

Refuerzos estructurales frente a cortante y punzonamiento en forjados bidireccionales de hormigón armado de edificios destinados a uso residencial

Punching and shear strengthening in two-way reinforced concrete floors of residential buildings

David Fernández Montes^a, Francisco González Ramos^b, Salvador Domínguez Gil^c,
Rubén Sánchez Pascual^d, Pablo Anaya Gil^e, y Miguel Jordá Arbona^f

^a Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad Politécnica de Madrid (UPM). Profesor de la ETSI Caminos, Canales y Puertos (UPM). Director Técnico de BETAZUL, S.A. david.fernandez.montes@upm.es

^b Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad Politécnica de Madrid (UPM). Profesor de la ETSI Caminos, Canales y Puertos (UPM). Director de BETAZUL, S.A. francisco@betazul.es

^c Arquitecto de la Universidad Politécnica de Madrid (UPM). Bids & Proposals Manager de SOCOTEC Spain. salvador.dominguez@socotec.com

^d Arquitecto Técnico de la Universidad Politécnica de Madrid (UPM). Jefe de Obra de BETAZUL, S.A. ruben@betazul.es

^e Doctor Arquitecto de la Universidad Politécnica de Madrid (UPM). Jefe de Equipo de SOCOTEC Spain. pablo.anaya@socotec.com

^f Arquitecto de la Universidad Politécnica de Valencia (UPV). SOCOTEC Spain. miguel.jorda@socotec.com

RESUMEN

Los edificios de un complejo residencial fueron objeto de una evaluación estructural que establecía la necesidad de refuerzo generalizado por deficiencias originadas en las etapas de proyecto y ejecución. Se decidió contribuir positivamente a la sostenibilidad, eludiendo el impacto económico y temporal vinculado a la demolición y reconstrucción. Las distintas condiciones de contorno implicaron la ejecución de numerosos refuerzos estructurales frente a esfuerzo cortante y punzonamiento en los forjados, todos ellos necesarios para evitar fallos de tipo frágil. Para acometer dichos refuerzos, se plantean y ejecutan diferentes tipos de soluciones vinculadas con condiciones técnicas, económicas y prestacionales.

ABSTRACT

The structural evaluation of a residential complex revealed the need for widespread structural strengthening due to deficiencies during the design and construction phases. To promote sustainability and avoid the economic and temporal impact associated with demolition and reconstruction, structural retrofitting activities were carried out. A great amount of punching and shear strengthening in two-way floors were needed on account of different initial conditions. The goal was to prevent brittle failures and enhance the overall safety of the buildings. In order to carry out these reinforcements, different types of solutions linked to technical, economic and performance conditions are proposed and implemented.

PALABRAS CLAVE: Reparación, refuerzo de estructuras

KEYWORDS: Retrofitting.

1. Introducción

Las actuaciones de mantenimiento, rehabilitación y refuerzo de estructuras son actividades cada vez más relevantes, bien por la degradación de las propias estructuras existentes, bien por la introducción de nuevas solicitudes en las mismas, o incluso por actuaciones necesarias frente a situaciones accidentales que se han producido o sido motivadas por deficiencias de proyecto o ejecución.

Específicamente, los edificios de un complejo de uso residencial de reciente construcción fueron objeto de una evaluación estructural que establecía la necesidad de refuerzo generalizado por fallos originados en las etapas de proyecto y ejecución. Dado que las condiciones de seguridad y el estado de la estructura existente lo permitieron y no estaba previsto un cambio de uso, se decidió contribuir positivamente a la sostenibilidad mediante actuaciones de rehabilitación. Se buscó eludir el impacto económico y temporal vinculado a la demolición y reconstrucción mientras se reducía el impacto ambiental y los residuos de la misma. Así, se decidió ejecutar refuerzos en cimentación, pilares y forjados.

La presente comunicación se centra en los refuerzos estructurales llevados a cabo frente a esfuerzo cortante y punzonamiento en los forjados.

