

Demolición y reconstrucción del tablero del paso superior sobre la M-300 en el P.K. 28+900 en Alcalá de Henares

Demolition and reconstruction of the deck of the overpass over the M-300 at chainage 28+900 in Alcalá de Henares.

Alberto Martín Galán^a, Javier León González^b, Julio Sánchez Delgado^c, M. Belén Peña Sanz^d, M. Yolanda Alcaraz Nuño^e, Eugenio Rey Conde Fernández^f

^a Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. FHECOR Ingenieros Consultores. Co-Director Técnico. ilg@fhcor.es

^b Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. FHECOR Ingenieros Consultores. Co-Director Técnico. jsd@fhcor.es

^c Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. FHECOR Ingenieros Consultores. Director de Departamento. amg@fhcor.es

^d Ingeniera de Caminos. Comunidad de Madrid. Subdirectora de Concesiones y Explotación. belen.pena@madrid.org

^e Ingeniera de Caminos, Canales y Puertos. Comunidad de Madrid. Jefa del Área de Explotación. yolanda.alcaraz@madrid.org

^f Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Construcciones Díez y Compañía. Jefe de Obra. estudios@diezycia.es

RESUMEN

La estructura del P.K. 28+900 de la M-300, en Alcalá de Henares, consiste en un puente de 4 vanos hiperestáticos de 29.00+37.50+37.50+29.00 m de luz, construido en 1990 mediante una viga artesa de 1.45 m de canto y losa superior de canto variable entre 0.20 y 0.35 m, cuyo deterioro más grave consistía en un fallo por rasante en la unión de las almas de la viga con la losa inferior en los vanos centrales. Esto provocó una pérdida de capacidad resistente y de rigidez que se reflejaba en fuertes deformaciones en el tablero, desconchones en la interfaz alma-losa y un nivel de seguridad muy precario, lo que llevó a la Comunidad de Madrid al corte del tráfico superior e inferior y a la reconstrucción del tablero por la vía de emergencia.

ABSTRACT

The structure at P.K. 28+900 of the M-300, in Alcalá de Henares, consists of a bridge with 4 hyperstatic spans of 29.00+37.50+37.50+29.00 m span built in 1990 with a 1.45 m deep box girder and upper slab of variable depth between 0.20 and 0.35 m, whose most serious damage consisted of a failure of shear at the junction of the webs of the girder with the bottom slab in the central spans. This caused a loss of strength and stiffness that was reflected in strong deformations in the deck, spalling at the web-slab interface and a very precarious level of safety, which led the Community of Madrid to cut off the upper and lower traffic and rebuild the deck by emergency works.

PALABRAS CLAVE: puente, demolición, reconstrucción, viga, pretensado, junta fría, hilo de diamante.

KEYWORDS: bridge, demolition, reconstruction, beam, prestressing, cold joint, diamond wire

1. Introducción

Los deterioros observados en el paso superior situado en Alcalá de Henares a la altura del PK

28+900 de la carretera M-300, cuya titularidad corresponde a la Comunidad de Madrid, llevaron

a solicitar la participación de FHECOR para realizar una evaluación del nivel de seguridad estructural del puente, concluyendo que los deterioros observados eran compatibles con un grave fallo por rasante en la unión de las almas de las vigas artesas con la losa inferior en los vanos centrales –dentro de las mismas piezas prefabricadas–. Esto se puso de manifiesto en la campaña previa de inspección, realización de calicatas, extracción de testigos y pruebas complementarias, concluyéndose, tras el análisis, que no se cumplía con el nivel de seguridad reglamentario.

Esta circunstancia llevó a la Comunidad de Madrid a cortar el tráfico rodado en las calzadas superior e inferior y a proceder, consiguientemente, a decretar las obras de emergencia para evitar que la progresión de los deterioros pudiera desembocar en una situación de grave peligro para los usuarios por rotura frágil (sin previo aviso) de la conexión entre la losa inferior y el tablero.

Para acometer las medidas derivadas de las obras de emergencia, FHECOR redactó el documento de definición de actuaciones en el que se incluyeron las intervenciones que era necesario acometer para proceder con la retirada del tablero, el refuerzo de los dinteles de las pilas y la construcción de un nuevo tablero.

