

Actuaciones de emergencia en la estructura de conexión M-607 con M-40 en el Nudo de Colmenar (Madrid)

*Emergency civil works on the road connection structure between
M-607 and M-40 in the Colmenar Junction (Madrid)*

Ignacio Rueda Sastre ^a, Tomás Ripa Alonso ^b

^aIngeniero de Caminos, Canales y Puertos. LRA Infraestructures Consulting. Jefe Departamento Estructuras.

^bDoctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. LRA Infraestructures Consulting. Socio director.

RESUMEN

En las Inspecciones Especiales llevadas a cabo se determinó que el tablero de la estructura sufría un problema de degradación del hormigón por reacción árido-álcali; fruto de esto se tramitó una actuación de emergencia para la reparación de la estructura, que consistía en el encapsulamiento de la sección con Hormigón de Ultra Altas Prestaciones, evitando así el avance de los procesos reactivos. Tras el comienzo de los trabajos se observaron una serie de patologías de gran gravedad y claros síntomas de mala ejecución durante la construcción, lo que ha llevado a modificar el alcance de la reparación y optar por la demolición controlada del tablero actual y la ejecución de un nuevo tablero de tipología viga cajón.

ABSTRACT

During the special inspection that was carried out in the structure, it was determined that the deck of the structure suffered from a problem of degradation of the concrete by an alkali-aggregate reaction. As a consequence of this, an emergency civil work was projected. The solution of the civil works was based on encapsulating the section with Ultra High Performance Concrete in order to avoid the progress of the reactive processes. After of the beginning of the works, a series of very serious pathologies and clear symptoms of poor execution were observed, which have led to the modification of the scope of the construction and repair works. The solution consists in a controlled demolition of the current deck and the execution of a new box-girder deck.

PALABRAS CLAVE: Árido-álcali, Hormigón UAP (UHPC), impermeabilización, corrosión, refuerzo, pretensado, demolición

KEYWORDS: Alkali-aggregate, Ultra High Performance Concrete (UHPC), waterproofing, corrosion, prestressed, demolition

1. Introducción

La estructura tratada en este artículo permite la conexión de la M-607 sentido entrada a Madrid y la M-40 dirección A-1, en el denominado como Nudo de Colmenar (Figura 1). El paso superior discurre sobre varias infraestructuras entre las que destacan las carreteras anteriormente

mencionadas, vías férreas de Alta Velocidad y Cercanías y otro ramal de conexión del enlace. La tipología es un viaducto hiperestático de 17 vanos con planta curva y sección de tablero tipo losa aligerada de hormigón postesado.



A raíz de una serie de inspecciones llevadas a cabo se tramitó una obra de emergencia que buscaba la reparación del tablero, aquejado por un proceso de degradación por reacción árido-álcali. Tras el comienzo de los trabajos se han detectado una serie de patologías ocultas en un primer momento, lo que ha llevado a modificar el alcance de la actuación y demoler el tablero existente para ejecutar uno nuevo aprovechando las pilas y cimentaciones.

En base a lo anterior, se ha decidido estructurar el artículo en 3 apartados, comenzando por el diagnóstico y la reparación inicial planteada, para pasar posteriormente a describir los deterioros aparecidos durante el desarrollo de las obras, y finalizar con una descripción del proceso de demolición y ejecución del nuevo tablero.

2. Diagnóstico y reparación de la estructura, afectada por reacción árido-álcali

La estructura fue objeto de una Inspección Especial llevada a cabo por personal de LRA Consultoría de Infraestructuras, motivada por las deformaciones verticales tan acusadas que presentaba el puente y cuya magnitud llegaba a suponer un problema para la seguridad vial.

La primera de las patologías detectadas es una fisuración longitudinal muy acusada en la cara inferior del tablero (Figura 2), paralela a las isostáticas de compresión, muy característica de procesos expansivos como la reacción árido-álcali. Por otro lado también son llamativas, a simple vista, las flechas verticales tan acusadas en los vanos de mayor luz; en el vano 5, el de mayor luz situado sobre la M-40, la flecha alcanza valores de 50 cm (Figura 3), alcanzándose en los

dos vanos siguiente por luz libre, vanos 8 y 11, valores de 28 y 14 centímetros. Comparando los datos con los del control topográfico del año 2008 se deduce que la flecha no esta estabilizada, si no que ha aumentado aproximadamente un 20%; por lo tanto, se concluye que las deformaciones no se deben únicamente a una deformación constructiva, si no a un proceso evolutivo de incremento deformacional.



