

Puente de La Concordia. Proceso constructivo

La Concordia bridge. Construction process

Pablo Loscos Areoso^a, Juan José Sánchez Ramírez^b, Carlos Bajo Pavía^c, Francisco Millanes Mato^d, Jesús Martín Suarez^e, Juan Luis Mansilla Dominguez^f, Pablo Solera Pérez^g

^aIngeniero de Caminos, Canales y Puertos. Ferrovial Construcción. Coordinador de Proyectos de Estructuras de Obra Civil.
ploscos@ferrovial.com

^bIngeniero de Caminos, Canales y Puertos. Ferrovial Construcción. Jefe de Departamento de Estructuras de Obra Civil.
j.j.sanchez@ferrovial.com

^cIngeniero de Caminos, Canales y Puertos. Ferrovial Construcción. Jefe de Área de Estructuras de Obra Civil.
carlos.bajo@ferrovial.com

^dDoctor ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. IDEAM S.A. Presidente. fmillanesmato@gmail.com

^eIngeniero de Caminos, Canales y Puertos. TYLin. Director de la división de Inspecciones, Mantenimiento y Asistencias Técnicas.
jesus.martin@tylin.com

^fIngeniero de Caminos, Canales y Puertos. TYLin. Jefe de proyectos sénior. juanluis.mansilla@tylin.com

^gIngeniero de Caminos, Canales y Puertos. TYLin. Jefe de proyectos sénior. pablo.solera@tylin.com

RESUMEN

La construcción del puente de La Concordia sobre la autopista M-12, en Madrid, comprendió una serie de fases, cada una de las cuales, por su complejidad, requirió de un cuidadoso estudio estructural y constructivo. Si bien la etapa más emblemática fue el traslado del tramo central de la estructura mediante el uso de plataformas modulares autopropulsadas, el resto de fases constructivas implicó la integración de elementos permanentes de acero y hormigón, que pasaron por numerosos esquemas estáticos de necesaria evaluación, con elementos temporales de diferente naturaleza que han debido ser diseñados para su utilización en este puente, tales como cimbras cuajadas, torres de apeo o bancadas porticadas.

ABSTRACT

The construction of *La Concordia* bridge over the M-12 motorway in Madrid involved a series of stages, each of which, due to its complexity, required careful structural and constructive study. Although the most emblematic stage was the relocation of the central part of the structure using self-propelled modular transporters, the rest of the construction phases involved the integration of permanent steel and concrete elements, which went through numerous static schemes that required evaluation, with temporary elements of different nature that had to be designed specifically for this bridge, such as regular formwork systems, temporary towers or portal frame benches.

PALABRAS CLAVE: Puente de La Concordia, cimbra, bancada, hormigonado, montaje, arco.

KEYWORDS: *La Concordia* bridge, formwork, bench, pouring, assembly, arch.

1. Introducción

El nuevo puente de La Concordia, situado en Valdebebas sobre la autopista M-12 que da acceso al aeropuerto, consiste en un arco biempotrado de tablero intermedio de 162 metros de luz entre apoyos. Esta estructura se ha convertido en una referencia en ingeniería y arquitectura de la ciudad de Madrid. Su concepción vino condicionada por las limitaciones de los servicios afectados, la preocupación estética y la eficiencia estructural. El puente presenta una conexión innovadora entre el arco y el tablero denominada *diagrid*, una malla de acero que, combinada adecuadamente con los dispositivos de iluminación, otorga al puente una personalidad única.

El proceso constructivo del puente ha estado sujeto a condicionantes muy estrictos, tanto por debajo (tráfico de la autopista de acceso al aeropuerto M-12), como por encima del puente (autorización aeronáutica).

2. Concepción del procedimiento constructivo

La construcción del Puente de La Concordia ha sido posible gracias al desarrollo de procedimientos de ejecución innovadores que han potenciado la prefabricación de elementos en taller y fábrica, los ensamblajes en camp de obra y el movimiento y traslado de grandes cargas mediante diferentes elementos auxiliares combinados, tales como grúas, gatos hidráulicos de gran capacidad y plataformas móviles. Esta estrategia de montaje ha redundado en una mayor eficiencia constructiva, lo cual ha supuesto una significativa reducción de los plazos de ejecución, ha permitido minimizar la afección sobre la circulación de las vías que cruza

el puente y, ha reducido la contaminación ambiental en el entorno.