La empresa encargada de la ejecución de los trabajos fue DíEZ Y CÍA, mientras que FHECOR fue la responsable de preparar el documento de definición de actuaciones (al tratarse de una obra de emergencia no existió la figura de proyecto) y de los trabajos de Dirección de Obra.

Las obras de emergencia comenzaron en mayo de 2021 y terminaron en enero de 2022, reabriéndose al tráfico rodado superior el 1 de febrero de 2022.

2. Descripción de la estructura existente

El paso superior consta de cuatro vanos de 29.00+37.50+37.50+29.00 m de luz, que sopor-

tan una plataforma de 11.30 m de ancho con una calzada formada por 2 carriles de 3.50 m y sendos arcenes laterales de 1.50 m, con dos pretiles metálicos sobre pedestales de 0.65 m de ancho.



Figura 1. Vista de la plataforma superior existente

El tablero, que es del tipo artesa prefabricada con continuidad, está formado por una viga de 1.45 m de canto de hormigón pretensado. Dicha artesa soporta una losa de hormigón armado, ejecutada sobre prelasas colaborantes, con canto variable desde los bordes (0.20 m) hacia el centro (0.35 m). El objetivo fue el de configurar, una vez endurecido el hormigón dispuesto sobre las prelasas, una sección cajón monocelular.

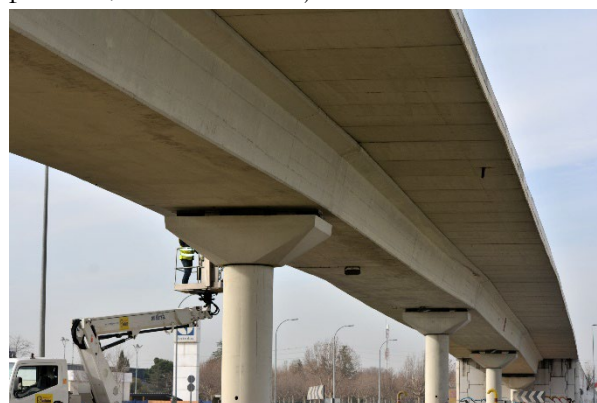


Figura 2. Vista inferior del paso superior existente

Una característica importante era que las vigas eran rectas en alzado, sin canto variable, de modo que el acuerdo convexo de la vía se materializaba mediante la losa superior, lo que daba un canto adicional a la losa en centro de vano de unos 12 cm que suponían un importante incremento de cargas permanentes, aspecto que no se tuvo en cuenta en su día en la fase de diseño.



Figura 3. Alzado general derecho de la estructura existente

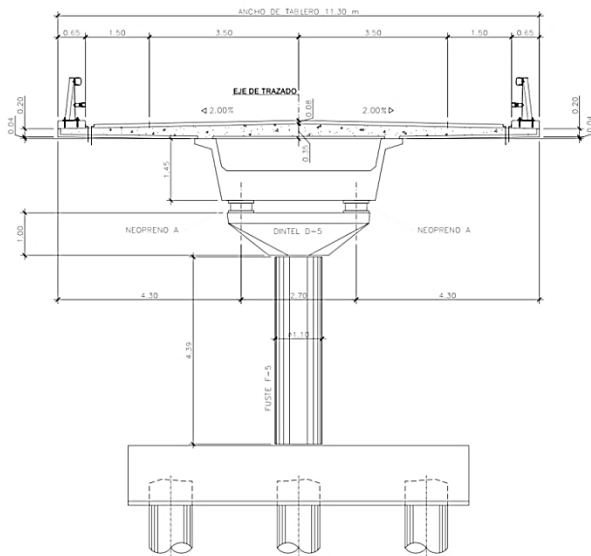


Figura 4. Sección transversal tipo del paso superior existente

Si bien la conexión entre aristas se materializa con barras de pretensar, lo que posibilita la transmisión de la reacción a los apoyos de neopreno dispuestos sobre el dintel de las pilas, la continuidad mecánica de los vanos para que funcione como viga continua se realiza gracias a la armadura pasiva dispuesta en las secciones próximas a las pilas. Tales armaduras se encuentran embebidas en el hormigón de la losa superior, sobre las prelasas.