En el marco de la Inspección Especial, ante una serie de indicios claros de un posible problema de degradación del hormigón por reacción árido-álcali, se llevó a cabo una campaña de toma de muestras e investigación en laboratorio. Los resultados fueron concluyentes: existía una reacción árido-álcali en todos los testigos, más avanzada en los extraídos del tablero, frente a los de las pilas. Asimismo, se concluye que la pérdida de rigidez del hormigón, medida con el módulo de deformación longitudinal, es muy acusada, entre el 40 y 60% del valor teórico; sin embargo, por el contrario, la pérdida de resistencia del hormigón no se manifiesta tan acusada.



Gel de sílice

En base a las patologías descritas en apartados anteriores, LRA redacta un Informe de Evaluación con el que se declara la actuación de emergencia, que plantea una estrategia de reparación consistente en el refuerzo y encapsulamiento de la sección mediante una capa delgada de Hormigón de Ultra Altas Prestaciones (UHPC).

Esta solución busca, por un lado, el refuerzo estructural del puente gracias a las elevadas resistencias a compresión y tracción que aportan los hormigones UHPC y, por otro, detener el proceso de deterioro gracias a la extraordinaria compacidad de este hormigón, que, evitando la entrada de agua y aire, detiene la expansividad de la sal reactiva. Esta estrategia de reparación está en consonancia con las actuaciones de reparación en puentes con patología de reacción árido-álcali llevadas a cabo en otros países (viaductos de Chillon en Suiza, por ejemplo) e incluso también por la propia Dirección General de Carreteras en los casos documentados de puentes de la Red con esta problemática y sobre los que ya se ha actuado.

3. Diagnóstico de nuevas patologías, observadas tras el inicio de los trabajos

Una vez iniciadas las obras de emergencia, y tras el fresado y retirada completa del pavimento de la estructura, aparecen en la cara superior de la losa nuevas patologías estructurales, que permanecían ocultas bajo el pavimento y que no se habían manifestado exteriormente, y que son de una notable gravedad.

La primera patología a destacar -aunque, en rigor, se deba a un defecto de diseño o de ejecución- es la ausencia total de un tratamiento de impermeabilización en el puente. La inexistencia de cualquier tipo de impermeabilización favorece el ingreso de agua en la masa de hormigón, agravado por el arrastre de cloruros provenientes de los tratamientos de

vialidad invernal. Son numerosos los trabajos que se vienen realizando en los últimos años en distintos comités técnicos y en la propia Dirección General de Carreteras que ponen de manifiesto la importancia crucial de la impermeabilización de los tableros para la durabilidad de las estructuras, habiéndose constatado que ni el pavimento ni la propia compacidad del hormigón resultan barreras eficaces frente al ingreso de los agentes agresivos al hormigón.

Unido a este problema, extendido a todo el puente, en los vanos 4 y 6 (los contiguos del principal, que salva la M-40) se aprecian grietas de alineación longitudinal con aperturas centimétricas. Una vez abiertas las calas de inspección en las zonas agrietadas aparecen un gran número de armaduras seccionadas, con una alineación de rotura coincidente con alguna de las grietas longitudinales, como puede observarse en la Figura 5. La gravedad de este daño, que afecta a la durabilidad, pero también de forma significativa a la seguridad estructural, hizo que se adoptaran medidas inmediatas, disponiendo apeos en el vano sobre M-40 como medida de seguridad.

Se ha investigado también en profundidad el motivo por el que esta rotura de barras se produce precisamente en los vanos 4 y 6, unido al hecho llamativo de que en las zonas de rotura de barras se observa una clara discontinuidad en el hormigón (Figura 6), como si se hubiera vertido en dos fases, a pesar de que lo habitual en este tipo de secciones sea hormigonarlas a canto completo.