El principal concepto que marcó la concepción del proceso constructivo de la estructura fue la minimización del impacto que las diferentes fases constructivas pudiesen inducir al tráfico de la autopista M-12. Para ello fue necesario plantear el procedimiento idóneo para la consecución de tal propósito, y a partir de ahí, buscar en el mercado o diseñar todos los sistemas, equipamiento y elementos auxiliares que lo hiciesen posible, así como comprobar y reforzar en los casos necesarios los diferentes elementos que componen la estructura permanente.

En el punto siguiente se describen las principales fases que conformaron el proceso constructivo de la estructura hasta su puesta en servicio.

3. Desarrollo del proceso constructivo

3.1 Ejecución de cimentaciones

La construcción de la estructura comenzó con la ejecución de las cimentaciones de los cartabones o células triangulares de ambos extremos del puente (figura 1). Dichos cartabones constituyen un empotramiento para la estructura principal. Este empotramiento se materializa en el terreno mediante un par de fuerzas verticales de diferente magnitud y de sentido contrario, que deben garantizar la transmisión de todas las cargas, permanentes y variables, al terreno sin giros asociados significativos en las zonas de apoyo. Las reacciones, por tanto, han de ser introducidas en dos zonas diferenciadas con distancia suficiente para que el efecto del empotramiento no aumente en exceso la

compresión delantera y la tracción trasera asociada.

La zona delantera, bajo el vértice inferior de la célula triangular, recoge la compresión del citado par de fuerzas. Para recoger dicha carga vertical descendente se ejecutaron sendas zapatas ataluzadas, de 15 metros x 24.5 metros de planta, que transmiten la carga directamente al terreno. La tensión admisible del terreno bajo las zapatas se fijó en 0.45 MPa.

Para recoger la carga vertical ascendente de levantamiento que se produce en la zona trasera de la célula se dispusieron sendos cargaderos pilotados en los que los doce pilotes de 1.2 metros de diámetro dispuestos bajo cada uno de ellos deben ser capaces de trabajar a tracción mediante rozamiento con el terreno circundante.

En estado permanente, las reacciones ascendentes provenientes del tablero son compensadas por el peso propio del cargadero, de manera que los pilotes sólo reciben tracciones derivadas de las diferentes combinaciones de sobrecargas.

El diseño de la estructura asegura, por una parte, que los pilotes sólo están traccionados en presencia de ciertas combinaciones de cargas variables, y por otra parte, que las reacciones que llegan al estribo desde el tablero a través de las riostras sean siempre de signo ascendente, por lo que, una vez el puente se encuentra en servicio, es suficiente disponer apoyos inversos sobre la riostra, evitando así la necesidad de disponer apoyos bajo la misma.



Figura 1. Vista general de las cimentaciones del puente

3.2 Ejecución de los cartabones

Una vez concluidas las cimentaciones directas delanteras, así como los pilotes y cargaderos traseros, se ejecutaron los cartabones de hormigón, que constituyen las células de empotramiento de la estructura y son, por tanto, los elementos encargados de transmitir las reacciones a las cimentaciones. Para la ejecución de los mismos, fue necesaria la instalación de una cimbra cuajada (figura 2), diseñada convenientemente para resistir y transmitir al terreno el peso del hormigón a través de los planos inclinados que dan forma a la cara inferior del citado cartabón.



Figura 2. Vista general de la cimbra cuajada colocada para la ejecución del cartabón de hormigón

Se ejecutaron de esta manera la losa inferior, la losa superior, los cuatro muros verticales que comunican ambas losas, la riostra de estribo, el mamparo situado sobre el eje de apoyos de la zapata y el pequeño arranque de hormigón del que partirá la estructura metálica (figura 3).



Figura 3. Vista general del cartabón hormigonado sobre la cimbra

3.3 Ejecución de arranques metálicos en voladizo y tesado de muros

La estructura metálica que arranca en voladizo desde la parte delantera de los cartabones se instaló de forma modular sobre tres líneas de apeos provisionales dotados de capacidad de regulación en cota (figura 4). Especial relevancia merece la cuidadosa atención prestada al replanteo de cada módulo, de manera que la cara frontal de los arranques presentase una geometría lo más ajustada posible a la posición teórica, ya que posteriormente, el tramo central habría de apoyarse primero y soldarse después, sobre estos elementos.