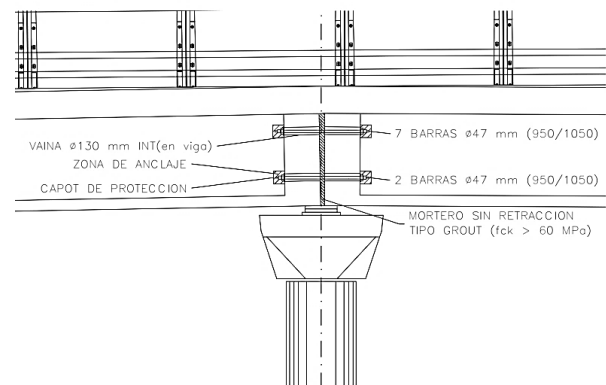


Figura 5. Barras pretensadas de conexión entre vigas de diferentes vanos

Esta configuración estructural hace que las secciones de centro de vano funcionen como elementos de hormigón pretensado, comportándose las secciones de apoyos como elementos de hormigón armado cuya rigidez se ve afectada por la fisuración.

3. Descripción y diagnóstico de daños

En las inspecciones realizadas se pudo apreciar que los dos vanos centrales, de mayor luz, tenían flechas muy apreciables, siendo mayor la del vano 3. Además, en el lado izquierdo de la

calzada se observaba una deformación más acusada por ser el carril de vehículos pesados.

En los dos tramos centrales, particularmente en el tercero, se produjeron desprendimientos del recubrimiento, rotura del hormigón de la losa inferior, fisuras de cortante manifiestas en las almas y, además, fisuras en los dinteles de coronación de las pilas, con una clara junta fría de hormigonado de la cara superior de la losa inferior con relación al hormigón de las almas, con una “nata” de mortero superior.

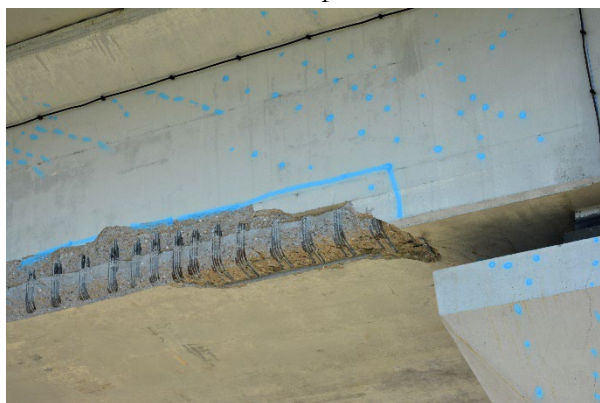


Figura 6. Pérdida del recubrimiento de hormigón en el vano 3 junto a la pila 2

Se produjo también un deslizamiento relativo en esta junta fría, con pérdida del recubrimiento. Las armaduras, que presentaban solapes en esa zona, tenían más oxidación superficial en la zona de la losa inferior que en el alma, lo que denotaba que la “nata” de mortero era de peor capacidad protectora porque era más porosa.

La sobre-solicitación de la armadura transversal producida por el deslizamiento explicaba que se abriera la junta y que el acero de las patillas tendiera a enderezarse, empujando al hormigón del recubrimiento hacia afuera. Además, se advierte también la tendencia al hendimiento (en sentido longitudinal) que se ha producido tanto en el hormigón (parte superior) como en el mortero (parte inferior), debido a la movilización del efecto pasador de la armadura transversal.

La justificación de la formación de la junta fría hay que buscarla en una aparente segregación de los áridos, probablemente debida a un exceso de plastificante en el hormigón para conseguir una reducida relación agua/cemento.

Mecánicamente, la junta fría implica una reducción muy importante de la rigidez de la viga al perderse el monolitismo, lo que se traduce en una drástica reducción de capacidad a flexión y cortante. Así como a un incremento de las deformaciones.

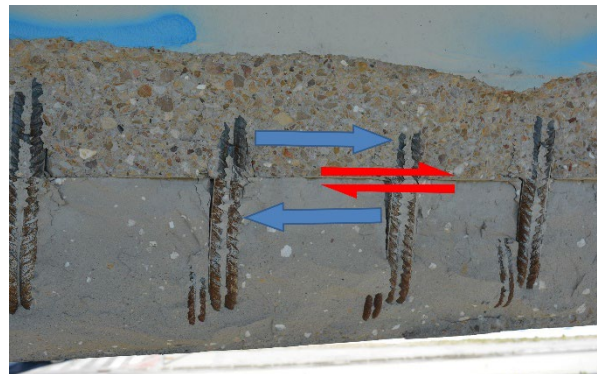


Figura 7. Deslizamiento relativo entre losa inferior (abajo) y alma de la artesa (arriba)

Par conocer el alcance de estos daños se extrajo una serie de testigos en la interfaz de contacto entre losa inferior y alma de viga, confirmando la presencia de la junta fría en la totalidad del ancho del alma, produciéndose la separación entre ambas partes del testigo sin esfuerzo alguno.