2. Descripción del caso particular

El complejo residencial ocupa un solar de 14000 m² (aproximadamente 140 m x 100 m) en una ciudad de la Comunidad de Madrid (ver figura 1). Consta de cuatro edificios de cinco plantas, denominados A (portales 7 y 8), B (portales 1 y 2), C (portales 3 y 4) y D (portales 6 y 5) en la figura 2, y planta rectangular de 25 m de ancho y 75 m de largo sobre rasante.



Figura 1. Situación del complejo residencial (imagen extraída de Google Earth)

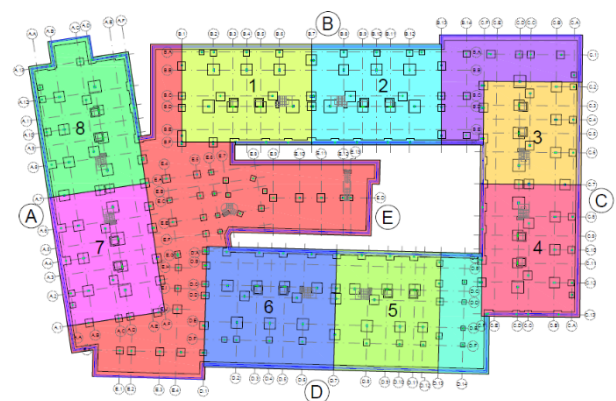


Figura 2. Planta bajo rasante del complejo residencial.

Cada edificio presenta dos alas simétricas (el edificio A presenta las alas 7 y 8, el edificio B presenta las alas 1 y 2, el edificio C presenta las alas 3 y 4, y el edificio D presenta las alas 6 y 5), divididas por junta estructural sin duplicación de soportes, siendo la disposición de estos sensiblemente irregular, con apeos de varias alineaciones de pilares en fachada (ver un alzado en la figura 3 y una planta tipo en la figura 4). La planta bajo rasante del complejo es irregular con muros perimetrales de contención de tierras y envuelve las plantas de los cuatro edificios

aislados sobre rasante. La cimentación del edificio es superficial mediante zapatas aisladas.

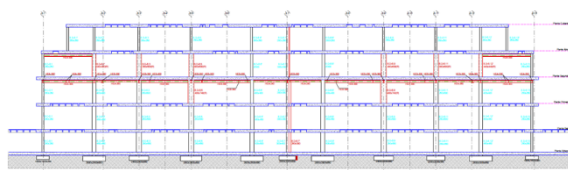


Figura 3. Alzado de uno de los edificios sobre rasante.

La estructura del complejo es de hormigón armado.

Los forjados están constituidos por losas macizas que apoyan en vigas de canto y de forjados bidireccionales de casetón perdido de canto total 30+5 cm, nervios de espesor mínimo de 12 cm e intereje igual a 80 cm.

En fase de ejecución, tras observar fisuras en la cara inferior de los forjados de losa maciza, así como en los nervios y bovedillas de hormigón de los forjados reticulares, se redactó un informe técnico sobre el estado de la estructura, previo a su puesta en servicio, a partir de un plan de actuación consistente básicamente en:

- Inspección ocular de los edificios, orientada a identificar los daños existentes.
- Estudio de calidad de los hormigones, mediante la extracción y posterior rotura a compresión de probetas testigo de hormigón endurecido procedentes de los pilares de la obra.
- Revisión de las condiciones de ejecución de la estructura mediante la

apertura e inspección de unas calas de investigación.

- Evaluación de las condiciones de seguridad estructural mediante comprobaciones de cálculo a partir de los resultados de las actividades anteriores.

