto del cortante) queden encajadas en las leyes de capacidad sin sobrepasarlas en ningún punto.

La introducción de la seguridad debe realizarse obteniendo las leyes de capacidades a flexión  $M_u(x)$  a lo largo del vano como establecen los códigos y normativa de referencia, minorando las resistencias de los materiales por sus correspondientes coeficientes parciales de seguridad; y obteniendo las leyes de momentos flectores  $M_{final,d}(x)$  debidas a las acciones introducidas con la hipótesis de combinación que corresponda, adoptando los coeficientes parciales de seguridad y de simultaneidad que sean de aplicación, también de acuerdo con lo que establezcan los códigos y normativa de referencia. Más adelante se establecen consideraciones sobre cómo introducir la seguridad en las fuerzas de refuerzo. Así, llamando  $k$  al cociente

$$k = M_u(x) / M_{final,d}(x) \quad (1)$$

la seguridad queda garantizada siempre que en todo punto del vano  $k \geq 1.0$ , aunque en algunos casos podrían admitirse ciertas bajas.

En ese análisis, debe evaluarse la seguridad tanto frente a la carga total para la que se pretende reforzar la pieza, como para la situación en la que está presente la mínima carga. En el primer caso, las cargas permanentes y las sobrecargas deben, en general, ser consideradas como desfavorables, y las fuerzas de refuerzo, como favorables. En el segundo, en cambio, las cargas permanentes y las variables deben ser consideradas como favorables, y las fuerzas de refuerzo como desfavorables.

Se han analizado diferente número y posición de los puntos en los que introducir las cargas entre perfil y viga para el caso de que esta tuviese en cada punto una capacidad a flexión estrictamente igual a la necesaria para la carga  $p_{od}$  para la que fue diseñada. Si llamamos  $L$  a la luz de la viga y  $p_d$  a la carga para la cual queremos reforzarla, el valor de cálculo de las fuerzas de refuerzo  $F$  a introducir puede ponerse de la forma

$$F = \frac{P_{od}L}{m} \eta \quad (2)$$

siendo  $\eta$  el incremento relativo de carga, dado por la expresión  $\eta = \frac{P_d}{P_{od}}$ , y  $m$  un coeficiente que depende del grado de empotramiento en apoyos.

Para la hipótesis que permite un más sencillo control, que es la introducción de dos fuerzas iguales simétricamente dispuestas en el vano, los resultados se resumen en la figura 5, en la que se indica el coeficiente  $\beta$  que, multiplicado por la luz del vano, nos da la distancia  $a$  de los puntos de acuñado a los apoyos. Dicha distancia es función del grado de empotramiento de la pieza en apoyos, que en la gráfica se tiene en cuenta a partir de los coeficientes  $\alpha_{dorsal}$  y  $\alpha_{frontal}$  que representan el cociente entre el momento flector en apoyo dorsal o frontal, respectivamente, y el momento de empotramiento perfecto. Puede observarse cómo la posición de las fuerzas de refuerzo más efectiva está entre cuartos y tercios de la luz, salvo para situaciones de momentos flectores en apoyos superiores a los de empotramiento perfecto en los que se encuentra algo más cerca del centro de vano.

Convendría en todo caso acercar ligeramente las fuerzas de refuerzo hacia los apoyos si no hay armadura fiable que cubra una mínima capacidad a flexión frente a momentos negativos a partir del punto de momento nulo, de manera que se disponga



de cierto margen al asegurar que no se producirán inversiones de momentos en la zona central de vano, que pudieran dar lugar a una rotura frágil en esa zona.

Cuando las cuantías de armadura a lo largo de la viga permiten con fiabilidad suficiente considerar una mínima capacidad frente a momentos de signo contrario a los originados por las cargas gravitatorias, existe una mayor libertad a la hora de fijar los puntos de reacción del perfil contra la viga. Es la situación de diseño que hemos denominado como "hipótesis holgada de dimensionamiento".

El diseño óptimo del refuerzo, en cuanto al módulo resistente necesario en el perfil para materializar las fuerzas de refuerzo, se obtiene disponiendo los puntos de reacción del perfil contra la viga de manera que se alcance la seguridad estricta al mismo tiempo ( $k=1.00$ ) en las secciones de vano y en apoyos, o al menos en vano y uno de los apoyos. Si la pieza está estrictamente dimensionada (es decir, frente a la carga de diseño  $p_{od}$  se alcanza la seguridad estricta en vanos y apoyos) este óptimo está en el entorno de los tercios de la luz (exactamente un tercio en vanos biempotrados). Esta posición de las fuerzas de refuerzo tiene la ventaja, además, de que se aproxima mucho a la óptima en la hipótesis de "dimensionamiento estricto", por lo que comparte los aspectos positivos de dicha hipótesis antes comentadas. En vanos biapoyados lo anterior no rige, ya que el módulo resistente necesario por flexión en el perfil para introducir las fuerzas estrictamente necesarias no depende de la posición de los puntos de acuñaado.

Para materializar estas fuerzas y su posición correspondiente con un perfil que trabaje como biapoyado, de los análisis realizados [3] se deduce que el módulo resistente necesario en el perfil es entre un 10% y un 60% inferior al que resulta necesario como "malla de seguridad" o "malla de sostenimiento", es decir, dimensionada para resistir la totalidad de la carga aunque sin imponerle condición de deformabilidad máxima alguna (condición que haría que la diferencia fuese aún mayor). Se ve que supone un ahorro muy notable de material y que en la mayoría de los casos compensará el coste de la instrumentación necesaria para la ejecución del refuerzo, independientemente del resto de ventajas que tiene el refuerzo propuesto respecto de la "malla de seguridad", como son:

- El hecho de que la "malla de seguridad", si llega a trabajar como tal, requeriría reparaciones en la estructura y partes no estructurales.
- El refuerzo colabora de forma importante en servicio, mejorando las flechas y fisuración, cosa que hace en mucha menor medida el refuerzo como malla de seguridad.
- La difícil valoración, salvo el empleo de perfiles muy rígidos, de cómo se transfieren las cargas de la viga al perfil considerado como "malla de seguridad".