Figura 5. Rotura de armaduras en vano 4



Figura 6. Plano de discontinuidad entre hormigones

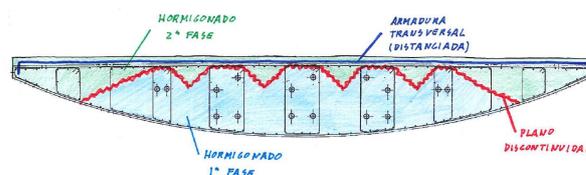


Figura 7. Croquis de fases de hormigonado

La observación detallada de este plano de discontinuidad nos lleva a concluir que se hormigonaron, en una primera fase, los nervios de pretensado; en una segunda fase, sobre el hormigón previamente endurecido, se hormigonó la capa superior, quedando una junta fría entre hormigones (Figura 7). Debido a que la parrilla de armadura superior está muy alta, y no abrazada por los cercos de cortante, produce que la junta entre hormigones sea un plano que no está cosido por ninguna armadura vertical, provocando así que ambos hormigones se hayan despegado y, lo que debería ser una sección monolítica, ha derivado en una capa de compresión no conectada al núcleo de la sección, expuesta la junta al ingreso de agresivos y, en última instancia, a una rotura sistemática de las armaduras transversales pocas veces observada en patología estructural.

Cabe plantear también una hipótesis de por qué se realizó este hormigonado en dos fases en los vanos 4 y 5 concretamente. En caso de emplearse la misma cimbra para todo el tablero, estos vanos, al ser macizos de compensación del vano 5, de mayor longitud, superarían la capacidad de la cimbra, por lo que pudiera haberse tomado la decisión de hormigonar dichos vanos en dos fases para reducir la carga

muerta del hormigón fresco. Esta decisión pudiera haber sido avalada técnicamente durante la obra, pero es evidente que su ejecución y la inadecuada disposición de la ferralla han resultado determinantes para el grave deterioro que ha experimentado el hormigón en estos dos vanos macizos.

Cabe señalar también que los problemas de asentamiento de la cimbra durante la construcción de los vanos 4, 5 y 6 se ponen de manifiesto al observar en la estructura los recrecidos del zócalo de apoyo del pretil (Figura 8), de hasta 15 cm en alguna sección, que tuvieron que hacerse en fase de obra para mantenerlo con una rasante correcta.



Figura 8. Recreidos en zócalo de apoyo de pretil

En los restantes vanos, donde no se encontraron grietas de semejante magnitud, la ausencia de impermeabilización del tablero, unido a la fisuración en cara superior (Figura 9) y a la porosidad del hormigón por la reacción árido-álcali, hace que se sospeche que pudiera haber un ingreso de agresivos al hormigón (cloruros principalmente) que pudieran ser el origen de patologías severas.



Figura 9. Fisuración generalizada en la losa

Por este motivo se llevó a cabo una extensa campaña de investigación, con apertura de calas, extracción de testigos y ensayos de laboratorio dirigidos por el CEDEX. Los resultados ratificaron la presencia generalizada de síntomas asociados a una reacción árido-álcali y, en los primeros centímetros de profundidad, concentraciones de cloruros próximas a los límites normativos máximos.

En conclusión, a diferencia de los vanos 4 y 6, los restantes vanos presentaban patologías de durabilidad del hormigón, que podrían afrontarse con la estrategia de encapsulamiento con Hormigón de Ultra Altas Prestaciones planteada en un primer momento; sin embargo, resulta determinante a la hora de evaluar el estado de conservación llevar a cabo una investigación del estado del pretensado, ya que podría estar afectado.

Tras el fresado del aglomerado quedaron a la vista, en la cara superior del tablero, los tubos de purga por donde debía haber rebosado la lechada durante la inyección de las vainas y que deberían estar colmatados. Una simple inspección visual evidenció que muchos de estos tubos, situados en los frentes de fase y puntos altos del trazado, no se encontraban completamente colmatados; por ese motivo se llevó a cabo una investigación exhaustiva del pretensado por una empresa tan especializada como Freyssinet.

En las dos primeras calas, abiertas en puntos altos donde el tubo de purga se encontraba vacío, se observaron claras patologías de corrosión en los pretensados. La placa de conexión del tubo de purga se encontraba completamente corroída; la vaina había

desaparecido parcialmente debido al avanzado estado de corrosión; la lechada no recubría completamente a los cables y la corrosión había alcanzado los torones de pretensado, existiendo algún alambre o incluso torón completo rotos por corrosión bajo tensión (Figura 10).