En dicho informe se concluyó que, si bien dichas fisuras no tenían trascendencia estructural (fueron producidas por un inadecuado proceso de ejecución, con varias plantas cimbradas, incompatible con las cargas consideradas en proyecto), algunas comprobaciones de seguridad no arrojaban resultados técnicamente admisibles en pilares, forjados de losa maciza y forjados reticulares, obteniéndose además estimaciones de flecha activa superiores a 1 cm en los forjados. Adicionalmente, los elementos estructurales inspeccionados mostraban recubrimientos muy desiguales, al haber sido desplazada la armadura durante el hormigonado, con una pérdida considerable de su efectividad en la capacidad resistente.

En consecuencia, tras detectar las deficiencias que existían tanto en el proyecto como en la fase de ejecución fueron recomendados una serie de refuerzos en los forjados y pilares indicando su procedimiento de ejecución, y consideraciones constructivas para evitar daños en tabiquería u otros elementos que pudieran ser causados por las anomalías detectadas.

Específicamente, se propusieron:

- Reparaciones cosméticas para resolver los distintos daños identificados durante la inspección.
- Un refuerzo estructural generalizado mediante recrecido en más de un 25% de los pilares.
- Recalces en más del 60% de las zapatas.
- Refuerzos en un 20% de la superficie de forjado frente a momento flector con el sistema Sika® Carbodur® E 812, a base de laminado de fibra de

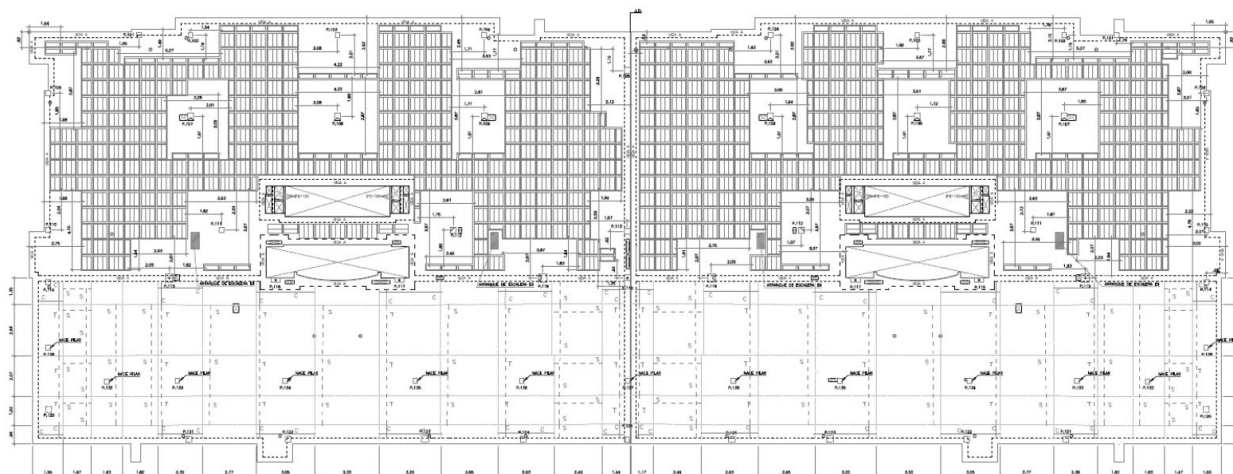


Figura 4. Planta tipo sobre rasante de uno de los edificios.

carbono pultrusionados (CFRP), pegado al soporte con Sikadur®-30, para conformar una armadura externa.

- Refuerzos frente a punzonamiento tanto en losas macizas como en reticulares en más de un 50% de los casos y que implicaba actuar en más de 1000 m² de forjado.
- Refuerzos en un 10 % de los nervios y en todos los forjados sobre los que se disponían pilares apeados para hacer frente al esfuerzo cortante, lo que implicó más de 600 m de refuerzo.

La demolición parcial o completa fue valorada frente a las actividades de rehabilitación propuestas, pero dado que estas últimas procuraban una eficiencia energética y una adecuada versatilidad para cada condición de contorno particular de refuerzo y capacidad para cumplir las normativas actuales en términos de seguridad estructural [1] [2] y en términos de utilización y accesibilidad, se decidió llevarlas a cabo.