Por ejemplo, en un retacado en dos puntos a tercios de la luz en una viga apoyada-empotrada, se ha comprobado que únicamente entrará en carga el punto de retacado o acuñaado más próximo al apoyo articulado, y no lo hará en el otro salvo situaciones muy avanzadas de daño en la viga, aspecto desde todo punto de vista indeseable.

Del análisis realizado, se deduce además que el ahorro en el perfil respecto del que se obtendría en un dimensionamiento como "malla de seguridad" es tanto mayor cuanto mayor es el

incremento de carga para el que se refuerza la pieza.

Un resultado interesante es que el disponer una única fuerza en centro de vano es también una excelente solución pues, aunque exige un perfil de refuerzo algo mayor (del orden de un 33% más de módulo resistente, por ejemplo en vanos biempotrados), da lugar a una reacción menor en los apoyos (lo que simplifica y abarata la conexión del perfil a los pilares o muros de carga) y además, como comentamos antes, reduce los errores en la evaluación de la fuerza a través de la medida de la flecha. Además, se simplifican notablemente los cálculos. En todo caso, es preferible la disposición de las fuerzas a tercio de la luz por los motivos expuestos.

La posición más próxima al apoyo de los puntos de acuñaado, a partir de la cual el refuerzo empieza a presentar diferentes tipos de problemas, sería un cuarto de la luz. Desde el punto de vista del refuerzo a flexión son claramente más ventajosas las posiciones antes comentadas, pero en algunos casos puede ser interesante la disposición de los puntos de acuñaado a cuartos de la luz, pues es una buena solución cuando se combina el refuerzo a flexión y a cortante. De hecho, con esa posición es con la que más cerca se estaría de asegurar que los cortantes finales debidos a la carga  $p_d$  más las fuerzas de refuerzo fuesen inferiores a los debidos a la carga de diseño  $p_{od}$  (en vanos biapoyados se garantiza tal circunstancia entre apoyos y el punto de contacto).

Lógicamente, en el caso de fuerzas puntuales la posición más adecuada de los puntos de reacción del perfil en la viga es precisamente la posición de las cargas puntuales.

En cuanto a la rigidez del perfil a disponer, será el fruto de un doble análisis, función de la carga presente cuando se ejecute el refuerzo (que denominaremos  $p_{min,d}$ ) y la máxima carga para la que se diseña  $p_d$ . En efecto, al incrementarse las cargas sobre el valor de  $p_{min,d}$  la viga impondrá una mayor deformación en el perfil y, por lo tanto, un incremento en las fuerzas de refuerzo introducidas, en función de la localización de los puntos de retacado, la relación entre la rigidez de la viga y la del perfil  $(EI)_{viga} / (EI)_{ref}$ , y la posible reducción en la rigidez de la viga por fisuración conforme se incrementan las cargas. Y ello puede ocurrir de forma diferente en los puntos de retacado del perfil a la viga, si los momentos no son iguales en ambos apoyos, hasta el punto de que, cuando en uno de los apoyos el momento es muy reducido (embrochamientos, apoyos extremos de vigas continuas, ...) se llega a producir una disminución en el valor de la fuerza inicialmente introducida en el punto de retacado más próximo a dicho apoyo, aunque de valor reducido (inferiores al 6% del valor de la fuerza inicial).

En ocasiones, no se puede introducir toda la fuerza de refuerzo necesaria. Ocurre, por ejemplo, cuando queremos evitar una situación técnicamente no admisible de la pieza frente a momentos de signo contrario a los de las cargas gravitatorias cuando actúa la mínima carga que puede estar presente. Además, como consecuencia de las deformaciones diferidas del hormigón, puede perderse parte de la fuerza de refuerzo introducida. En estos casos, puede tratarse de conseguir la parte de fuerza necesaria de la que no se dispone, precisamente contando con el incremento en esta última al pasar de la carga  $p_{min,d}$  presente al ejecutar el refuerzo a la carga total  $p_d$ .

Por otro lado, el incremento en las fuerzas puede suponer que la pieza quede sometida a momentos de signo contrario a los debidos a las cargas gravitatorias y, por lo tanto, puede

condicionar la máxima rigidez del perfil que puede disponerse. Este aspecto puede limitar la máxima rigidez del perfil que podemos adoptar.

En [3] se incluyen tablas y gráficos de aplicación práctica de los aspectos indicados.

En cuanto a la hipótesis accidental de fuego, caben dos situaciones, en función de que la viga presente o no condiciones de seguridad técnicamente admisibles en la situación accidental de fuego, frente a la carga  $p_d$  prevista, sin refuerzo:

- En el primer caso no sería necesaria la protección del perfil ni en general análisis complementarios.
- En el segundo caso, un estudio de la interacción perfil-viga de refuerzo, en función de las temperaturas del gas y las que estas inducen en viga y perfil, analizando cómo afectan a las propiedades mecánicas (resistencia y deformabilidad) de las piezas, siempre sería posible, pero entendemos que más como línea de investigación para poder acotar los fenómenos analizados y proponer vías simplificadas de análisis, que como método práctico de diseño.

Otra alternativa es admitir que la viga pueda sufrir deformaciones importantes al fallar en la situación de fuego, y que quedase apeada por el perfil en los puntos de retacado. Para ello sería necesario proteger frente a la situación de fuego el perfil, y dimensionar este para que, con los coeficientes parciales de seguridad y de combinación correspondientes a la situación accidental de fuego, fuese capaz de soportar las reacciones que la viga produciría en tal situación. Para esta situación resulta en principio más adecuado el retacado en dos puntos, preferentemente a tercios de la luz, que en un único punto.

