

Empuje del tablero del viaducto mixto sobre la Rambla de los Feos en la LAV Murcia-Almería

Launching of the deck of the steel-concrete composite bridge over Rambla de los Feos in the HSRL Murcia-Almería

Javier Pascual Santos ^a, Joaquín Arroyo Márquez ^b, José Carlos Déniz Benítez ^c,
Pablo Vidal Fernández ^d, Narciso Pulido Asín ^e, Rafael Guillén Carmona ^f

^a Dr Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Pondio Ingenieros SL. Director. jpascual@pondio.com

^b Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Pondio Ingenieros SL. Director. jarroyo@pondio.com

^c Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Pondio Ingenieros SL. Jefe de Proyecto. jcdeniz@pondio.com

^d Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Pondio Ingenieros SL. Ingeniero de Proyecto. pvidal@pondio.com

^e Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. SACYR. Gerente de proyectos. npulido@sacyr.com

^f Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. SACYR. Jefe Dpto. Estructuras. rguillen@sacyr.com

RESUMEN

El viaducto sobre la Rambla de los Feos en el tramo Los Arejos-Níjar de la LAV Murcia-Almería es un viaducto ferroviario para alta velocidad en tipología mixta hormigón-acero de 908.7 metros de longitud total, 67 metros de luz de vano, y tablero bijáceno de 3.95 metros de canto con doble acción mixta generalizada a torsión. Ha sido construido por la empresa SACYR mediante empuje del tablero. En otra comunicación se describen las características del viaducto y los aspectos novedosos de su diseño. Esta comunicación se enfoca en el empuje del tablero, cubriendo los aspectos reseñables en el proceso: adaptación del tablero para el empuje, medios auxiliares y desarrollo del proceso de empuje y su control.

ABSTRACT

The viaduct over the Rambla de los Feos on the Los Arejos-Níjar section of the HSRL Murcia-Almería is a high-speed railway viaduct of steel-concrete composite deck with a total length of 908.7 metres, a span of 67 metres, and a depth of 3.95 metres with double composite action generalised to torsional action. It has been built by SACYR with launching of the deck. Another paper describes the characteristics of the viaduct and the innovative aspects of its design. This paper focuses on the launching of the deck and covers the most important aspects of the process: adaptation of the deck for the launching, temporary works, and development of the launching process and its control.

PALABRAS CLAVE: viaducto de alta velocidad, estructura mixta, empuje, doble acción mixta.

KEYWORDS: high speed viaduct, steel-concrete composite, launching, double composite action.

1. Descripción general del viaducto

La longitud total del viaducto es de 906 metros entre ejes de apoyo en estribos, distribuidos en 17 vanos con la siguiente secuencia de luces:

39.50 + 50 + 8 x 55 + 67 + 4 x 55 + 50 + 39.50 metros. El vano principal de 67 metros se sitúa para cruzar la Rambla de los Feos. El puente ha

sido construido por la empresa Sacyr, mediante empuje del tablero. En otra comunicación del congreso se describen las características principales del viaducto y los aspectos novedosos de su diseño. Esta comunicación se enfoca en el proceso de empuje del tablero, cubriendo los aspectos más relevantes del mismo: adaptación del tablero para el proceso de empuje, medios auxiliares empleados, y el propio desarrollo y control del proceso de empuje.



Figura 1. Vista general durante el empuje.

2. Características generales del proceso de empuje.

El empuje del tablero se realizó desde el estribo E2 hacia el estribo E1, con pendiente ascendente del 1.50%. Esta circunstancia permite prescindir de elementos de retenida durante el lanzamiento, si bien es necesario disponer un elemento de fijación o bloqueo durante las operaciones de montaje que evite el desplazamiento del frente trasero hacia el valle por efectos térmicos.