Figura 8. Testigos en la interfaz de la junta fría del vano 3

Además, se realizó una prueba de carga dinámica cuyos resultados mostraron claramente que el tablero estaba respondiendo con una inercia que era del orden de la mitad de la que correspondería a una viga sana verdaderamente monolítica.

Finalmente se realizó una comprobación estructural del tablero que determinó que las juntas frías tenían una capacidad a rasante manifies-

tamente insuficiente en los extremos de las vigas con relación al ELU normativo, e incluso era excesivamente baja para la combinación cuasi-permanente. Esta insuficiencia resistente también se producía para las comprobaciones de ELU a flexión y cortante.

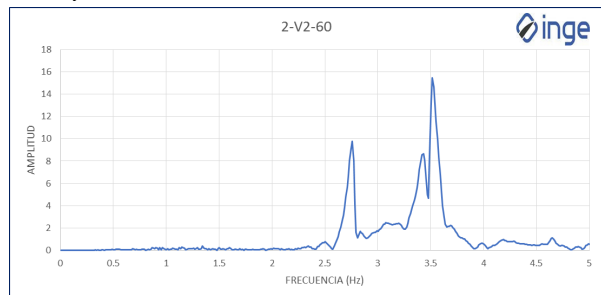


Figura 9. Registros de frecuencias propias obtenidas en la prueba de carga

Así, la estructura no cumplía con los requisitos de seguridad estructural exigidos por la reglamentación vigente, presentando un nivel de seguridad precario, incluso bajo cargas permanentes, frente a la rotura de la conexión a rasante en las uniones losa-alma. Tal colapso, que se hubiera producido de manera frágil, sin previo aviso más allá de la deformación detectada, hubiera desencadenado un proceso de secuencia inmediata de fallo completo por cortante (y torsión concomitante) de las almas. Se produciría asimismo un fallo por flexión, al despegarse la losa inferior, que aloja a la armadura de pretensado, del resto de la sección. Por esa razón se procedió a cortar el tráfico rodado en las calzadas superior e inferior y a decretar las obras de emergencia para la subsanación de las insuficiencias resistentes señaladas.

4. Estudio de alternativas

Los resultados anteriores llevaron a plantear un estudio de alternativas para determinar las mejores posibilidades de actuación. Las alternativas valoradas fueron:

- Mejora de la rugosidad de la junta fría mediante la disposición de redondos horizontales alojados en taladros horizontales con resina epoxi, para simular los resaltos del mecanismo corte-fricción, pero se planteaban

graves incertidumbres sobre la capacidad mecánica de la “nata”.

- Aumento de la capacidad vertical a tracción de la junta mediante la disposición de nuevas armaduras verticales en forma de U, lo que habría supuesto un aumento del peso de la estructura y que la seguridad quedaría confiada a la capacidad a rasante entre el hormigón pre-existente y el nuevo, lo que es muy incierto.
- Una variante de la solución anterior sería el refuerzo vertical con fibras de carbono encoladas, aunque no había antecedentes en el uso de fibra de carbono para resolver problemas de rasante ni existen ensayos de fabricantes de reconocido prestigio a cizalladura (algunos ensayos de los que son conocedores los autores revelan el mal comportamiento de las fibras frente a corte.
- Otra opción barajada fue la del encapsulado con estructura metálica, pero se mantiene el problema de falta de capacidad de la estructura pre-existente a la que se anclaría.
- También se contempló el refuerzo con pretensado exterior en las almas, con gran dificultad de perforación y el riesgo de afección a los cordones de las armaduras existentes.
- Finalmente, se planteó la demolición y la reconstrucción con un tablero de idéntica, o muy similar, geometría. Esta alternativa era la que mejor combinaba una economía ajustada, con la mayor fiabilidad y durabilidad futura, por lo que fue la opción seleccionada.

5. Demolición del tablero

Las obras de emergencia comenzaron con la demolición del tablero existente, proceso que siguió las siguientes fases fundamentales.