Desde el punto de vista resistente, esta fase hubo de ser cuidadosamente estudiada, ya que la introducción de cargas puntuales en estructuras de chapa metálica requiere de un especial cuidado a la hora de definir los detalles de rigidización necesarios para evitar fenómenos de plastificaciones locales en las zonas sobre las torres de apoyo.



Figura 4. Vista general de las torres de apeo de los arranques metálicos

Una vez completada la fase anterior, se realizó el tesado de los tendones previstos en los cuatro muros del cartabón de hormigón, conectados y anclados en las cuatro almas de la

sección metálica del tablero. Como se verá más adelante, una segunda familia de tendones se tesará una vez se concluya la ejecución de todos los elementos estructurales del puente.

3.4 Descimbrado de cartabones y arranques

El proceso de desapeo del cartabón y los arranques metálicos requirió un estudio estructural cuidadoso en el que se tuvieron en cuenta las diferentes rigideces de los elementos de la estructura permanente y de los elementos de ambas cimbras, cuajada en el caso del cartabón y compuesta por torres en el caso de los arranques. Se estudió la secuencia de desapeo fase a fase para garantizar la integridad estructural de todos los elementos provisionales y definitivos en cada etapa.

La capacidad de ajuste de las torres sobre las que descansaban los arranques metálicos facilitó en gran medida el proceso de desapeo y consecuente puesta en carga de esta parte de la estructura.

3.5 Ejecución de muros auxiliares en ambos extremos

Alrededor de los cartabones y en los desembarcos del puente se ejecutaron una serie de muros auxiliares, algunos de ellos con fines únicamente estéticos y otros necesarios además para materializar los accesos a la propia estructura (figura 5).

Para el primer propósito se ejecutaron una serie de muros laterales y frontales en ambos estribos que parapetan la parte trasera del cartabón, a modo de empotramiento visual de la estructura dentro de los mismos.

Los alzados de todos estos muros son prefabricados y trasladados a obra para su colocación sobre las cimentaciones, que se realizaron en hormigón in situ una vez colocados los alzados, garantizando así la correcta transmisión de esfuerzos entre alzado y cimentación.



Figura 5. Vistas generales de la instalación de los muros laterales y el estado final del estribo 1

En el caso del estribo 2, se ejecutó una rotonda elevada constituida por los muros prefabricados descritos previamente, dentro de la cual se encuentra el cargadero pilotado que contrarresta la reacción de levantamiento comentada en puntos anteriores (figura 6). Los muros, de unos 12 metros de altura vista, describen la planta circular de la rotonda mediante paneles planos de un metro de ancho con contrafuertes.



Figura 6. Vista de la rotonda de acceso al estribo 2 del puente

3.6 Ensamblaje en campa de tramo central metálico (*bow-string*)

En paralelo a la ejecución de los cartabones de hormigón en obra y los muros asociados, se fabricó en taller metálico la estructura de acero del tramo central del puente (figura 7), dividida en subelementos que son transportados a la obra para su montaje final sobre apeos provisionales en campa mediante grúas.



Figura 7. Trabajos de ensamblaje de la estructura metálica en taller

La ejecución de la estructura metálica se desarrolló gracias a un importante trabajo de ingeniería de taller y control tanto interno como externo. Para ello se realizó un modelado tridimensional, conjuntamente con delineación detallada de las dovelas, que quedaron plasmadas en los denominados planos de taller. Se definieron y justificaron los procedimientos de fabricación, transporte y montaje en obra. Se aplicaron sistemas BIM en el diseño y la ejecución de la estructura, una forma de trabajo que ha permitido a todo el personal involucrado en el proyecto trabajar de manera colaborativa, con un intercambio de información entre todas las partes fiable, transparente y actualizado en tiempo real.

El control externo de materiales, procesos, homologaciones y ensayos no destructivos se realizó de manera exhaustiva por parte de la constructora a través de personal especializado contratado por la obra para tal fin, en colaboración con sus servicios de ingeniería y con la dirección de obra y el diseñador de la estructura.