### 3. VARIACIÓN EN EL TIEMPO DE LAS FUERZAS DE REFUERZO POR FLUENCIA, RETRACCIÓN Y TEMPERATURA

Las variaciones en las fuerzas de refuerzo como consecuencia de este fenómeno vienen dadas por la coacción parcial que el perfil impone a la variación por fluencia de las flechas de la viga en los puntos de contacto entre ambos. El problema es análogo al caso de las pérdidas de pretensado por fluencia, aunque en este último se trate de un problema de deformaciones.

En [3] se incluyen expresiones, gráficos y tablas para la evaluación de esta variación de las fuerzas de refuerzo introducidas en la viga, en función de diferentes aspectos (condiciones de empotramiento en apoyos, localización de los puntos de introducción de las fuerzas, rigideces relativas entre viga y perfil, etc.). A modo de ejemplo, para una viga con condiciones de empotramiento simétricas reforzada con dos fuerzas de refuerzo  $F$  iguales y simétricamente dispuestas respecto del centro del vano, la variación en cada una de dichas fuerzas de refuerzo por fluencia viene dada por la expresión:

$$(\Delta F)_\varphi = \frac{n \left[ g_d F_{viga}^{(0)}(a) - (F + (\Delta F)_1) F_{viga}^*(a) \right] \frac{1}{F_{ref}^*(a)} \varphi(t, t_0)}{1 + n \frac{F_{viga}^*(a)}{F_{ref}^*(a)} (1 + \chi(t, t_0) \varphi(t, t_0))} \quad (3)$$

siendo:

- $F$  el valor de cada una de las fuerzas de refuerzo.
- $n$  la relación  $(EI)_{viga} / (EI)_{ref}$ .
- $g_d$  carga permanente total.
- $F_{viga}^{(0)}(a)$  un coeficiente igual a la flecha *instantánea* de la viga en los puntos de aplicación de las fuerzas de refuerzo debida a una carga uniformemente repartida de valor unidad, multiplicada por  $(EI)_{viga}$  (módulo de deformación instantáneo del hormigón multiplicado por la inercia de la viga). La flecha *instantánea* debida a una carga uniformemente repartida  $q$  sería por lo tanto  $\frac{q F_{viga}^{(0)}(a)}{(EI)_{viga}}$ .
- $F_{viga}^*(a)$  un coeficiente igual a la flecha *instantánea* de la viga en los puntos de aplicación de las fuerzas de refuerzo debida a unas cargas puntuales de valor unidad aplicadas en esos mismos puntos, multiplicada por  $(EI)_{viga}$  (la flecha *instantánea* en esos puntos de la viga debida a unas cargas puntuales de valor  $Q$  aplicadas en ellos sería por lo tanto  $\frac{Q F_{viga}^*(a)}{(EI)_{viga}}$ ).
- $F_{ref}^*(a)$  un coeficiente igual a la flecha *instantánea* en el perfil de refuerzo en los puntos de aplicación de las fuerzas de refuerzo debida a unas cargas puntuales de valor unidad aplicadas en esos mismos puntos, multiplicada por  $(EI)_{ref}$  (módulo de deformación del acero multiplicado por el momento de inercia del perfil metálico). La flecha *instantánea* en esos puntos del perfil debida a unas cargas puntuales de valor  $Q$  aplicadas en ellos sería por lo tanto  $\frac{Q F_{ref}^*(a)}{(EI)_{ref}}$ .
- $(\Delta F)_1$  la posible variación en cada una de las fuerzas de refuerzo, al pasar de  $p_{min,d}$  a la carga permanente total  $g_d$ , que se deduce de acuerdo con lo ya analizado relativo a la interacción viga-perfil (en la expresión se asume que ese incremento en las cargas permanentes se produce en fechas próximas a la de la ejecución del refuerzo).
- $\varphi(t, t_0)$  Coeficiente de fluencia entre el instante  $t_0$  de ejecución del refuerzo y el instante  $t$  en el que se evalúa la variación en la fuerza de refuerzo.
- $\chi(t, t_0)$  coeficiente de envejecimiento entre los instantes  $t_0$  y  $t$  [5], [13].

La expresión propuesta es formalmente análoga a la que recogen algunos códigos [6], [7], [12] y bibliografía [5], [13] sobre las pérdidas de pretensado por fluencia.

Como consecuencia de la fluencia se producirán pérdidas en las fuerzas de refuerzo siempre que, con las cargas permanentes y la fracción de sobrecarga que permanentemente actúe sobre la viga, dichas fuerzas provoquen flechas instantáneas ascendentes en los puntos de retacado. Si no es así, como consecuencia de la fluencia se producirán incrementos en dichas

fuerzas, lo que no siempre será favorable cuando actúen la carga mínima en la viga como ya hemos visto.

De acuerdo con la investigación realizada, y como puede deducirse de la expresión anterior, las variaciones en las fuerzas de refuerzo son fuertemente dependientes de la relación de rigideces entre viga y perfil (mayores cuanto menor es dicha relación). Esto tiene tres consecuencias importantes a tener en cuenta:

- Previene de emplear perfiles muy rígidos para este tipo de refuerzos, haciendo preferible el empleo de perfiles de rigidez reducida en comparación con la de la viga para minimizar las variaciones en las fuerzas de refuerzo.
- Indica que, para corregir las pérdidas por fluencia en las fuerzas de refuerzo, puede ser erróneo aumentar la rigidez del perfil.
- Alerta del hecho de que un cambio en obra del perfil elegido por otro más rígido, introduciendo la misma fuerza de refuerzo, puede resultar inseguro, aspecto que puede no ser nada intuitivo.