Figura 10. Rotura de cables por corrosión bajo tensión

En la investigación sistemática del pretensado llevada a cabo no se encontraron daños por corrosión tan avanzados en los cales como los observados en aquellas catas. Sin embargo, se observó de forma repetitiva un defecto de ejecución, puesto que en numerosas calas la lechada no recubría completamente a los cables, por lo que la inyección de la vaina no había sido completa. Además, se han encontrado indicios de mala praxis, por cuanto se han encontrado varios tubos de purga sin conectar a la vaina, simplemente superpuestos sobre una vaina que carecía de orificio de conexión (Figura 11). Es más, se han llegado a encontrar tubos de purga no conectados que aparecen colmatados de lechada, por lo que han tenido que rellenarse a posteriori, lo cual no es sino un agravante de la mala praxis. Se han detectado también diferencias de cota significativas en los puntos altos, existiendo una variación entre la cota de planos y la real de hasta 220mm; debidos bien a error en el replanteo de los tendones en obra, o bien a sobreespesores de hormigón sobre la parrilla superior.



Figura 11. Tubo de purga simplemente apoyado sobre la vaina. Una vez retirado el tubo de purga, la vaina carece de orificio de conexión.

Tras la apertura de la vaina e inspección visual de la lechada, se introdujo un boroscopio para observar el interior de las vainas de los tendones. Las grabaciones revelan una inyección incompleta de las vainas de forma muy generalizada; además, se han observado una serie de patologías en la lechada como exudación excesiva, formación de espumas y falta de consistencia (Figura 12).



Figura 12. Exudación de la lechada de inyección, que ha segregado los aditivos como espuma, dejando oquedades en zonas a las que sí llegó la lechada durante la ejecución.

4. Nuevo alcance de la reparación. Desmontaje y construcción.

En síntesis, existió un consenso generalizado entre todos los ingenieros especialistas que intervinieron en el análisis de la problemática sobrevenida en el puente de que la solución inicial planteada de refuerzo y encapsulamiento con Hormigón de Ultra Altas Prestaciones resolvía de forma totalmente satisfactoria la problemática inicial diagnosticada de reacción árido-álcali en el puente.

Ahora bien, una vez iniciada la obra, los daños estructurales y de durabilidad detectados en los vanos 4 y 6 son de tal gravedad que requieren un replanteamiento de la solución. Por ello, desde un primer momento de la obra, se actuó con celeridad apeando los vanos 4, 5 y 6 por seguridad y se planteó, como única solución fiable para su reparación, la demolición íntegra y posterior reconstrucción con tres nuevos vanos con sección prefabricada de hormigón.

En los restantes vanos son numerosas las patologías que se acumulan: la propia reacción árido-álcali, el ingreso de cloruros por la fisuración existente y ausencia de impermeabilización y, sobre todo, las patologías observadas en el pretensado. En efecto, en el pretensado se han detectado corrosión en cables, ausencia de lechada de inyección, baja calidad de la lechada y, por ende, indicios de mala praxis por diferencias de trazado respecto al teórico y tubos de purga no conectados, incluso deliberadamente rellenos de lechada.

Téngase en cuenta que, por la propia naturaleza y configuración del pretensado en un puente losa de este tipo, sólo es factible observarlo en secciones puntuales, lo cual nos deja una enorme incertidumbre del estado del pretensado en toda la longitud que no se ha podido investigar y una enorme incertidumbre, por añadidura, de su evolución, habida cuenta de las patologías concomitantes que afectan sobremanera a su protección frente a la corrosión.

Por todo ello, la alternativa que se planteó como más razonable fue la demolición íntegra del puente, y su posterior reconstrucción con un tablero nuevo prefabricado de hormigón.

El nuevo puente se ejecutó demoliendo la losa existente y construyendo un nuevo tablero prefabricado de hormigón, aprovechando las pilas y cimentaciones del puente existente. La posibilidad de ejecutar un nuevo puente en paralelo, que permitiera eventualmente la reapertura provisional del existente al tráfico, no se estimó oportuna, debido a la complejidad, coste y fiabilidad de las actuaciones de reparación provisional que debían llevarse a cabo.