En otro artículo de este congreso se desarrollan con mayor profundidad todos los aspectos relevantes de la fabricación y montaje

de los distintos elementos que componen la estructura metálica de este puente.

El ensamblaje de los tramos metálicos que llegaban a la campa se realizó con la ayuda de cinco bancadas o pórticos metálicos formados por cuatro pilares y un dintel, sobre los que se dispusieron una pareja de cilindros telescópicos para poder ajustar las piezas en altura (figura 8). El montaje comprendió toda la estructura metálica de tablero, el arco y el *diagrid* delimitada por los nudos de conexión entre el arco y el tablero.



Figura 8. Pórticos de apeo en campa

El tablero se ensambló en cuatro tramos longitudinales, los cuales se dividieron a su vez en tres partes transversales: tramo central y voladizos (figura 9).



Figura 9. Ensamblaje del tablero en campa

El arco por su parte se ensambló en tres tramos longitudinales, los dos que se conectan con el tablero, y el tramo central de cierre en clave (figura 10).

El ensamblaje de los tramos, tanto de tablero como de arco, requirió de un control topográfico exhaustivo, y de una serie de elementos de tiro que facilitasen de forma activa la correcta presentación de todas las chapas que se debían unir, de manera que todas las uniones soldadas se pudiesen ejecutar dentro de las tolerancias fijadas.



Figura 10. Ensamblaje del arco en campa

El *diagrid* se instaló a continuación, con la precaución de dejar sin conectar algunos de sus elementos para evitar fenómenos de pandeo durante las maniobras de traslado y colocación. Adicionalmente se añadieron una serie de refuerzos que comunicaban directamente el arco con el tablero, con el objeto de absorber las compresiones producidas por los esquemas estáticos que atravesaría el tramo central durante la citada maniobra (figura 11). Dichos esquemas estáticos diferentes del final, suponían dejar parte del arco-tirante en voladizo, lo cual inducía compresiones en parte del *diagrid* que era necesario recoger temporalmente.



Figura 11. Ensamblaje del *diagrid* con sus refuerzos

3.7 Maniobra de colocación del tramo central metálico sobre los arranques.

El tramo central del puente presentaba 128,65 metros de largo, 24,5 metros de ancho y pesaba unas 2.400 toneladas. Dicho peso se alcanzó tras hormigonar la zona central de la losa superior del tablero, una vez completado el ensamblaje según lo descrito en el punto anterior. El hormigonado se localizó en los 5 metros centrales de la sección transversal, y a todo lo largo del tablero, de manera que quedase constituido el tirante principal de la estructura a trasladar. Posteriormente se desarrolló la maniobra de traslado y montaje en su posición definitiva.

El posicionamiento de este tramo central sobre los arranques del tablero, ejecutados previamente en ambos márgenes de la autopista, se realizó mediante una compleja maniobra de traslado sobre plataformas autopropulsadas (Self-Propelled Modular Transporters o SPMT's, figura 12) durante un corte total de la M-12 que duró cuatro días.

La maniobra comprendió diferentes etapas, que se describen en otro artículo de este congreso, y que para su completo desarrollo requirieron del uso de una serie de equipos de elevación y traslación de grandes cargas durante la misma.



Figura 12. Equipos de elevación y plataformas modulares autopropulsadas

Se trata de un procedimiento sin precedentes a nivel nacional, en el que el elemento a trasladar fue pasando por diferentes esquemas de apoyo mediante una serie de

transferencias de carga entre los equipos de elevación y transporte utilizados, de manera que la estructura permaneciese siempre apoyada en dos ejes transversales y al mismo tiempo se pudiesen salvar todos los obstáculos presentes en la trayectoria de desplazamiento, especialmente los taludes de excavación de la campa de ensamblaje y una calzada elevada con sus taludes (figura 13).



Figura 13. Maniobra de traslado y colocación del tramo central de la estructura

La maniobra concluyó con el apoyo del tramo central sobre los arranques a través de unos elementos auxiliares dispuestos en los extremos del tramo central, denominados perchas, que hicieron contacto sobre sendas parejas de aparatos de apoyo elastoméricos dispuestos sobre los arranques.