Para refuerzos con una fuerza en centro de vano, o con dos fuerzas iguales y simétricamente dispuestas respecto del centro de la pieza, y con condiciones de empotramiento iguales en ambos apoyos, se han obtenido para las situaciones habituales estos resultados:

- Las pérdidas en las fuerzas de refuerzo respecto del valor mínimo requerido para dichas fuerzas son tanto mayores cuanto más próximas al centro de vano se sitúan las fuerzas de refuerzo, y cuanto mayor es el grado de empotramiento en apoyos. Por ejemplo, para  $\varphi=2.0$  y relaciones entre la carga permanente y la carga total de cálculo de 0.2, la diferencia en la variación en la fuerza de refuerzo respecto del valor mínimo requerido entre la que se obtiene para fuerzas de refuerzo aplicadas a cuartos de la luz, y aplicada en centro de vano, es del 7% para vanos biapoyados y del 55% para vanos biempotrados.
- En cambio, si se producen ganancias en las fuerzas de refuerzo, estas son mayores cuanto más próximas se encuentran las fuerzas de refuerzo de los apoyos, y cuanto menor es el grado de empotramiento. Por ejemplo, para  $\varphi=2.0$  y relaciones entre la carga permanente y la carga total de cálculo de 0.8, la diferencia en la variación en la fuerza de refuerzo respecto del valor mínimo requerido entre la que se obtiene para fuerzas de refuerzo aplicadas a cuartos de la luz, y aplicada en centro de vano, es del 44% para vanos biapoyados y del 20% para vanos biempotrados.

Los ejemplos que se han dado solo deben considerarse como órdenes de magnitud, pues la casuística es muy grande, en función de la relación entre la carga permanente y la carga total de cálculo, el propio valor de las fuerzas de refuerzo, etc. En todo caso, nótese que en general las pérdidas pueden ser muy superiores a las que habitualmente se tienen por fluencia en pretensado, lo que hace que, en líneas generales, sea aconsejable reducir al mínimo indispensable, desde el punto de vista de la seguridad, la rigidez del perfil.

Para el caso de estructuras antiguas, considerando como tales aquellas en las que sus flechas diferidas pueden considerarse estabilizadas (aquellas con edades superiores a entre siete

y diez años), una cota superior de la fluencia sería del orden de  $\varphi=0.4$ , que correspondería básicamente a la deformación elástica diferida. Considerando este valor, las pérdidas que se pueden producir en las fuerzas de refuerzo son en general inferiores al 10%, y para incrementos de refuerzo moderados (incrementos en la carga total de cálculo inferiores al 25%) y rigideces del perfil no muy grandes (inferiores a la mitad de la de la viga), las pérdidas raramente superarán el 5% y por lo tanto pueden despreciarse. Sin embargo, si se producen ganancias en las fuerzas de refuerzo, estas pueden llegar en casos extremos a superar el 40% y por lo tanto no serían despreciables. Esto debe tenerse en cuenta si eventualmente resulta desfavorable la comprobación considerando la fuerza de refuerzo como desfavorable.

La retracción en general siempre provoca flechas descendentes y por lo tanto dará lugar a incrementos en las fuerzas de refuerzo. Esto daría lugar también a variaciones de refuerzo, pero que en general son despreciables salvo para estructuras de muy reducida edad, y cuando puedan ser apreciables esas flechas (caso, por ejemplo, de vigas con parte prefabricada y parte hormigonada *in situ*). En [3] se recogen expresiones que permiten evaluar estas variaciones en las fuerzas de refuerzo por retracción. Para una viga con condiciones de empotramiento simétricas reforzada con dos fuerzas de refuerzo iguales y simétricamente dispuestas respecto del centro del vano, se deduce la siguiente expresión que da la variación en cada una de dichas fuerzas de refuerzo por retracción:

$$(\Delta F)_{ret} = \frac{(EI)_{ref} f_{ret} \frac{1}{F_{ref}^*(a)}}{1 + n \frac{F_{viga}^*(a)}{F_{ref}^*(a)} (1 + \chi(t, t_0) \varphi(t, t_0))} \quad (4)$$

donde  $f_{ret}$  es la flecha en la viga debida a la retracción en los puntos de contacto entre viga y perfil, y el resto de los términos son los ya comentados al exponer la fórmula que da las pérdidas por fluencia en ese mismo caso. La fórmula anterior es de aplicación cuando reforzamos con una única fuerza  $2F$  en centro de vano. También como en el caso de la fluencia, se trata de una expresión formalmente análoga a las pérdidas de pretensado por retracción.

Los gradientes de temperatura a lo largo del canto de la viga también pueden provocar flechas y, por lo tanto, variaciones en las fuerzas de refuerzo. En [3] se recogen recomendaciones cuando estos gradientes no sean despreciables. Para una viga con condiciones de empotramiento simétricas reforzada con dos fuerzas de refuerzo iguales y simétricamente dispuestas respecto del centro del vano, se deduce la siguiente expresión que da la variación en cada una de dichas fuerzas de refuerzo por temperatura:

$$(\Delta F)_T = \frac{(EI)_{ref} f_T \frac{1}{F_{ref}^*(a)}}{1 + n \frac{F_{viga}^*(a)}{F_{ref}^*(a)}} \quad (5)$$

donde  $f_T$  es la flecha en la viga debida al gradiente térmico en los puntos de contacto entre viga y perfil, y el resto de los términos son los ya comentados al exponer las fórmulas que dan





Figura 6. Nueva losa de hormigón armado por cara superior, y vista de los perfiles metálicos de refuerzo por cara inferior.