4.1 Operaciones previas

Consistieron, en primer lugar, en la identificación de los servicios que podían afectar al proceso de desmontaje del tablero, que fundamen-

talmente fueron las conducciones de gas que discurrían bajo el vano 2 y en las proximidades del estribo 2, lo que impedía llevar a cabo una demolición tradicional con martillos neumáticos y tenazas por el riesgo de dañar estos servicios. Así, todas las grúas, apeos, cimbras y puntos de acopio se definieron para salvar estos servicios y que no se vieran afectados.

Posteriormente, se procedió al desmontaje de juntas de dilatación, que no fueron reutilizadas, así como al fresado completo del pavimento, limitando la carga máxima por vano a 30 t por el mal estado de las artesas, con lo que se emplearon fresadoras y camiones de pequeño tamaño.



Figura 10. Plataforma fresada

Finalmente, se procedió a la retirada de los pretiles, que fueron acopiados para ser repintados, ya que disponían de marcado CE para un nivel de contención H3 y se podían reutilizar.

4.2 Desmontaje de voladizos de losa

El desmontaje del tablero se realizó en un proceso inverso al de la construcción: retirada de voladizos de losa, retirada de losa central entre almas, separación de vigas artesa entre vanos y retirada de vigas. Cualquier otro procedimiento no era estructuralmente viable por el mal estado de las vigas y la presencia de las citadas conducciones inferiores.

Para desmontar los voladizos se realizaron, mediante radiales, cortes transversales y posteriormente, tras suspender la pieza de grúas,

cortes longitudinales, lo que hizo posible dividir los voladizos en rebanadas (2×12 piezas para los vanos extremos y 2×15 para los centrales) de pesos y dimensiones razonables, con un máximo de 8,6 t, que podían ser movidos por grúas y camiones convencionales.

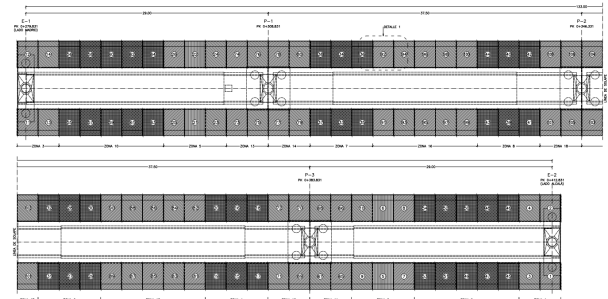


Figura 11. Secuencia de izado y retirada de voladizo de la losa superior

Debía evitarse debilitar las secciones de mayor sollicitación (centro de vano y sobre pilas) hasta no haber retirado peso suficiente, por lo que la retirada de piezas comenzó por las zonas sombreadas en color oscuro en la figura 11. Todos los cortes fueron realizados con radial de grandes dimensiones.



Figura 12. Radial de corte de los voladizos de losa

Una vez completados los cortes de una rebanada, ésta debía ser retirada empleando para ello 4 puntos de tiro, para después continuar con su simétrica. No se podría continuar con otra rebanada hasta que la anterior no fuera retirada.

El eslingado de las piezas se tuvo que realizar siempre en sentido longitudinal por la reducida cuantía de armadura longitudinal. Además, la ubicación de los taladros para el paso de las cadenas o eslingas de tiro se escogió en coincidencia con los cortes transversales, para que una

misma perforación valiera para el izado de una pieza y su contigua.



Figura 13. Desmontaje de voladizos de losa

4.3 Desmontaje de losa entre almas de artesa

Tras la retirada completa de los voladizos, se procedió a continuación con la retirada de la losa entre las almas de la viga artesa, lo que suponía disponer de un reducido espacio de trabajo por la retirada previa de los voladizos. Por ello se planteó en primer lugar ejecutar los cortes longitudinales con radial (paralelos al eje de la estructura) y posteriormente, para poder formar piezas que fueran retiradas con grúas, se realizaron los cortes transversales también con radial.