Posteriormente se ejecutaron las uniones entre los arranques y el tramo central mediante la soldadura de cupones o carretes que conectaban cada una de las chapas de la sección transversal.

3.8 Ejecución de los hormigones de relleno del arco y de las losas del tablero

Una vez colocado el tramo central en su ubicación definitiva, se ejecutó el vertido del hormigón en el interior del arco, en la losa superior y en fondo del tablero.

Rellenar el arco de hormigón permitió reducir sus espesores de acero, a la vez que se dotó al arco de mayor rigidez y resistencia a compresión. El proceso de hormigonado se realizó en 6 fases simétricas y una última fase

central, comenzando en arranques y terminando en clave (figura 14).

Los refuerzos instalados en el *diagrid* para la maniobra de traslado fueron de utilidad también en esta fase, ya que redujeron el trabajo longitudinal del arco con sección metálica pura en el momento de recibir el peso del hormigón fresco. Dichos refuerzos se retiraron al final del proceso constructivo, una vez todos los elementos de hormigón del puente hubiesen alcanzado una resistencia suficiente como para garantizar el trabajo como sección mixta de todos ellos.



Figura 14. Fases del hormigonado de relleno del arco

Por otra parte, para controlar las tensiones locales introducidas por las presiones del hormigón fresco sobre las chapas del arco fue necesario diseñar un sistema de rigidización longitudinal y transversal en las caras interiores de las chapas del arco (figura 15).

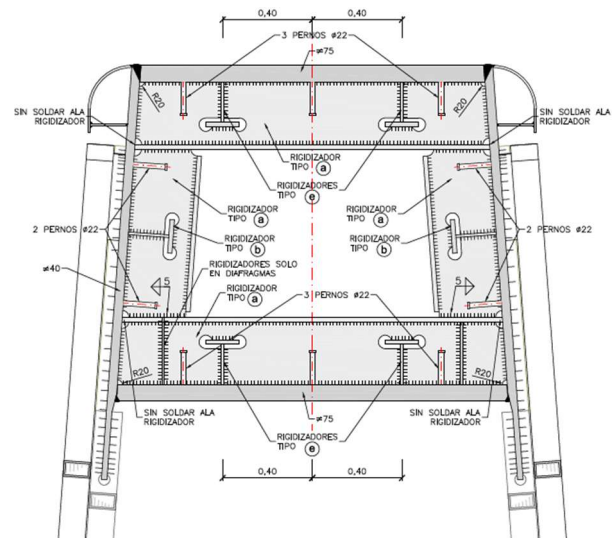


Figura 15. Rigidización interior del arco relleno de hormigón

El hormigonado de la losa superior del tablero se dividió en dos fases en sentido transversal. En primer lugar, se hormigonaron los 12.9 metros centrales de la sección transversal, es decir, 3.95 metros adicionales a cada lado de los 5 metros centrales que ya se habían hormigonado en el tramo central de la estructura objeto de la maniobra de traslado.

En una segunda fase se hormigonó el resto de la losa superior hasta completar los 24.5 metros de ancho de la sección transversal del tablero (figura 16).

Dichas fases de hormigonado transversal se desarrollaron, a su vez, en varias fases en sentido longitudinal.



Figura 16. Hormigonado de la losa superior del tablero

Para soportar y encofrar el vertido del hormigón de la losa superior del tablero se colocaron prelosas prefabricadas colaborantes apoyadas sobre la propia estructura metálica.

A continuación, se tesaron las familias restantes de torones de continuidad de la losa superior entre el cartabón de hormigón y la estructura metálica, con lo que toda la estructura permanente quedaba completamente ejecutada.

3.9 Ajustes de reacciones

La última fase constructiva de naturaleza estructural consistió en la realización de un control y posterior ajuste de las reacciones en los apoyos de la estructura. En primer lugar, se tomó medida de las reacciones en zapatas delanteras y apoyos inversos traseros, con la ayuda de la instrumentación dispuesta en algunos de los

apoyos definitivos de las zapatas y mediante puesta en carga de los gatos hidráulicos colocados en el eje de apoyos de los cargaderos pilotados. Posteriormente, se realizó el ajuste de reacciones de la estructura mediante la acción en dichos gatos.