Para la fabricación en taller y posterior transporte y ensamblaje en obra la estructura metálica del tablero se dividió en 34 módulos, con longitudes comprendidas entre 19.25 y 31.70 metros, y un peso máximo de 106 toneladas. Cada módulo se fabricó completo en taller y se transportó a obra a sección transversal completa, lógicamente exceptuando determinados elementos que requerían un ensamblaje posterior debido a la secuencia constructiva, como son los cupones de empalme en obra de las células superior e inferior entre módulos sucesivos, o determinados tramos del rigidizador longitudinal de alma o los conectadores

inferiores que se disponían en obra después del montaje de las prelosas inferiores. Pero, salvo estas circunstancias locales, la estructura metálica de cada módulo se transportó terminada a la obra.

El empuje del tablero se realizó en 6 fases para la longitud completa del tablero, con la distribución siguiente:

Tabla 1. Fases de lanzamiento. Longitudes y peso.

Fase	Longitud (m)	Módulos incorporados (mm)
1	152.8	1 a 6
2	165.0	7 a 12
3	137.0	13 a 18
4	144.0	19 a 23
5	172.0	24 a 29
6	147.9	30 a 34

La longitud de lanzamiento en cada fase se determinó atendiendo a dos aspectos fundamentales. Por un lado, al finalizar el lanzamiento de cada fase el puente debe quedar apoyado en la pila frontal con un voladizo moderado, y, por otra parte, la longitud de tablero que queda en voladizo por la cola al finalizar cada lanzamiento determina un giro de la sección de cola que no debe conducir a unas necesidades de nivelación en el parque de empuje excesivas para el montaje de la siguiente fase con la continuidad geométrica requerida.

La estructura ejecutada en cada fase comprende el tramo de tablero nuevo que se fabrica sobre el parque y se conecta al tramo inmediatamente anterior ya empujado o, en la primera fase, a la nariz de lanzamiento. El empuje se realizó con una nariz frontal de lanzamiento de 16 metros de longitud, y con pendiente ligeramente ascendente hacia la punta para facilitar una entrada suave en la pila frontal durante los avances. De modo similar, en la cola del tramo correspondiente a cada fase de lanzamiento se dispone una contranariz de 6.34 metros de longitud, también con pendiente ascendente hacia la punta trasera, para permitir una salida controlada al paso por cada apoyo en el parque.

La estructura empujada corresponde a la totalidad de la estructura metálica del tramo, todo el sistema de hormigón inferior terminado y conectado a la estructura metálica, y también las prelosas superiores ya montadas sobre la estructura. Como excepción, al objeto de no penalizar en exceso los esfuerzos del tablero en el voladizo frontal durante el avance, no se disponen prelosas superiores en los 53.85 primeros metros del puente, y tampoco se ejecuta el sistema inferior de hormigón en los primeros 29.85 metros. En esta longitud, por tanto, solo se empuja la estructura metálica. El motivo por el que la longitud sin hormigón inferior es sensiblemente menor a la longitud sin prelosas superiores es evitar penalizar de modo significativo la estabilidad de los cordones inferiores comprimidos durante el empuje, ya que el hormigón inferior es el elemento que los estabiliza lateralmente. Al objeto de proporcionar la rigidez transversal necesaria en el frente de avance y la resistencia a las acciones transversales de viento durante el empuje se dispone en los dos primeros vanos del puente una celosía horizontal a nivel de las platabandas superiores, con perfiles tubulares cuadrados en cruz de San Andrés.



Figura 2. Llegada del tablero al estribo 1.

El montaje de los sucesivos módulos en el parque de lanzamiento y su conexión al tramo empujado previamente se realizó respetando estrictamente la geometría de fabricación del puente, es decir, la derivada del trazado en planta y alzado, y las contraflechas de ejecución establecidas en el proyecto. Para ello, el montaje en el parque de los nuevos módulos incorporados en cada nueva fase de lanzamiento