Como antes, para que las piezas pudieran transportarse directamente a vertedero, se limitó la dimensión máxima longitudinal de cada una de las piezas a 2.50 m y 10 t, de forma que no fuese un transporte especial. La retirada de la losa entre almas de viga implicaba que el pretensado de la losa inferior de la viga entrara en una sección debilitada por la existencia de las juntas frías entre las almas y la losa inferior, lo que suponía una situación de debilidad desde un punto de vista resistente por el posible pandeo lateral de las almas de la viga sometidas a su peso propio. Para evitarlo, se previó mantener sin retirar una porción central de losa superior entre las almas a modo de arriostramiento frente al pandeo de las almas, contando además con los diafragmas de las vigas situados sobre los apoyos. Adicionalmente, la pieza central de losa aumentaba la

seguridad frente a las acciones horizontales que se generarían en los puntos de tiro durante el izado de las vigas, para evitar que las almas, casi articuladas en la base, trabajaran en voladizo.

Así, el número de piezas generadas fue de 11 en los vanos extremos (10 piezas de 2.50 m y 1 pieza de 1.88 m) y de 14 en los centrales (13 piezas de 2.50 m y 1 pieza de 1.30 m).

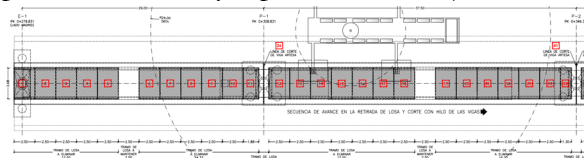


Figura 14. Secuencia de retirada de losa central

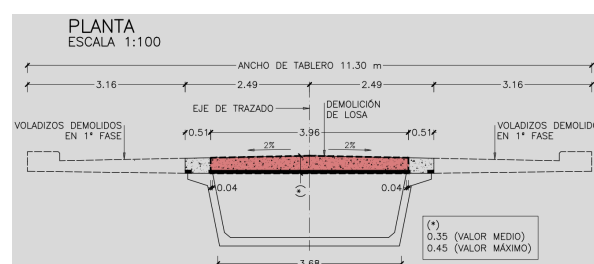


Figura 15. Sección transversal con esquema de piezas de losa retiradas

El izado de las piezas se realizó desde el estribo 1 hacia el 2, con 4 puntos de tiro por pieza cuya ubicación se definió para que la armadura de la pieza soportara la flexión del izado, con un eslingado en sentido longitudinal para que trabajasen transversalmente.

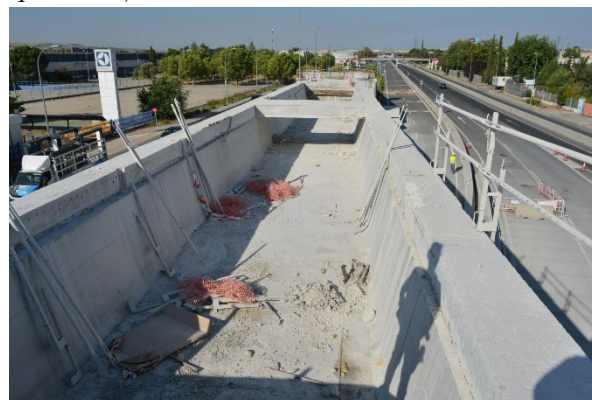


Figura 16. Desmontaje de losa entre almas con pieza central de arriostramiento

4.4 Corte y retirada de las vigas artesas

Tras retirar la losa entre almas era el momento de eliminar la conexión de las vigas artesas en sus uniones sobre pilas, para que volvieran a su configuración isostática sin continuidad. Para ello se

mantuvieron los apoyos preexistentes y se procedió al corte de la unión con hilo de diamante, que seccionó tanto el mortero de unión como las barras de conexión con un espacio sobre pilas muy reducido de 1.20 m.



Figura 17. Corte de viga con hilo de diamante sobre pila 1

La retirada de las vigas se realizó con 2 grúas de 500 t de capacidad máxima cada una, cuya ubicación estaba muy limitada, por una parte, por las conducciones de gas existentes y, por otra, por la conveniencia de que las vigas fueran colocadas fuera de la M-300 para poder reabrirla al tráfico tras la operación.



Figura 18. Izado de viga de vano 1

Las vigas fueron eslingadas desde las rios-tras para asegurar que el tiro no las dañara y, una vez izadas por las grúas, fueron colocadas sobre unas cimbras provisionales para que pudieran ser cortadas con hilo de diamante en rebanadas y transportadas a vertedero por carretera en dove-las de reducidas dimensiones y peso.

El izado de las rebanadas de viga se realizó con sistema de doble balancín para asegurar el equilibrio de la pieza, independientemente de la posición real de su centro de gravedad.