3. Justificación de la solución prevista frente a cortante y punzonamiento

El refuerzo de estructuras de hormigón armado tiene una larga trayectoria y un amplio campo de aplicación. Motivos como el cambio de uso de construcciones existentes, modificaciones en los parámetros de diseño en los códigos estructurales, aparición de posibles anomalías, estimación incorrecta de valores de efecto de acciones, una obtención errada de magnitudes de la respuesta estructural o deficiencias de concepción o ejecución y su control (como presumiblemente sucedió en el caso que nos ocupa) han hecho aumentar considerablemente el número de estructuras a reforzar.

Por otro lado, la rotura por cortante o punzonamiento de un elemento de hormigón es una rotura frágil que, en caso de producirse, impide la creación de roturas plásticas y la rotura dúctil del elemento tras la plastificación de la armadura a flexión [3]. Actualmente existen varias técnicas para aumentar la resistencia a cortante y punzonamiento de las estructuras de hormigón armado, tales como el encamisado o recrecido de hormigón armado, el incremento de la armadura, el ensamblaje de perfiles o placas metálicas, el postesado con tendones de acero y

la adherencia de materiales compuestos con resinas orgánicas (fibre-reinforced polymer – FRP), que ofrecen resultados adecuados respecto al incremento de la capacidad portante de las estructuras [4] [5]. Clásicamente, estos refuerzos se basan en aportar armadura adicional, en recrear el alma de las vigas o en introducir un pretensado complementario.

Todas ellas presentan sus ventajas e inconvenientes, pero la evolución histórica de las estrategias de refuerzo tiende a priorizar la rapidez y facilidad de ejecución, la versatilidad y la mínima afectación de la estructura existente [6].

Todos estos tipos de refuerzo se basan, además, en considerar que la contribución a la resistencia a cortante del hormigón era debida fundamentalmente al “aggregate interlock” o engranamiento entre las caras de fisuras en el alma de la viga. En otras palabras, se sigue con la mentalidad clásica de que la flexión en un elemento lineal es resistida por las alas (cosa cierta) y el cortante lo resisten las almas (aspecto éste que no es totalmente cierto en hormigón armado). Sin embargo, actualmente hay una importante corriente de investigación [7] [8] que ha demostrado que en estado límite último, la aportación de la cabeza comprimida es esencial, pues el ancho de fisuras en el alma es demasiado grande para transmitir un cortante importante por engranamiento de áridos. Por tanto, si eso es así, todo lo que signifique un aumento de la cabeza comprimida puede incrementar la resistencia frente a tensiones tangenciales. Una forma de aumentar la contribución de la cabeza comprimida es aumentar la profundidad de la fibra neutra, la cual depende de la cuantía de armadura longitudinal. Otra consistiría en introducir un pretensado longitudinal que, al comprimir la viga aumenta también dicha profundidad de la fibra neutra.

El refuerzo disponiendo pretensado tiene un efecto muy positivo, pues introduce una tensión de compresión que disminuye la tensión principal de tracción, bajo las cargas exteriores y

el pretensado introducido. Ello permite aumentar la capacidad sin que se produzca fisuración bajo el estado multiaxial de tensiones que se genera. No obstante, es complicado de ejecutar, pues se necesitan taladros pasantes y anclajes mecánicos de las barras de pretensado, aparte del uso de gatos hidráulicos y otros elementos asociados a las operaciones de tesado.

Por otro lado, la disposición de piezas metálicas, aumentando la cuantía de armadura longitudinal, requería asegurar que no se producía delaminación de la chapa, la cual debía quedar bien adherida con suficiente longitud de anclaje o anclada mecánicamente en sus extremos [9] por lo que fue descartada por su elevado coste económico.