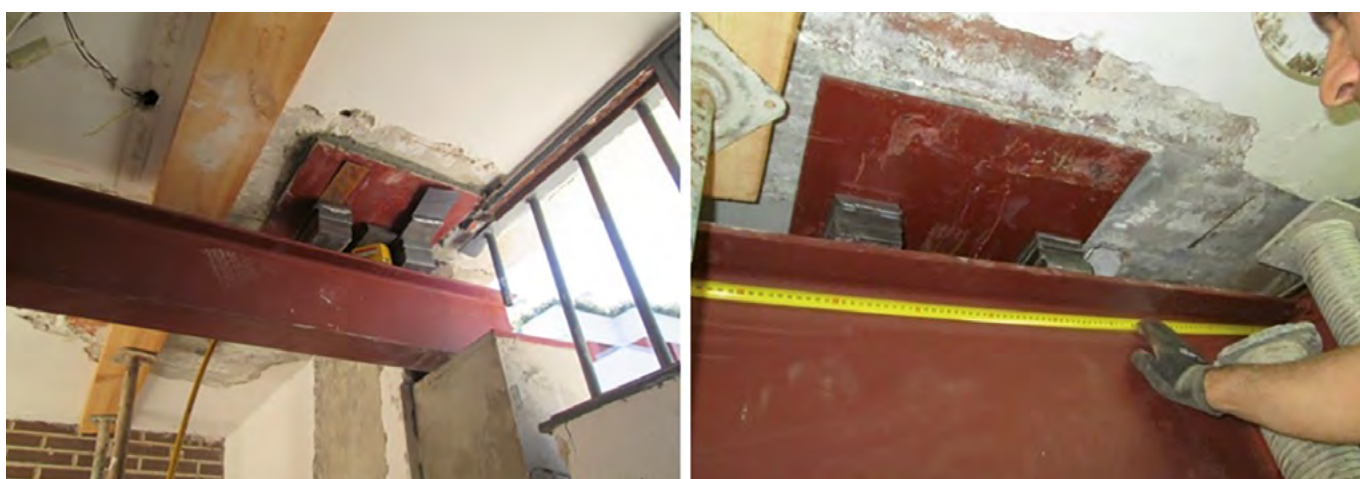


Figura 7. Refuerzo del forjado en los puntos en los que apoya, sobre el forjado existente, la nueva losa de hormigón armado.

las pérdidas por retracción y fluencia en ese mismo caso. La fórmula anterior es de aplicación cuando reforzamos con una única fuerza  $2F$  en centro de vano.

Por último, la alternancia de sobrecargas en vanos adyacentes en vigas con continuidad en apoyos daría también lugar a flechas en la viga y, por lo tanto, a variaciones en las fuerzas de refuerzo. Del estudio paramétrico realizado se deduce que, para relaciones  $(EI)_{viga} / (EI)_{ref}$  superiores a tres (que serán las habituales), la variación en las fuerzas de refuerzo con respecto a las estrictamente necesarias es inferior al 5% y, por lo tanto, pueden despreciarse. Cabe señalar que, en todo caso, se deduce que esas variaciones son tanto mayores cuanto más próximas al centro de vano se sitúan las fuerzas de refuerzo.

#### 4. EJEMPLOS DE APLICACIÓN

A continuación, se exponen algunos ejemplos de aplicación de esta técnica de refuerzo.

El primer ejemplo que mostramos a continuación corresponde a un forjado unidireccional de techo de sótano en un

edificio que presentaba condiciones de seguridad insuficientes. Por diversos motivos, la intervención más apropiada teniendo en cuenta la importante carga de tierras a disponer era ejecutar una losa de hormigón armado sobre el forjado adecuadamente independizada de este. Esta losa descansa en algunos puntos sobre vigas que se reforzaron apeándolas mediante perfiles metálicos retacados a ellas en la vertical de dichos puntos, y que a su vez descansan en la estructura existente (pilares y muros de sótano).

El retacado se planteó de forma *activa*, predeformando los perfiles con gatos, de manera que introducía una carga igual a la reacción de toda la carga permanente en los puntos de apoyo de la nueva losa (figuras 6 y 7). El apeo definitivo se realizaba disponiendo cuñas metálicas entre el perfil y la estructura horizontal, antes de descargar y retirar los gatos. Las fuerzas introducidas, y su evolución en el tiempo, se controlaban mediante medida de las deformaciones en los perfiles.

En la figura 8 se muestra un ejemplo de aplicación del refuerzo a una losa nervada de gran luz, disponiendo los perfiles entre nervios una vez comprobada la capacidad de la losa superior (de espesor y armado importantes en este caso). Dado que las vigas en las que apoya el forjado presentan condiciones de seguridad correctas, los perfiles apoyan mediante soldadura





Figura 8. Refuerzo de una losa nervada de hormigón armado.

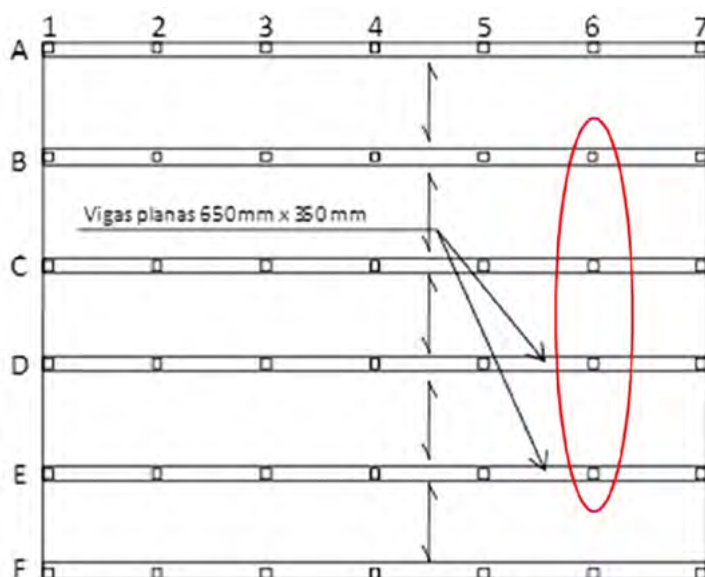


Figura 9. Croquis de la estructura de la planta de cubierta. Se señalan los pilares que fueron retirados para crear el salón de actos.

(con placas de absorción de tolerancias en uno de los apoyos) en placas metálicas ancladas a las vigas. Las cargas se introducen con gatos, midiendo las flechas con distanciómetro láser.

El criterio de diseño fue disponer una rigidez lo más reducida posible, compatible con las necesidades del refuerzo, para que la entrada en carga de cada perfil o celosía no descargase las ya puestas en carga anteriormente. Así, la flecha en los puntos de retacado en los perfiles era de 50 mm, y al poner en carga los perfiles la reducción acumulada máxima en la flecha en los perfiles ya retacados era inferior a 2 mm, lo que supone una pérdida en la fuerza de refuerzo no superior al 5%.