El objetivo del ajuste de reacciones era dejar el puente en una situación estructural tal que las leyes de momentos de carga permanente coincidiesen con las que tendría la estructura, instalada en su esquema final, sometida a dichas cargas permanentes, eliminado así la huella del proceso constructivo. Una vez las reacciones fueron las deseadas, se ajustó la cota de los apoyos definitivos en los cargaderos mediante la interposición de chapas de acero del espesor requerido.

3.10 Instalación de acabados y prueba de carga

La obra del Puente de La Concordia finalizó con el montaje de los diferentes equipamientos, de la iluminación, de las juntas de dilatación, de los pavimentos para tránsito de vehículos y peatones, y del pretil urbano de la calzada.

La ejecución satisfactoria de las pruebas de carga estática y dinámica de la estructura permitió confirmar el correcto comportamiento del puente y, en consecuencia, su puesta en servicio.

La prueba estática se realizó en tres fases consecutivas. En la primera de ellas se cargó el tablero con una fila de doce camiones que completaban la longitud total de la estructura, situados en el voladizo izquierdo. En la segunda etapa se añadió otra fila de doce camiones simétrica a la anterior. En la tercera y última etapa, se retiraron los camiones de la primera fila, dejando los restantes doce en el voladizo derecho (figura 17).

La prueba dinámica se realizó también en tres fases, haciendo pasar dos camiones situados simétricamente en ambos voladizos a diferentes velocidades sobre el tablero en la primera fase, y

uno solo a lo largo de uno de los voladizos en las otras dos fases (figura 18).

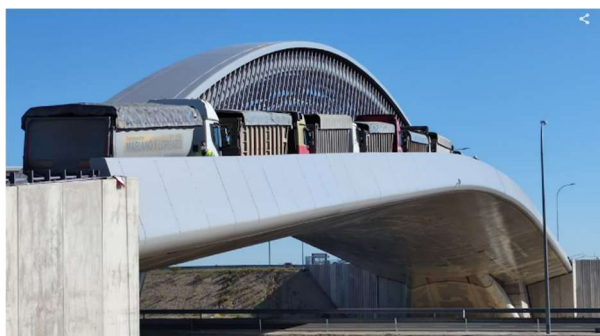


Figura 17. Prueba de carga estática



Figura 18. Prueba de carga dinámica

Agradecimientos

Además del grupo de autores del presente artículo, constituido por el equipo de los Servicios de Ingeniería de Ferrovial Construcción, en la función de asistencia técnica y diseñador del proceso constructivo, así como el equipo de TYLin (antes IDEAM) como diseñadores de la estructura permanente y Dirección de Obra, es necesario destacar la labor de todos los que hicieron posible el desarrollo de este complejo proceso constructivo con su esfuerzo y dedicación:

- Promotor: Junta de compensación de Valdebebas (Marcos Sánchez, Lisbeth Rodríguez, Antonio Menaya).
- Equipo de obra: Ferrovial Construcción: (Maximiliano Eisenberg, Enrique Corrochano, Félix García, Ángel Contreras, Eutiquio Montes, Beatriz Moreno, Carmen Cogollos, José Luis Ramos).

- Especialista en movimiento de grandes cargas: Mammoet (Rafael Martínez, David Arias).
- Especialista en postesado y equipamiento hidráulico: TECPRESA (José Manuel Peña, David Muñoz).
- Taller metálico: DIZMAR
- Especialista en elementos de cimbra: TECOZAM

Referencias

- [1] Comisión Permanente del Hormigón, Instrucción de Hormigón Estructural EHE-2008, Ministerio de Fomento, 2008.
- [2] Comisión Permanente de Estructuras de Acero, Instrucción de Acero Estructural EAE-2012, Ministerio de Fomento, 2012.
- [3] Comité Técnico CEN/T 053 Equipamiento para trabajos temporales de obra, Cimbras: requisitos de comportamiento y diseño general, 2008.
- [4] Comité Técnico CEN/T 053 Equipamiento para trabajos temporales de obra, Torres de cimbra fabricadas con componentes prefabricados: Métodos particulares de diseño, 2004.