La disposición de laminados de fibra de carbono no era suficiente en un forjado existente para mejorar la capacidad frente a la aparición de tensiones tangenciales (resultaba además imposible disponer lateralmente el material).

Las soluciones de refuerzo elegidas se adaptan a cada situación o ámbito del edificio, adoptándose cuatro estrategias específicas: implementación de estructura metálica con puesta en carga mediante gátese, implementación de recercados sobre ábaco (refuerzo tipo 1), implementación de vigas de hormigón armado enhebradas en losa existente (refuerzo tipo 2) e implementación de muro estructural de fábrica de ladrillo.

Además, los refuerzos planteados contemplaban la disposición de armadura longitudinal adicional traccionada y correctamente anclada, así como el aumento del canto total, lo que favorecía la contribución de la cabeza comprimida a la capacidad de dichos forjados frente a tensiones tangenciales. En el caso del refuerzo a cortante, la aportación de armadura transversal adicional en los forjados se hizo realizando taladros e introduciendo armaduras que se adherían mediante resina epoxi y se anclaban en la cara superior mediante sistemas mecánicos. Este tipo de refuerzo es muy eficiente estructuralmente porque la

armadura transversal es una contribución directa a la resistencia. Es importante subrayar que los métodos de diseño de cortante actuales son aplicables a elementos de hormigón armado con estribos convencionales y, en consecuencia, conservadoramente penalizamos la capacidad de corte de los elementos transversales con barras adheridas con epoxi [10].

4. Descripción del procedimiento de ejecución del refuerzo

4.1 Procedimiento de ejecución del refuerzo tipo 1

El refuerzo tipo 1 es un refuerzo a punzonamiento, mediante recrido de hormigón armado HA-30 de 60 mm de espesor, con armadura de rasante con retícula de conectores de 10 mm, y armadura de negativos con retícula de dos barras (Ver figura 5). Las fases del procedimiento constructivo fueron:

- Fase 1: Replanteo del refuerzo.
- Fase 2: Limpieza de la superficie afectada por el refuerzo por medios manuales y mecánicos ligeros.
- Fase 3: Se realizaron rozas en una sola dirección, sobre el recubrimiento de hormigón del forjado, para alojar la armadura de piel sin incrementar en exceso el espesor de hormigón (ver figura 6).
- Fase 4: Suministro, elaboración y montaje de retícula de acero corrugado B500S, conformado con conjuntos de 2 barras de 16 mm de diámetro con una separación máxima de 300 entre ellas.
- Fase 5: Formación de conectores con barras de acero B500S ancladas en hormigón endurecido, con una cuantía de un conector cada 500 mm en ambas direcciones. Las barras de los anclajes serán redondos de 10 mm de diámetro, con una profundidad de anclaje de 200 mm, realizadas con Sika Anchor Fix 3030, con una garrota de 150 mm (ver figura 7).

- Fase 6: Encofrado perimetral.

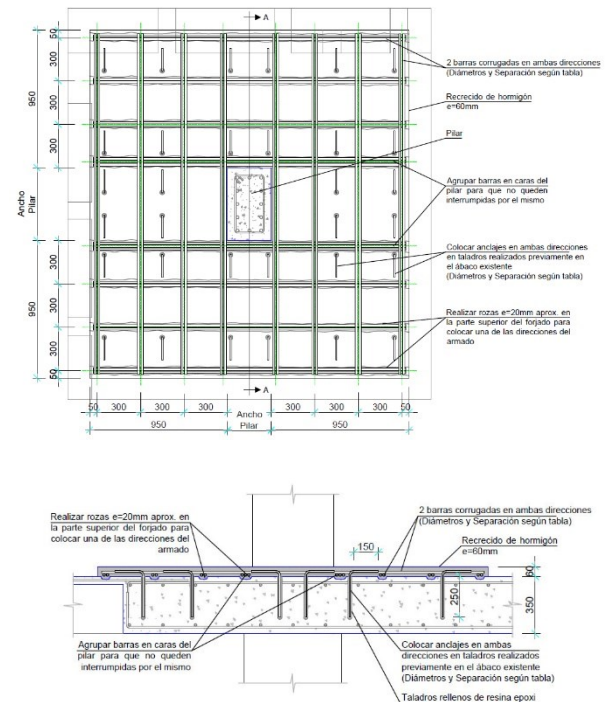


Figura 5. Refuerzo a punzonamiento mediante recrido.