Las flechas se mantienen bajo control con objeto de verificar que, como se deduce de los cálculos, la variación por fluencia de las fuerzas de refuerzo es reducida al tratarse de una estructura antigua (de más de cincuenta años). A tal efecto se han dejado referencias a puntos fijos de la estructura, al tiempo que se está estudiando la posibilidad de realizar ese control mediante láser escáner (pues el valor de las flechas in-

trducidas en la predeformación de los perfiles hace que las tolerancias de esa técnica puedan resultar compatibles con las necesarias para el control del refuerzo).

Otra aplicación de la solución de refuerzo propuesta es la supresión de pilares, actuación siempre compleja [17], [18].

El primer ejemplo corresponde a un edificio de oficinas. En la figura 9 mostramos un croquis de planta de la estructura de cubierta. La remodelación consistió en la retirada de los pilares B6, C6, D6 y E6 en el tramo entre los forjados de planta primera y cubierta para crear un salón de actos diáfano.

Para cada pilar eliminado (por ejemplo, el B6) se dispuso un perfil metálico en el plano del pórtico, que descansaba en cabeza de los pilares inmediatos (B5 y B7 en el ejemplo). Este perfil apoyaba sobre los pilares de hormigón mediante unos soportes enanos (véase la figura 10) que descansaban sobre unas placas metálicas ancladas a la cabeza de los soportes, de manera que el perfil quedaba separado del forjado. De este perfil metálico se suspendían las vigas que apoyaban en el pilar

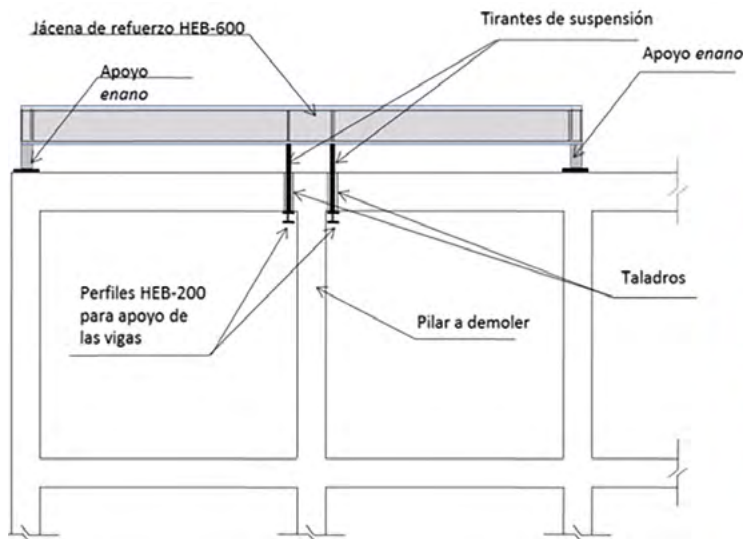


Figura 10. Croquis del refuerzo dispuesto y vista de uno de ellos.

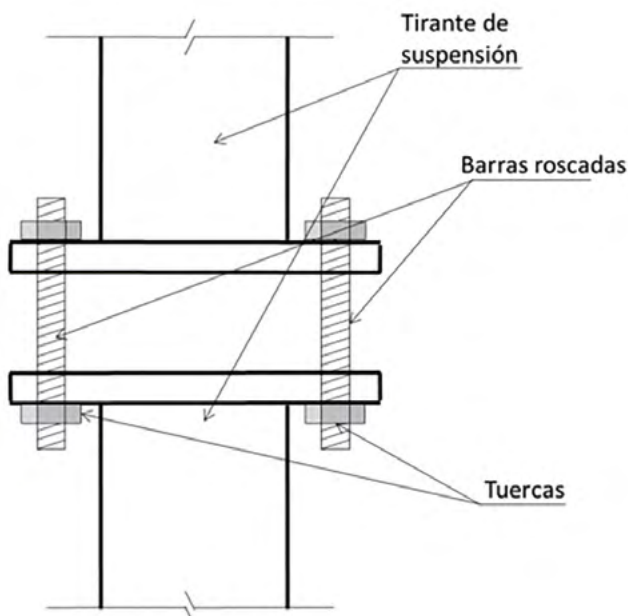


Figura 11. Sistema para acortamiento de la longitud del tirante (nota: no se representan las contratuerzas inferiores).



a demoler, por medio de tirantes que atravesaban el forjado a través de taladros practicados al efecto, como de forma esquemática se muestra en la misma figura 10.

Comprobado que los pilares sobre los que descansaba el perfil de refuerzo tenían capacidad resistente suficiente para el incremento de carga que se produciría al quedar suspendidas de dicho perfil las vigas que acometían en el pilar a eliminar, se seleccionó un perfil metálico que cumpliera las siguientes condiciones: que tuviese condiciones de seguridad adecuadas ante las cargas a las que iba a estar sometido al “colgar” de él las vigas que apoyaban en el pilar a demoler, y que fuese suficientemente rígido como para que las flechas debidas a las sobrecargas de conservación o nieve, no presentes al retirar el soporte, no provocasen una flecha excesiva en el perfil que supusiese un descenso técnicamente no admisible de las vigas. Este perfil resultó ser así un HEB-600.

Seguidamente se determinó qué flecha se obtendría en el perfil sometándolo, en los puntos de los que colgarían las vigas (figura 10), a la reacción de dichas vigas en el pilar debida a las cargas permanentes presentes al retirar el pilar. Esta flecha resultó ser de 15 mm.