El proceso de demolición fue, a grandes rasgos, un desmontaje del tablero por tramos, que previamente fueron independizados mediante un plano de corte transversal con hilo de diamante.

En todos los vanos que no vuelan sobre las infraestructuras de transporte, se dispusieron torres de apeo provisionales (Figuras 13 y 14), reduciendo las luces del puente existente y con ello las cargas transmitidas al terreno por las torres y el peso de los tramos a desmontar. El número mínimo de vanos apeados para desmontar un vano es de los dos contiguos al vano a desmontar, a cada lado de dicho vano; de este modo se evitan esfuerzos anómalos en las secciones del tablero contiguas al vano afectado.

Como se ha comentado anteriormente, todo el proceso de desmontaje se hizo mediante corte de la sección con hilo de diamante, evitándose demoliciones *in situ*. Este método es más seguro a la hora de tener contralada la operación, tanto desde el punto de vista del control de esfuerzos de la parte remanente de la estructura como desde el punto de vista de la seguridad. Los cortes se efectuaron coincidiendo con las secciones situadas sobre las torres de apeo.

Tras el corte de los tramos, se retiraron izándolos con grúas de gran capacidad, de forma que se garantizara la seguridad de la operación.

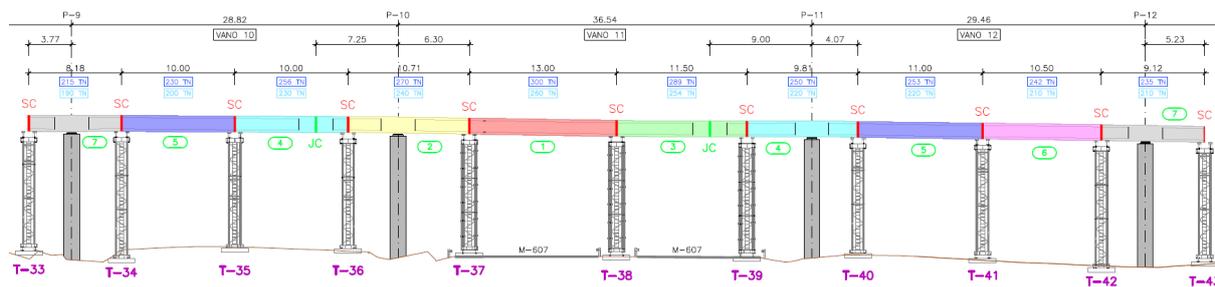


Figura 13. Esquema de desmontaje del tablero



Figura 14. Torres de apoyo empleadas en el desmontaje



Figura 15. Izado de tramo del tablero

El vano 5, el de mayor longitud de la estructura y bajo el que discurren los 9 carriles en servicio de la M-40, requirió de un proceso de desmontaje especial.

Como se ha comentado, el vano se encontraba apeado de forma provisional con torres apoyadas en la mediana de la M-40 y en las proximidades de las pilas 4 y 5. Dichas torres se aprovecharon, añadiendo dos apeos provisionales más, uno situado en la mediana y el otro en el arcén más próximo a pila 5.

Sobre el tablero se instalaron 4 baterías de celosía metálica, formadas con elementos de autocimbra, apoyadas sobre las secciones situadas sobre los apeos. El tablero se suspendió de estos elementos con barras rígidas de pretensado enfiladas en taladros pasantes ejecutados a tal efecto. (Figuras 16 y 17)

Con esta configuración es posible plantear el corte del talero en dovelas individuales de reducidas dimensiones, que se mantengan suspendidas garantizando la seguridad en todo momento. Con cortes de calzada nocturnos, una grúa procedería a bajar las dovelas en vertical hasta cargarlas en camiones que se situaban bajo el vano, en la calzada de la M-40. (Figuras 18 y 19)