se realizó respetando dicha geometría de “sólido rígido”, y la conexión con la cola del tramo previamente empujado se realizó respetando estrictamente la tangencia en la unión entre el módulo de conexión del nuevo tramo y la cola del puente ya empujado. Obviamente la cota y el giro esperable en la cola del puente en cada fase de empuje se determinó previamente en los análisis del proceso de empuje, y con dicha previsión se estableció el sistema de calzos de montaje en el parque y las cotas de montaje en cada punto. En todo caso, en todas las fases se contrastó con buenos resultados la posición real de la cola del puente tras el empuje con la posición teórica prevista, diseñándose únicamente pequeñas actuaciones de ajuste con gatos para absorber la diferencia. Tras el montaje y ensamble de la estructura metálica se colocaban las prelosas inferiores, la ferralla y hormigonado de los zunchos laterales inferiores y, en su caso, la losa de doble acción mixta. Lógicamente, al objeto de agilizar los ritmos de ejecución en el parque y dada la longitud del tramo nuevo en cada fase de empuje estas actuaciones en el sistema de hormigón se realizaban de modo simultáneo a la estructura metálica, pero siempre bajo el criterio de actuar en hormigón sobre estructura metálica completamente terminada, y a separación suficiente, al menos dos módulos completos, de modo que las actuaciones en el hormigón no introdujeran en ningún caso afecciones o desplazamientos sobre la estructura metálica en ejecución.

Una vez concluida la estructura completa del tramo empujado en cada fase se procedía al descenso controlado del tablero en el parque, desde los calzos de montaje a los balancines de deslizamiento, quedando listo para el empuje.

Al objeto de proporcionar la seguridad necesaria frente a acciones transversales de viento, y también para servir de guiado del puente durante el empuje se dispusieron guíaderas transversales en todas las pilas y estribos, y en tres de las siete alineaciones de apoyo en el parque de empuje.

3. Algunos aspectos relativos al análisis estructural del puente empujado.

3.1 Control general de esfuerzos en el tablero.

El empuje del tablero se simuló en su totalidad en el modelo de cálculo empleado para el proyecto del puente. Se consideraron avances de metro en metro, en cada fase de lanzamiento comenzando en el descenso del nuevo tramo a empujar desde los calzos del parque a los balancines de deslizamiento, según se ha indicado anteriormente. Las acciones consideradas son el peso propio del tramo empujado, las acciones térmicas y el viento de construcción, evaluado este con un periodo de retorno de 4 años. Esta consideración es algo conservadora respecto al viento de maniobra de 40 km/h que se estableció como máximo compatible con la realización del empuje, si bien se consideró oportuno hacerlo así para una mayor seguridad y, sobre todo, para cubrir los periodos entre fases sucesivas de empuje. Asimismo, llamamos la atención sobre la necesidad de considerar en el análisis del proceso las contraflechas de ejecución del tablero, que inciden drásticamente en el régimen de esfuerzos del tablero y reacciones en los balancines de apoyo durante el empuje. Estas contraflechas equivalen a deformaciones impuestas en los apoyos durante el avance que modifican de modo muy significativo los esfuerzos del puente respecto a la configuración convencional de una viga continua sobre los apoyos deslizantes. El puente tiende a aumentar de modo muy sensible las reacciones verticales y las flexiones negativas asociadas cuando los puntos bajos del diagrama de contraflechas pasan sobre los apoyos, y a reducir las reacciones sobre los puntos altos del diagrama cuando estas secciones pasan sobre los apoyos, pero a aumentarlas en los apoyos adyacentes. En definitiva, es imprescindible considerar con rigor el diagrama de

contraflechas para la obtención de las reacciones en los balancines de deslizamiento y los esfuerzos en el tablero durante el empuje. Se obtuvo así la envolvente de esfuerzos máximos solicitantes a lo largo de todo el tablero que se muestra en la figura 3, realizándose las comprobaciones pertinentes, tanto tensionales y de abolladura de paneles en servicio como de capacidad resistente en ELU.

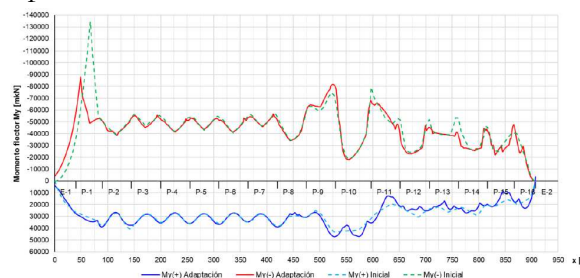


Figura 3. Envolvente flectores durante el empuje.