Figura 6. Fases 1 y 3 del procedimiento de refuerzo frente a punzonamiento.



Figura 7. Fases 4 y 5 del procedimiento de refuerzo frente a punzonamiento.

- Fase 7: Puente de adherencia con Sikadur 32 Fix (ver figura 8).
- Fase 8: Suministro, puesta en obra y compactación de hormigón HA-30 de 60 mm de espesor.
- Fase 9: Desencofrado del perímetro (ver figura 9).



Figura 8. Fases 6 y 7 del procedimiento de refuerzo frente a punzonamiento.



Figura 9. Estado final de refuerzo frente a punzonamiento.

4.2 Procedimiento de ejecución del refuerzo tipo 2

El refuerzo tipo 2 es un refuerzo a cortante, mediante viga de hormigón armado HA-30 enhebrada sobre losa existente de hormigón armado, y 100 mm de reecido (Ver Figura 10). Las fases del procedimiento constructivo fueron:

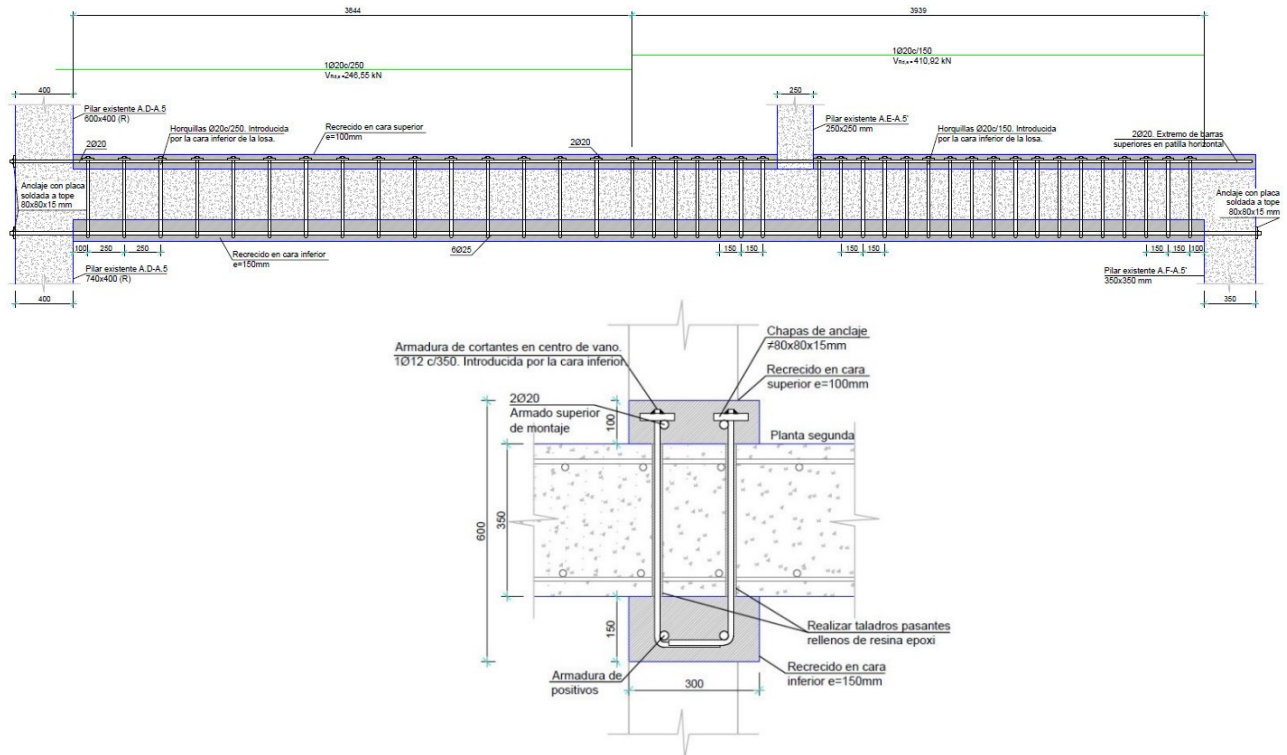


Figura 10. Refuerzo a cortante mediante viga de hormigón armado.

- Fase 1: Replanteo del refuerzo.
- Fase 2: Limpieza de la superficie afectada por el refuerzo por medios manuales y mecánicos ligeros.
- Fase 3: Formación de armadura de cortante con dos barras verticales de acero B 500S con forma de "L", con separación entre 150 y 350 mm, según planos. La armadura de cortante se hará pasar a través del canto de la losa existente, de 350 mm de espesor, mediante anclaje de la barra en el hormigón endurecido, con Sika Anchor Fix 3030 (ver figura 11).
- Fase 4: Formación de armadura superior de momento flector negativo con dos barras de acero corrugado B 500S, de 20 mm de diámetro.