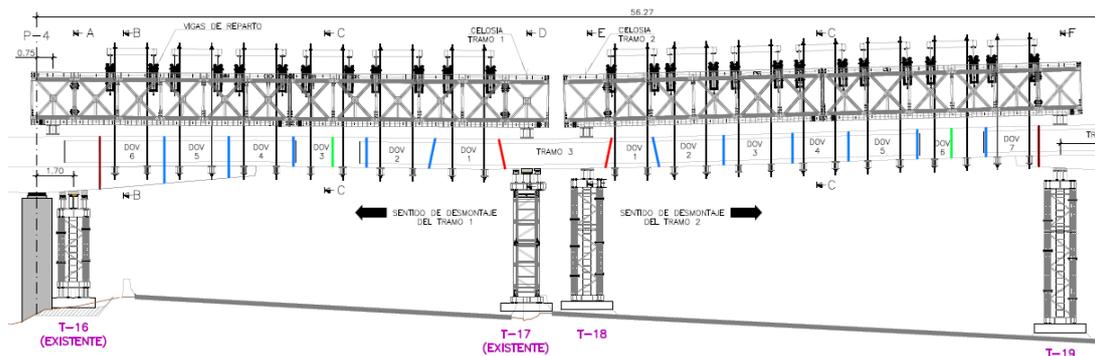


Figura 16. Despiece en dovelas suspendidas de la celosía metálica



Figura 17. Sistema de cuelgue de las dovelas del vano 5

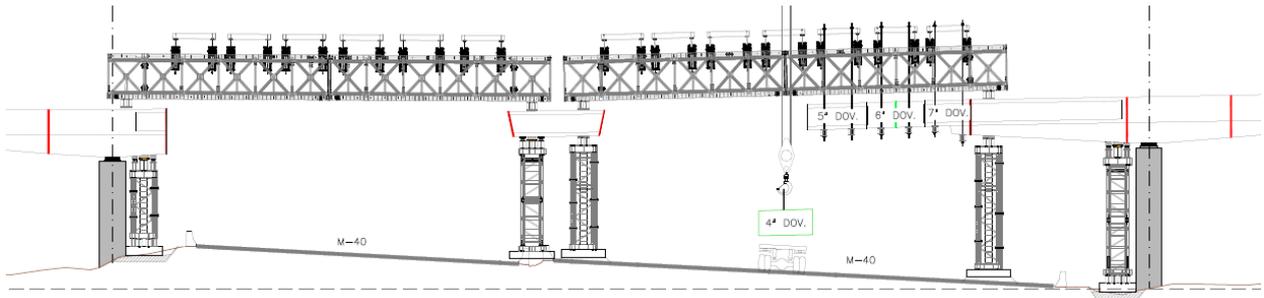


Figura 18. Esquema del proceso de desmontaje de las dovelas y carga en camión

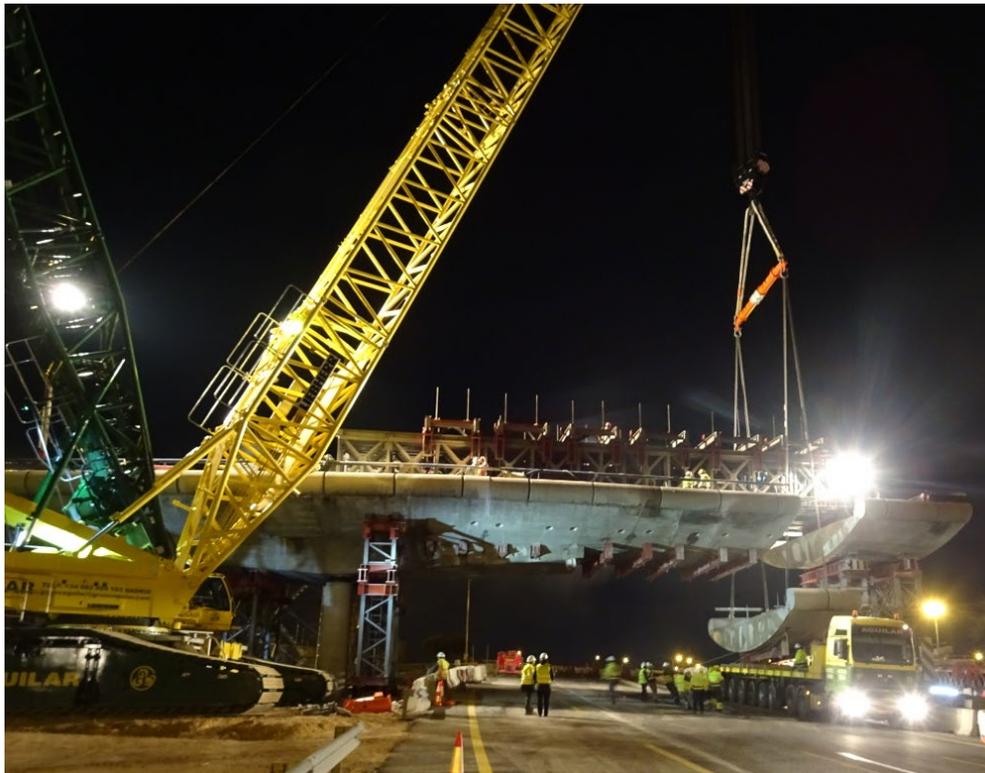


Figura 19. Operaciones de descenso de dovela y carga en camión

El desmontaje de los vanos 16 y 17 también debe analizarse de una forma especial. Estos vanos, salvan las vías de ferrocarril de ancho ibérico de la red de Cercanías y las de Alta Velocidad que se dirigen hacia el norte de la Península.

La existencia de vías electrificadas con catenaria invalida el empleo de un sistema de desmontaje similar al empleado en el vano 5, puesto que la catenaria imposibilita el descenso de las dovelas cortadas; por lo tanto, la única solución es reducir al máximo la longitud del vano de corte.