Se ha mostrado con puntos la misma envolvente pero obtenida en el caso de no emplear la nariz en la punta. Nótese que tanto el momento negativo máximo como la extensión del voladizo en el puente es sensiblemente mayor.

Como criterio general para el control de las secciones durante el empuje se decidió no forzarlas estructuralmente en las fases de avance, y se estableció como criterio no superar tensiones del orden de 200 MPa en la estructura metálica durante el empuje. Esta condición se ha cumplido con carácter general sin necesidad de aumentar los espesores de chapas establecidos por los controles en ELS y ELU generales del puente terminado, y únicamente en la zona frontal de avance en la que son significativos los esfuerzos en el voladizo se aumentó la potencia de las secciones para mantener el criterio indicado.

3.2 Control de las almas durante el empuje.

Un aspecto esencial para la seguridad del puente durante el empuje es el diseño de cordón inferior sobre el que se realiza el deslizamiento y el control de las almas frente a las reacciones localizadas introducidas por los balancines de deslizamiento.

En lo que respecta al cordón inferior, la presencia de la célula lateral exterior y el costero de hormigón in situ proporciona un sistema excelente para el desarrollo del empuje, de gran robustez, y con una rigidez y una capacidad resistente excelentes. La conexión general del costero dimensionada para los efectos globales del puente es sobreabundante para el anclaje de las bielas inclinadas que a modo de célula virtual interior se desarrollan en el costero. El control local de la transmisión de la reacción procedente de los patines de empuje a la platabanda inferior se realizó considerando almohadillas de deslizamiento de 200 mm de anchura trabajando a una tensión de 30 MPa, o bien almohadillas de 300 mm de anchura trabajando a 20 MPa, que fueron las finalmente empleadas. En la zona frontal de avance en la que, según se ha descrito anteriormente, no se ejecuta el sistema de hormigón inferior previamente al empuje se dispuso célula en la zona interior de modo simétrico a la exterior, proporcionando así un sistema también idóneo en esta zona.

El diseño general del sistema se realizó en el proyecto prescribiendo una longitud mínima de 1.75 metros en los balancines para la transmisión uniforme de la carga del balancín al tablero. Además, la presencia del zuncho inferior de deslizamiento formado por la célula inferior y el costero de hormigón, o, en su caso, la doble célula, aumenta sensiblemente la capacidad de reparto de la carga en el plano del alma hasta alcanzar la base del panel susceptible de inestabilidad, delimitado por las líneas nodales que suponen los vértices de las células superior e inferior junto al alma. Aun así, las reacciones desarrolladas en los balancines durante el empuje son muy elevadas, próximas a los 6400 kN sobre almas de 25 mm de espesor, 7100 kN sobre almas de 30 mm de espesor y 10600 kN sobre almas de 35 y 40 mm de espesor, siempre en valores de servicio sin mayorar. La resistencia de las almas a la carga concentrada procedente de los balancines de deslizamiento resultó determinante en el dimensionamiento de varias

zonas del puente. El diseño final combinó la disposición de un rigidizador longitudinal a una altura de 1.20 metros respecto al fondo del tablero y un ligero incremento de 5 mm en el espesor de la chapa del alma cuando ello resultaba necesario para proporcionar la capacidad resistente necesaria.

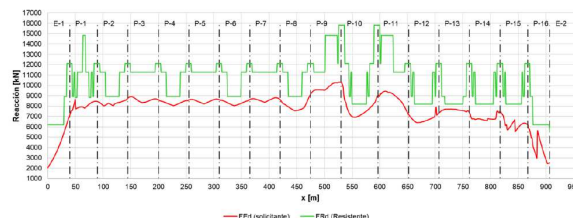


Figura 4. Reacción resistente (verde) y solicitante (rojo) a lo largo del puente durante el empuje.

En otra comunicación a este congreso se realizan asimismo algunas reflexiones adicionales sobre el diseño de los rigidizadores para el empuje, y a ella nos remitimos para no repetirlas aquí.