La siguiente actuación fue acortar los tirantes de suspensión que se muestran en la misma figura 10 esos 15 mm, deformando así la jácena metálica de refuerzo. A tal efecto, los tirantes tenían una disposición como la que esquemáticamente se muestra en la misma figura. Apretando las tuercas que se muestran en el esquema, se acortaba la distancia entre las chapas, y mediante auscultación del perfil metálico se comprobaba la flecha que el perfil iba tomando hasta alcanzar los 15 mm. En ese instante, la precisión que se tiene en el cálculo de flechas en estructuras metálicas permitía asegurar, con suficiente aproximación, que la fuerza que ejercían los tirantes so-





Figura 12. Comparador de precisión 0,01 mm dispuesto para medida de las flechas (fotografía de la izquierda) que iba tomando el perfil de refuerzo al apretar las tuercas para acortar la longitud del tirante. Corte del pilar con sonda (fotografía de la derecha).



Figura 13. Vista del edificio y del tramo de pilar a suprimir.

bre el perfil metálico era precisamente la reacción de las vigas sobre el pilar a retirar y, por lo tanto, esa era la misma fuerza que los tirantes ejercían sobre las propias vigas.

En la [figura 11](#), se muestran los tirantes dispuestos y cómo, mediante apriete de las tuercas, se iba acortando la longitud del tirante; y en la [figura 12](#) puede observarse parte de la instrumentación dispuesta para el control de las flechas que iba tomando el perfil HEB-600 de refuerzo. En ese instante en el que la fuerza que el perfil de refuerzo ejercía sobre las vigas era precisamente la reacción de estas sobre el pilar, se procedió al corte de este último mediante sonda, corte que fue realizado manteniendo bajo control las flechas que se producían. El corte se realizó sin problemas ([figura 12](#)), y sin que se produjesen fisuras o cualquier otro tipo de daño en la estructura. Como puede observarse en la figura, al cortar mediante sonda el pilar los cortes quedaron intactos, sin aplastamientos ni desplazamientos apreciables, ni por lo tanto flechas significativas en el perfil metálico, lo que prueba que, con la predeformación aplicada, se había ejercido sobre las vigas la fuerza de cuelgue prevista.

Transcurridos unos tres años desde la operación, y desde entonces periódicamente, se ha medido la flecha del perfil, comprobando que esta no había variado significativamente, como era de esperar dado que el edificio tenía más de cuarenta años de edad y en tales circunstancias los efectos diferidos son muy poco relevantes.

El siguiente ejemplo corresponde a un edificio en Madrid ([figura 13](#)), cuya construcción original data del año 1900 y que en el año 2005 fue objeto de una rehabilitación integral en la que, manteniendo la volumetría y las fachadas, se sustituyó en cambio buena parte de la estructura, tanto vertical como horizontal, a la vez que se ejecutaron tres nuevos sótanos (inicialmente existía uno). La nueva estructura es de hormigón armado, constituida por forjados de losa maciza apoyados en pilares interiores y en los muros de fachada. En este edificio se planteó la supresión de un tramo de pilar para facilitar el paso de vehículos al sótano.

Como en el ejemplo anterior, se determinó la carga permanente en el soporte y de la sobrecarga. A continuación se diseñó un entramado metálico ([figura 14](#)) que descansaba en





Figura 14. Entramado de apeo del soporte a realizar y auscultación de la estructura durante el proceso.



Figura 15. Auscultación de la estructura metálica durante el proceso de demolición.



los soportes situados alrededor del que debía ser suprimido, mediante collarines metálicos. Este entramado se predeformó mediante gatos (figura 14) haciéndole coger una flecha igual a la que experimentaría frente a la reacción en el soporte debida a las cargas permanentes y una fracción de las sobrecargas (limitada a aquella que, al ascender el soporte, evitase daños en los niveles superiores). En ese momento un collarín metálico anclado al soporte con barras pasantes se unió por soldadura al entramado metálico, de manera que al retirar los gatos los perfiles descargaban el tramo del soporte a demoler. La demolición pudo así realizarse fácilmente sin que el soporte experimentase asiento significativo alguno (al contrario, tuvo una ligera recuperación, correspondiente a la fracción de sobrecarga considerada). La instrumentación mantuvo bajo control todo el proceso: desde la introducción de la carga prevista por los gatos, hasta la respuesta del entramado al eliminar el soporte. En las figuras 14 (fotografía derecha) y 15 se observa parte del instrumental dispuesto para registrar las flechas en los perfiles metálicos.

Los perfiles se dimensionaron para soportar condiciones de seguridad correctas las cargas del soporte a retirar, y con una rigidez tal que la fracción de sobrecarga no compensada diese lugar a un descenso en el soporte tolerable por la estructura y las partes no estructurales (tabiquería, acabados, ...).

Durante un tiempo se controló que las deformaciones en el entramado metálico permanecían estables.

## 5. CONCLUSIONES

Son muchos los aspectos a considerar en un refuerzo *activo* mediante perfiles metálicos bajo la estructura horizontal, como se detallan en [3]. A modo de resumen se exponen algunos de los que se deducen de los ejemplos mencionados en los apartados anteriores:

- a) Se trata de un procedimiento de refuerzo que no afecta en modo alguno al elemento reforzado y que por lo tanto es perfectamente reversible, por lo que no existe condicionante alguno a su aplicación en construcciones con algún tipo de protección histórico-artística, o cuando se trate de un refuerzo temporal. También es una forma sencilla y económica de reducir temporalmente la solicitación en una viga que requiera de tal reducción al ser reforzada por otros procedimientos, como por ejemplo mediante encolado de platabandas de acero o FRP, procediendo a la retirada del perfil una vez ejecutado el refuerzo.
- b) El procedimiento de control de las fuerzas introducidas al predeformar los perfiles mediante la auscultación de los propios perfiles, es totalmente fiable, permite el empleo de medios sencillos para la predeformación de los perfiles contra las vigas en los puntos de retacado (medios que, incluso, no den información sobre la fuerza introducida, como barras roscadas, acuñado, ...) y controlar la evolución en el tiempo de dicha fuerza.
- c) Cuanto mayor es el número de fuerzas que se introducen, mayor puede ser el error que se comete al valorar el valor de una de las fuerzas introducidas en función del error que se cometa al medir las flechas en uno de los puntos.