Debido a los condicionantes de los gálibos ferroviarios, la longitud mínima del vano es de

14 metros, por lo que el peso total a retirar es del orden de las 350 toneladas. Las condiciones de acceso son muy estrictas, por lo que resulta imposible acceder con una grúa de gran capacidad, suficiente para la retirada de un tramo de estas dimensiones

Con objeto de reducir el peso de los tramos a retirar, se planteó la realización de unos cortes previos longitudinales en los tramos, previamente apeados en el núcleo central. Es decir, se procede a instalar las torres de apoyo tal como se indica en el proceso general y se ponen en carga; después de esto, se procede a colocar unas vigas transversales para sujetar los voladizos. (Figuras 20 y 21)

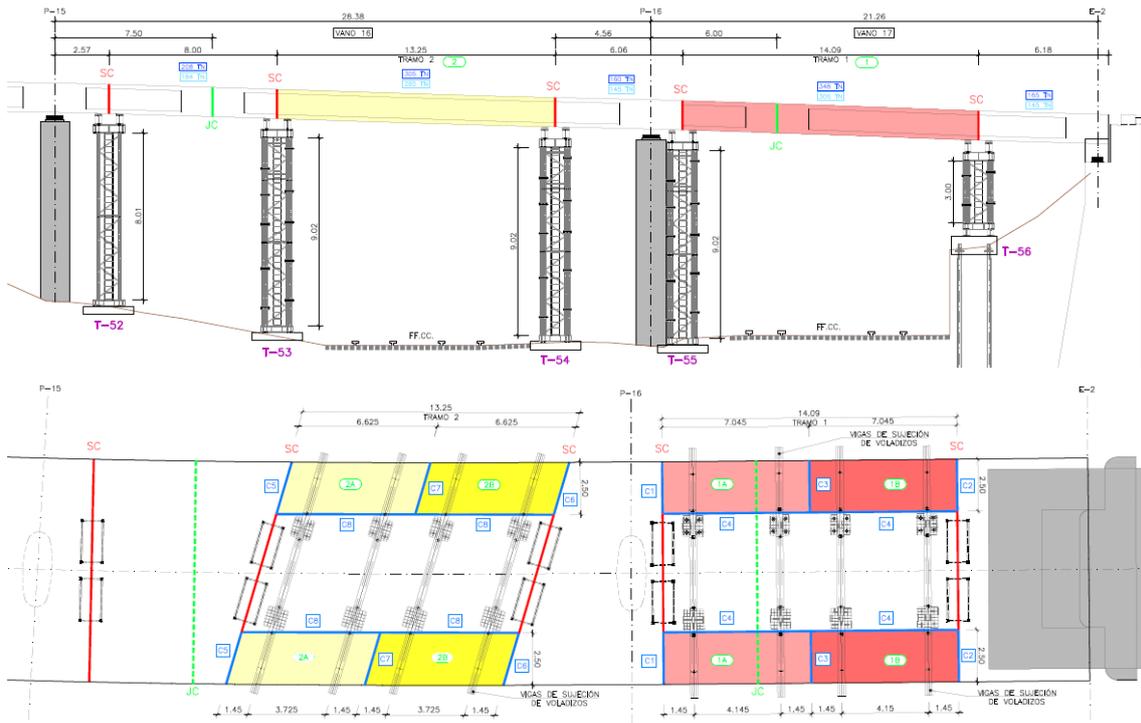
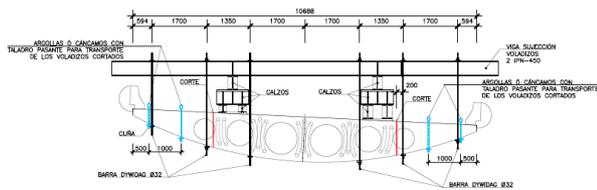