4. Medios auxiliares para el proceso de empuje.

Se incluyen a continuación los aspectos más reseñables considerados para la concepción y diseño de los medios auxiliares relevantes empleados en el proceso de empuje.

4.1 Parque de montaje y empuje.

El parque de montaje y empuje del tablero se sitúa en el trasdós del estribo 2. En él deben colocarse y ensamblarse los sucesivos módulos que se añaden en cada fase de empuje para su lanzamiento, ejecutarse el sistema inferior de hormigón y colocarse las prelasas superiores.

La longitud del parque de lanzamiento fue de 190 metros medidos desde el eje de apoyos en el estribo 2, y se concibió mediante sendas vigas longitudinales de hormigón con unas dimensiones de 2.00 (ancho) x 1.00 (alto) metros dispuestas bajo la alineación de las vigas del tablero. Sobre las vigas se disponen dos tipos de apoyos. Por un lado, con un intereje de 23 metros a partir del eje de apoyos en el estribo se

disponen siete alineaciones de balancines de deslizamiento, uno bajo cada viga. La cota superior de estos balancines se sitúa a la rasante de empuje, que, como se ha indicado anteriormente, es paralela a la rasante final del puente, pero 380 mm más elevada. A una distancia menor, en el entorno de 5 metros de intereje se disponen los calzos de apoyo sobre los que se realiza el montaje y unión de los módulos metálicos, la ejecución del sistema inferior y el montaje de las prelosas. Una vez terminada completamente la estructura del tramo a lanzar se descargan los calzos de montaje por medio de gatos, se retiran los calzos y el tablero se desciende controladamente hasta quedar apoyado en los balancines de deslizamiento listo para su empuje.

Una de las condiciones básicas que debe satisfacer el parque de empuje es su rigidez vertical, al objeto de mantener inalterada la geometría teórica de ejecución durante la construcción y empuje. Por ello la cimentación del parque se materializó mediante pilotes de 1500 mm de diámetro, dispuestos precisamente bajo cada uno de los balancines de deslizamiento, y con una longitud variable entre 10 y 18 metros según las características del terreno y la carga a transmitir, suficientes para transmitir al terreno las cargas de los balancines sin deformación apreciable. Entre medias de estos pilotes principales se dispusieron pilotes intermedios con 10 metros de longitud para mantener la alineación de las vigas del parque.



Figura 5. Tablero en el parque de montaje y empuje.

4.2 Nariz de lanzamiento y contranariz.

Para facilitar la entrada del frente de avance sobre las pilas durante el empuje se utilizó una nariz frontal de 16 metros de longitud y un peso de 42 toneladas. El objeto de esta nariz es proporcionar una entrada suave del tablero a su llegada a cada pila. Por ello el diseño de la nariz incorpora un fondo en pendiente ascendente hacia la punta que garantiza una entrada sencilla sobre las pilas. La nariz se conecta al tablero con plena continuidad geométrica y tangencia a nivel de las platabandas inferiores, con posterior acuerdo curvo en alzado para proporcionar la pendiente ascendente requerida.

La longitud de la nariz y la pendiente ascendente asociada debe establecerse en función de las flechas de llegada esperables al conjunto de las pilas, y establecer un valor que permita cubrirlas todas. Posteriormente, el análisis estructural debe considerar la geometría de la alineación inferior de la nariz para determinar la posición del apoyo teórico del frente de avance sobre cada pila. Es importante considerar la variación derivada de los esfuerzos térmicos, de modo que queden cubiertas posibles flechas adicionales por este motivo. Por otra parte, no conviene proporcionar márgenes excesivos en la geometría de la nariz respecto a las flechas teóricas esperables. Debe tenerse en cuenta que un margen excesivo en la geometría de la nariz respecto a las flechas de cálculo conduce necesariamente a un aumento del voladizo de avance hasta efectivamente apoyar, y por tanto los esfuerzos en el voladizo.