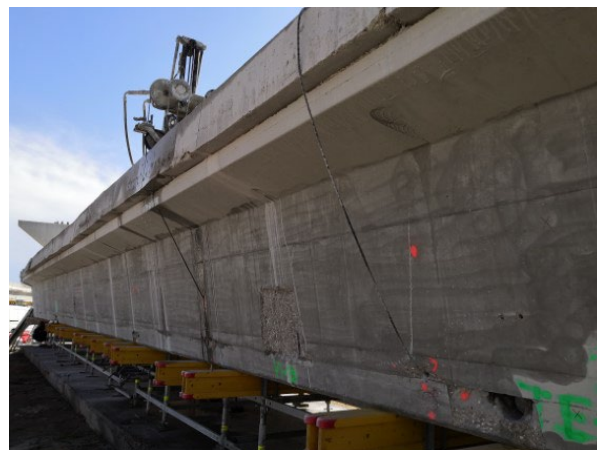


Figura 19. Corte de viga en rebanadas con hilo de diamante sobre cimbra provisional

El mal estado de las vigas artesas quedó claramente reflejado tras el corte en rebanadas, al apreciarse la falta de capacidad a rasante en la interfaz alma-losa inferior y el hendimiento observado en la losa inferior de una de las rebanadas por la falta de capacidad resistente.



Figura 20. Izado con balancines y posicionamiento en góndolas para transporte a vertedero



Figura 21. Hendimiento en viga apeada tras corte en rebanadas con hilo de diamante

5. Refuerzo de dinteles de pilas

Tras la retirada completa del tablero, se procedió al refuerzo de los dinteles de pilas mediante la formación de una piel exterior de microhormigón de 8 cm de espesor con la armadura suplementaria que necesitaban los dinteles para poder soportar las solicitaciones exteriores durante el proceso de montaje y que no fueron tenidas en cuenta en la estructura original.

Este proceso de refuerzo comenzó con la preparación de la superficie exterior del dintel para conferirle rugosidad suficiente (unos 8 mm de distancia entre crestas y valles) y evitar pernos de conexión.



Figura 22. Rugosidad superficial en dintel de pila



Figura 23. Ferralla del refuerzo de dintel de pila

6. Construcción del nuevo tablero

Finalmente, se procedió a la ejecución del nuevo tablero, cuya geometría exterior era prácticamente la misma que la original. Se hizo hincapié

en que la ejecución de las vigas no presentara los mismos problemas de junta fría entre fases de hormigonado, para cual se realizó una revisión de las fórmulas de trabajo del hormigón auto-compactante empleado en la planta de prefabricado de PRECON, así como una visita a la propia planta durante el hormigonado. Además, las vigas se construyeron con canto variable, a diferencia de las originales, mejorando la estética, y para evitar que el acuerdo convexo de la vía pudiera generar sobre-espesores de hormigón en la losa, como sucedió con el puente anterior.

El montaje de las vigas se realizó de forma similar a la retirada de las viejas vigas, aunque en este caso, las operaciones fueron más sencillas por estar en perfecto estado y no tener tantas limitaciones.



Figura 24. Montaje de las nuevas vigas artesas

Como es habitual en este tipo de puentes con vigas continuas, el montaje de las vigas en fase isostática se realizó apoyándolas en cajas de arena que después se retiraban una vez que se habían colocado y tesado las barras de conexión entre vigas sobre pilas y se había ejecutado el mortero de unión de las juntas entre vigas.



Figura 25. Caja de arena para las vigas isostáticas

Una vez que las vigas presentaban continuidad sobre pila, comenzó la ejecución de la losa superior con prelosas prefabricadas autoportantes, siguiendo el procedimiento habitual para este tipo de tableros.

Los trabajos terminaron con la ejecución del pavimento, montaje de farolas, colocación del pretil metálico original repintado, disposición del sistema de drenaje, montaje de juntas y la disposición de la señalización horizontal, así como la preceptiva prueba de carga.



Figura 26. Ejecución de losa con prelosas en celosía



Figura 27. Aspecto del puente de la M-300, P.K. 28+900, en Alcalá de Henares tras la reconstrucción del tablero

Referencias

- [1] ANDECE. Elementos prefabricados de hormigón para obras de Ingeniería Civil. 2020.