- Fase 5: Anclaje pasante de la armadura longitudinal superior a través de los pilares existentes, con un mínimo de dos barras de 20 mm, en alineación de pilares (ver figura 12).



Figura 11. Fases 1 y 3 del procedimiento de refuerzo frente a cortante.

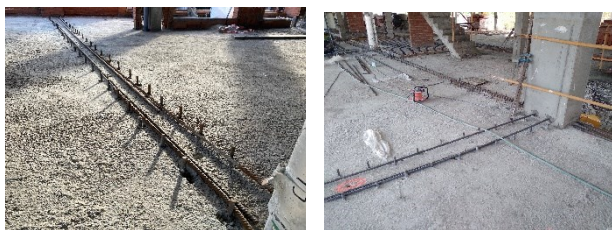


Figura 12. Fases 4 y 5 del procedimiento de refuerzo frente a cortante.

- Fase 6: La armadura de cortante se anclará en la parte superior con chapa de acero de 80x80x15 con soldadura en botón (ver figura 13).
- Fase 7: Formación de armadura inferior de momento flector positivo con 3, 4 ó 6 barras de acero corrugado B 500S, de 20 mm o 25 mm de diámetro.



Figura 13. Fase 6 del procedimiento de refuerzo frente a cortante.

- Fase 8: Anclaje pasante de la armadura longitudinal inferior a través de los pilares existentes, con 3, 4 o 6 barras, en alineación de pilares existentes (ver figura 14).
- Fase 9: Formación de cuña inferior de mortero técnico SikaRep®-2400, con puente de adherencia de Sika Monotop®-910 S, para favorecer la evacuación de aire y el contacto entre el hormigón fresco y a la cara inferior del techo donde contacta (ver figura 15).

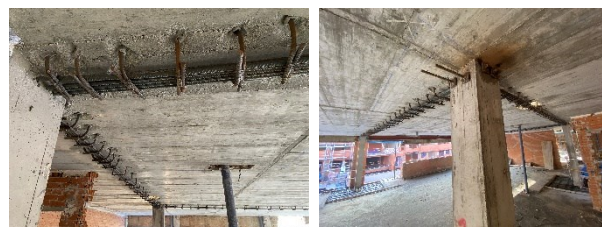


Figura 14. Fases 7 y 8 del procedimiento de refuerzo frente a cortante.

- Fase 10: Formación de encofrado superior (ver figura 16).
- Fase 11: Formación de encofrado inferior con sistema de cimbra (ver figura 17).
- Fase 12: Suministro y puesta en obra de hormigón HA-30.
- Fase 13: Desencofrado (ver figura 18).