En nuestro caso, la geometría en la alineación inferior de la nariz permitía absorber 521 mm de flecha a la llegada en la pila. Este valor se estableció a partir de unas flechas teóricas de llegada a todas las pilas que varían entre 309 mm y 519 mm, salvo en la pila P10 correspondiente al voladizo del vano de 67 metros, en el que la flecha esperable alcanzaba 912 mm. Por este motivo, en este vano se previó la elevación de la

punta con el auxilio de grúa para el remonte sobre la pila.



Figura 6. Nariz de lanzamiento.

La nariz se materializa mediante sendas vigas armadas doble T de canto variable alineadas con las vigas del tablero, y vinculadas cada 3.60 metros con diafragmas verticales en celosía con perfiles tubulares cuadrados y uniones bulonadas, y una celosía horizontal a nivel inferior para la recepción de las acciones horizontales.

Por su parte, y como se indicó anteriormente, para facilitar la salida suave de la cola del tablero empujado al paso por los balancines de apoyo en el parque se empleó una contranariz de unos 6 metros de longitud, con pendiente suave ascendente hacia el extremo trasero, y que en su unión con el tablero incorpora la viga transversal para la recepción de los gatos de tiro.



Figura 7. Contranariz en la cola del puente.

4.3 Balancines de deslizamiento y guiaderas.

La condición fundamental que han de satisfacer los balancines es la transmisión uniforme de la

reacción vertical durante el avance en la longitud establecida en proyecto, que en nuestro caso es de 1.75 metros. Existen también otras condiciones importantes, como el rozamiento en las almohadillas antes indicado o la capacidad de giro, que se estableció en un mínimo de 18 miliradianes más la pendiente del tablero.

Para la concepción de los balancines se analizaron dos tipologías fundamentales. La primera de ellas corresponde a balancines uniaxiales como el mostrado en la figura 8.



Figura 8. Balancín uniaxial analizado.

Sin embargo, en nuestro caso la longitud requerida en los balancines exigía unas dimensiones desproporcionadas en las ménsulas para garantizar la rigidez requerida en la transmisión uniforme de la carga. Cuando la longitud del balancín es importante esta tipología conduce a una concentración significativa en la zona central. Por este motivo, se analizó el empleo de balancines triaxiales como los que se muestran en la figura 9, que son los que finalmente se emplearon. Solo en algunas alineaciones del parque y en el estribo 1, donde las reacciones durante el avance son pequeñas, se emplearon algunos balancines uniaxiales disponibles por la empresa suministradora de los equipos, Mk4. La concepción de los balancines triaxiales con tres bulones proporciona un reparto significativamente uniforme de la reacción en su longitud. La rótula central garantiza el reparto de la carga al 50% sobre cada una de las dos pistas superiores, y la longitud y altura de cada una de ellas proporciona además la rigidez necesaria para un reparto uniforme.



Figura 9. Balancín triaxial empleado en el empuje.

En cuanto a las guideras transversales, la capacidad lateral para el diseño se estableció en 1130 kN en ELU aplicadas a nivel de la platabanda inferior del tablero, y todas ellas son guías pasivas regulables. No obstante, en el estribo se dispuso una guía activa regulable diseñada con una capacidad mayor, de 1470 kN en ELU, al objeto de disponer de capacidad de actuación sobre la posición del tablero en dicho punto, a la salida del parque. Todas las guideras se mantuvieron ajustadas al tablero en los periodos comprendidos entre fases sucesivas de empuje, pero en cada fase del tablero se liberaban con una holgura 20 mm, que es la tolerancia transversal establecida para el guiado en la ejecución, y solo se mantenían ajustadas dos de ellas determinadas previamente en los análisis realizados de la respuesta horizontal del puente durante el avance sometido a las fuerzas de tiro, los rozamientos en los apoyos y el viento de construcción.



Figura 10. Guidera transversal y balancín.