Se recomienda introducir una fuerza en centro de vano o, preferiblemente, dos fuerzas, entre cuartos y tercios de la luz (en general el óptimo se aproxima a situar los puntos de retacado del perfil a tercios de la luz).

- d) La predeformación de los perfiles permite absorber las cargas permanentes, e incluso parte de las sobrecargas. Con ello la limitación de las flechas en los perfiles únicamente se restringe al efecto de las sobrecargas en la mayoría de los casos, lo que permite una importante reducción en los calibres de los perfiles a emplear.
- e) Es posible la introducción gradual del refuerzo, por ejemplo, en los casos en los que se prevea disponer una carga permanente importante, que podría irse materializando en escalones de manera que en cada uno de ellos se introduzca un incremento en las fuerzas de refuerzo compatible con la seguridad frente a momentos de signo contrario a los debidos a las cargas gravitatorias, en función de la carga permanente presente en cada escalón.
- f) La seguridad del perfil frente a las cargas que recibe del elemento reforzado, tanto la introducida inicialmente por predeformación de aquel, como la final debida al resto de las cargas y el incremento debido a los márgenes de seguridad exigibles, y la limitación de flechas debida a la parte de cargas no presente al predeformar el perfil (en general las sobrecargas), limitan inferiormente el calibre de los perfiles.

La posibilidad de inversiones de momentos en los puntos de retacado al incrementarse las cargas, evolucionar las flechas por fluencia y otros efectos análogos, limitan superiormente dicha rigidez. En este sentido debe tenerse en cuenta que, como se detalla en [3], un incremento en el calibre de los perfiles proyectados no siempre queda del lado de la seguridad. Una posibilidad es descargar la estructura, o mantenerla apeada con la máxima carga posible hasta introducir la predeformación como se ha mostrado en uno de los ejemplos expuestos (debe evitarse en tales casos que la carga permanente pueda retirarse sin un control técnico).

- g) Los ejemplos expuestos corresponden a estructuras antiguas, en las que las deformaciones diferidas no son determinantes. Cuando esto no sea así, deben ser tenidas en cuenta pues pueden condicionar muchos aspectos del refuerzo. La incidencia del fuego es otro aspecto a valorar. Todo ello, junto con otros aspectos de proyecto y ejecución, se expone en detalle en [3].

## Referencias

El presente trabajo ha sido realizado a partir de los resultados de la tesis doctoral que se refiere a continuación como referencia [3], en la que se recoge abundante bibliografía sobre el tema. En la relación siguiente, se recogen algunas de las referencias más destacadas que han sido mencionadas en el texto de este artículo.

- [1] Calavera, J. (2002) *Cálculo, Construcción, Patología y Rehabilitación de Forjados de Edificación*. 5ª Edición. Madrid: Ed. Intemac.
- [2] Brufau, R. (2010) *Rehabilitar con Acero*. APTA (Asociación para la Promoción Técnica del Acero).

- [3] Rodríguez, R.R. Refuerzo de vigas de hormigón armado mediante la aplicación de fuerzas exteriores introducidas por predeformación de perfiles metálicos. Tesis Doctoral realizada bajo la dirección de los Dres. Ingenieros de Caminos D. Enrique González Valle y D. Jorge Ley Urzaiz, y presentada en la E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad Politécnica de Madrid.
- [4] Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja (2011) Sistema de Reparación de Forjados de Viguetas. D.I.T. N°. 217R/11. Madrid: IETcc.
- [5] Calavera, J. (2008) *Proyecto y Cálculo de Estructuras de Hormigón*. 2ª edición. Madrid: Ediciones Intemac.
- [6] Ministerio de Fomento (2008) Instrucción de Hormigón Estructural EHE-08. España: Ministerio de Fomento. Secretaría General Técnica.
- [7] CEN (2004) EN 1992-1-1:2004. Eurocode EC-2: Design of Concrete Structures - Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings. Bruselas: European Committee for Standardization.
- [8] CEB. (1983) Assessment of Concrete Structures and Design Procedures for Upgrading (Redesign). Bulletin d'Information n° 162. Lausanne: Comité Euro-International du Béton.
- [9] Fernández Cánovas, M. (1994) *Patología y Terapéutica del Hormigón Armado*. 3ª edición. Madrid: "Colección Escuelas". Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Servicio de Publicaciones.
- [10] González Valle, E. (2003) *Refuerzos con Pretensado y Refuerzos Varios*. Pamplona: Curso de Intemac.
- [11] CEB. (1991) Reliability of Concrete Structures. *Bulletin d'Information* N° 202. Lausanne: Comité Euro-International du Béton.
- [12] FIB (2010) Model Code for Concrete Structures. 2010, Ernst & Sohn.
- [13] CEB. (1984) *Design Manual on Structural Effects of Time-Dependent Behaviour of Concrete*. Saint-Saphorin (Switzerland): Georgi Publishing Company.
- [14] FIP. (1990) Reparación y Refuerzo de Estructuras de Hormigón. *Guía FIP de buena práctica*. Traducción al español de GEHO-ATEP.
- [15] Lee, S.H., Lee, H.D., Shin, K.J. & Kang, H.K. (2014) Shear strengthening of continuous concrete beams using externally prestressed steel bars. *PCI Journal*, Vol. 59. ISSN 0887-9672.
- [16] Barchas, K.J. (1991) Repair and Retrofit using external post-tensioning. Aberdeen: Aberdeen's Concrete Repair.
- [17] Rodríguez Santiago, J., Conde-Salazar, J.M. (1988) Estudio experimental de la puesta en carga de una estructura y el corte del pilar de un edificio de ocho plantas. *Hormigón y Acero*. 39(169): 81-91.
- [18] Serrano, A. et al (2014) Sistemas activos de transferencia de carga para la eliminación de soportes o muros en obras de rehabilitación. Madrid: *VI Congreso Internacional de Estructuras de la Asociación Científico-Técnica del Hormigón Estructural (ACHE)*.