Figura 20. Planta y alzado del proceso de desmontaje de los vanos 16 y 17



Estas vigas permiten cortar los voladizos de la sección transversal y hacer una retirada parcial de estas piezas; de este modo se disminuye el peso del tramo central a retirar. Una vez realizado dicho corte de los voladizos del puente se procede a efectuar el corte de cada tramo y la retirada del mismo.

La tipología escogida para el nuevo tablero es un cajón prefabricado de hormigón pretensado de planta curva, con losa ejecutada *in situ* sobre un encofrado de prelasas prefabricadas; esta tipología, frente a la losa existente, buscaba el aligeramiento de la sección, más indicado para puentes de planta curva, con su consecuente fácil ejecución e izado sobre las pilas.

Las vigas empleadas en la mayor parte del tablero son de canto constante de 1,60 metros (Figura 22); sobre las pilas de los vanos de mayor luz (que son el 5, 8 y 11) se disponen vigas martillo, con un canto variable desde los 1,60 a los 2,50 metros en la sección de pila (Figura 23).

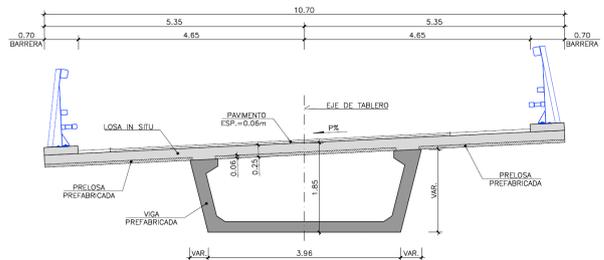
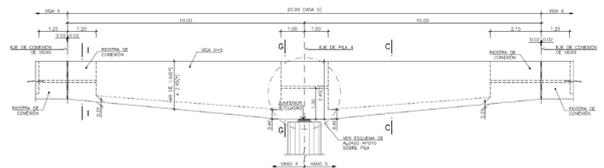


Figura 22. Sección tipo de la solución propuesta



Tras la colocación de las vigas se procedió al postesado y hormigonado de las riostras de conexión, de forma que se garantice el comportamiento hiperestático del tablero.



Figura 24. Proceso del montaje de vigas y prelasas del nuevo tablero

En las pilas y cimentaciones, al estar más protegidas, los efectos de la degradación por reacción árido-álcali no eran tan acusados; por lo tanto, con el objetivo de mejorar la durabilidad, se planteó un encapsulamiento de la sección del fuste mediante un recubrimiento con una capa de 15 centímetros de hormigón. El nuevo recrecido se diseñó de forma que la cuantía de la sección completa cumpliera las mínimas establecidas en la norma vigente, y la nueva sección soportara los esfuerzos de dimensionamiento despreciando el hormigón existente, situado en el interior de la nueva sección de fuste.



Agradecimientos

En primer lugar, agradecer a IDEAM, que ha trabajado de la mano con nosotros, dando una doble visión del problema, y colaborando en el diagnóstico y Asistencia Técnica a lo largo de la obra; en el diagnóstico ambos debemos agradecer a las diferentes empresas, instituciones y profesionales, que colaboraron su aporte de conocimientos a la hora de diagnosticar cada una de las patologías a las que nos enfrentamos. Por último, al Grupo Puentes y a Pondio, presente como Oficina Técnica, ya que entre ambos han sido capaces de ejecutar y proyectar unos trabajos muy singulares en unos plazos y condiciones muy estrictos.