5. Desarrollo y control del proceso.

5.1 Pruebas previas en parque de empuje.

Dada la importancia de la seguridad a “patch loading” de las almas durante el proceso de empuje, es necesario incorporar en la ejecución un control efectivo de las reacciones verticales en los apoyos durante el empuje. Dado que la instrumentación en tiempo real de todos los balancines o el empuje sobre gatos instrumentados incorporados a los apoyos requería un enorme número de dispositivos, la decisión adoptada fue realizar el pesaje de las reacciones en los apoyos al término de cada fase de lanzamiento, pero realizar además previamente al inicio de los lanzamientos una serie de pruebas y simulaciones de carga con gatos en el parque de empuje. El planteamiento es similar al ya realizado en su momento para el viaducto sobre el Arroyo de las Piedras, con excelentes resultados, y que se describe en la referencia [1].

Así, una vez lista para el empuje la primera fase del tablero se realizaron las actuaciones siguientes en el parque de empuje:

- Pesaje del tramo, reacción en balancines y deformada del tablero.
- Aplicación de carga en uno de los apoyos de la alineación central del parque hasta su descarga y levantamiento controlado, evaluando con ello la rigidez a torsión del tablero.
- Aplicación de carga para levantar los dos apoyos de la alineación central del parque para evaluar la rigidez longitudinal del tramo.
- Contraste de la respuesta del alma mediante la aplicación de carga con gatos en una longitud igual a la de los balancines.
- Similar a la anterior pero con gatos centrados en rigidizador vertical.
- Finalmente, simulación con gatos de la posición de empuje con máximo voladizo.

Para estas tres últimas pruebas las almas y rigidizadores de las secciones de control se instrumentaron con bandas extensométricas en

la altura del alma, y micrómetros para la medida del desplazamiento transversal. Asimismo, para las pruebas sobre rigidizadores la aplicación de la carga se realizó también de modo excéntrico al plano del alma, al objeto de contrastar la incidencia de una posible entrada excéntrica de la carga, debida a una eventual desalineación en la platabanda inferior u otras causas.



Figura 10. Gatos e instrumentación para las pruebas.

Las cargas aplicadas se establecieron para cubrir los valores máximos previstos en el empuje, y los resultados de las pruebas fueron muy satisfactorios:

- Se observó un sobrepeso del 5%, que se consideró un valor razonable.
- La rigidez longitudinal y transversal obtenida en las pruebas correspondía muy bien a la obtenida en los modelos de cálculo. La correspondencia en la rigidez longitudinal fue completa, y en la transversal se observó un valor moderadamente superior (30%) al teórico, lo cual se consideró razonable dada la configuración del tablero durante las pruebas.
- La tensión vertical máxima en las almas del tablero o en los rigidizadores verticales reportada por la instrumentación es de 85 MPa, salvo en la posición de máximo voladizo, donde alcanzó 180 MPa en el ala del rigidizador vertical directamente cargado. Estos valores se obtienen con aplicación excéntrica de la carga.
- Las deformaciones transversales del alma fueron muy pequeñas, con valores irrelevantes en las pruebas con carga en rigidizador, e inferiores a 3 mm para carga sobre alma exenta.

- En ningún caso se observó la entrada en regímenes que pudieran manifestar estados próximos al agotamiento estructural.

Las conclusiones de todo ello relevantes para la ejecución del empuje y su control son dos:

- El incremento de reacciones en los balancines que pudiera motivar el sobrepeso del tablero o eventuales desnivelaciones de los apoyos quedaba claramente cubierto por el factor adicional 1.30 considerado en el control a patch loading de las almas durante el empuje.
- La respuesta observada en las almas y rigidizadores en todas las pruebas realizadas mostró un comportamiento totalmente estable, sin ningún signo exterior alarmante.

Pensamos por tanto que, en ausencia de un control continuo efectivo durante el empuje, las pruebas de carga en parque previas al lanzamiento que se han descrito son una herramienta excelente para calibrar la magnitud de las eventuales desviaciones que puedan producirse durante el empuje, y a la vez testar directamente la respuesta de las almas del tablero durante el empuje.