Figura 15. Fase 9 del procedimiento de refuerzo frente a cortante.



Figura 16. Fase 10 del procedimiento de refuerzo frente a cortante.



Figura 17. Fase 11 del procedimiento de refuerzo frente a cortante.

5. Conclusiones

Se ha presentado un caso real de refuerzo de forjados frente a esfuerzos de cortante y punzonamiento, como parte de un proyecto de rehabilitación integral.

Las principales ventajas del sistema presentado, según se pudo observar con el éxito de la realización, son: versatilidad y capacidad de adaptación a las distintas condiciones de contorno, con una optimización de costes y plazo y elevado nivel de control de calidad del proceso.

El sistema puede servir de base conceptual a operaciones similares o, en general, a cualquier refuerzo frente a cortante y punzonamiento en los que, dada su cantidad y condiciones variables de contorno, sea necesario optimizar el coste, incluso frente a operaciones de demolición.



Figura 18. Estado final del refuerzo frente a cortante.

Agradecimientos

Los autores quieren agradecer la posibilidad de realizar los trabajos y de comentar el presente estudio, al Grupo Ferrocarril y a su

Dirección Técnica. Adicionalmente, los autores desean agradecer especialmente su contribución a la constructora encargada de los trabajos, Betazul S.A. y a la ingeniería Socotec.

Referencias

- [1] Ministerio de transportes, movilidad y agenda urbana. Código Estructural. Madrid, 2021.
- [2] CEN, EN 1992-1-1:2004, Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings, European Committee for Standardization, 2004.
- [3] Cladera, A, Montoya-Coronado, L, Ruiz-Pinilla, J, & Ribas, C (2022). Refuerzo externo a cortante en vigas de hormigón mediante aleaciones con memoria de forma en base hierro: de la prueba de concepto a la escala real. *Hormigón y Acero*.73 (296), 7-15. <https://doi.org/10.33586/hya.2020.2685>.
- [4] Serna, P, Arango, S, Ribeiro, T, Núñez, A, Garcia-Taengua, E, Structural cast-in-place SFRC: technology, control criteria and recent applications in Spain, *Materials and structures*, vol. 42, no. 9, pp. 1233-1246 (2009), <https://doi.org/10.1617/s11527-009-9540-9>.
- [5] Cuenca, E, Echegaray-Oviedo, J, Serna, P, Influence of concrete matrix and type of fiber on the shear behavior of self-compacting fiber reinforced concrete beams, *Composites Part B: Engineering*, vol. 75, pp. 135-147 (2015), <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.01.037>.
- [6] Escrig, C, Refuerzo a cortante de vigas de hormigón armado mediante TRM, *OmniaScience* (2014), 107-136. <http://dx.doi.org/10.3926/oms.210>.
- [7] Muttoni, A., & Fernández-Ruiz, M. (2024), De la evidencia experimental al modelo mecánico y ecuaciones de diseño: La CSCT para el diseño a cortante. *Hormigón y Acero*, 75(302-303), 25-40. <https://doi.org/10.33586/hya.2024.3139>.
- [8] Dönmez, A., & Bažant, Z. (2024), Crítica de la CSCT para los artículos del Código Modelo sobre la resistencia a cortante y su efecto de escala en vigas de hormigón armado. *Hormigón Y Acero*, 75(302-303), 41-53. <https://doi.org/10.33586/hya.2024.3138>.
- [9] Arriaga, M, Refuerzo a cortante mediante la disposición de armadura longitudinal a flexión en vigas de hormigón armado, *UPC commons* (2019). <http://hdl.handle.net/2117/170764>.
- [10] Fiset M, Bastien J, Mitchell D, Shear design of RC members strengthened with steel reinforcing bars embedded through section. *Engineering Structures*, 285 <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.116050>.