5.2 Ejecución y control del proceso.

El proceso de empuje se realizó en las seis fases de lanzamiento descritas. En todos los avances se controló en tiempo real la alineación del tablero, tomando la posición en planta y alzado de la punta de la nariz. Asimismo, a lo largo de todo el proceso se controló la fuerza de empuje aplicada, al objeto de detectar posibles bloqueos durante el empuje. Se estableció un punto de parada en el caso de detectarse fuerzas de empuje superiores al 10% de la fuerza teórica, o bien un desequilibrio de fuerza del 10% entre los dos gatos de tiro, si bien nunca se llegó a estas situaciones, con rozamientos sensiblemente inferiores al 6.5% establecido en los análisis.

Complementario al control de fuerzas de empuje indicado, se realizaba el control de desplazamientos horizontales en las cabezas de pila. Un acodamiento local en el deslizamiento sobre una pila puede proporcionar una fuerza

que no resulte globalmente alarmante en los gatos de empuje, pero sí puede comprometer individualmente a una pila. Por ello se dispusieron clinómetros en todas las pilas con lecturas en tiempo real, que se complementó con control topográfico convencional. Se establecieron en todos los casos valores de parada tanto para la flecha horizontal en cabeza de pila. Como experiencia durante el proceso señalamos que el control directo de flechas en las cabezas de pila es apropiado y fiable en el caso de pilas de cierta altura, en las que la flecha de control alcance al menos valores próximos al centímetro, y en todo caso superiores a 5 mm. En caso contrario pensamos que lo más adecuado es el control continuo por personal debidamente formado que vigile la ausencia de acodamientos o problemas locales en el empuje, y, si se considera necesario, el empleo de bandas extensométricas en algunas armaduras de base de pila si la situación lo requiere.



Figura 11. Llegada del frente de la nariz a pila.

Otro aspecto fundamental en el desarrollo del proceso de empuje es la entrada del frente de avance sobre cada pila. Ya indicamos anteriormente que la geometría inferior de la nariz delantera está diseñada para facilitar la entrada suave sobre las pilas durante el avance. Previamente a la realización del empuje se establecieron los valores teóricos de las flechas de llegada de la punta de la nariz a las pilas, y por tanto la holgura prevista entre la cara inferior de la punta de la nariz y los apoyos provisionales. Asimismo, se indicó también la posición

respecto a la punta de la nariz en la que teóricamente se preveía que la nariz hiciera contacto con el balancín. Los valores se establecieron considerando las acciones térmicas y sin considerarlas, entendiendo que, en general, la situación real en obra debería encontrarse entre ambas. Como excepción, ya indicamos anteriormente que el remonte en la P9 del voladizo del vano principal se realizó con el auxilio de una grúa. Con carácter general, la llegada del tablero a todas las pilas se realizó normalmente y dentro del rango de valores de flechas esperado, y también el remonte con la grúa se realizó con una reacción algo inferior a la prevista, al serlo también la flecha debido a la presencia de moderados efectos térmicos. El empleo de la nariz delantera para el empuje se reveló como un sistema eficaz para el empuje.

Finalmente, una vez terminada cada fase de empuje se procedió al pesaje de la reacción en aquellos apoyos que se consideraban condicionantes por tener una reacción próxima a los valores máximos de diseño del propio apoyo o del alma, si bien el número de apoyos a controlar en cada caso se estableció generosamente al objeto de disponer de datos suficientes para poder mantener controlado el proceso. De modo similar, se tomaba por topografía la flecha de todos los centros de vano a lo largo del tablero. Ambos valores, reacciones y flechas, se contrastaron con los valores teóricos, siempre con buenos resultados y variaciones sin significación estructural o con posibilidades de interpretarse correctamente.

Una vez terminado el proceso de empuje se procedió a completar el sistema inferior de hormigón en la zona próxima al estribo 1, y se realizó el descenso controlado del tablero a su rasante definitiva, retirada de balancines y colocación de los apoyos esféricos definitivos.

Referencias

- [1] Millanes, F., Pascual, J. & Ortega, M. (2007) Viaducto Arroyo las Piedras. Primer viaducto mixto en las LAV españolas, *Hormigón y Acero* 243.