

Nuevo Puente Arco Singular de Valdebebas

“La Concordia” outstanding arch bridge in Valdebebas

Francisco Millanes Mato^a, Miguel Ortega Cornejo^b, Daniel Martínez

Agromayor^c, Jesús Martín Suarez^d, Pablo Perez Solera^e, Lorenzo Fernández Ordóñez^f y

Francisco Domouso de Alba^g.

^aPresidente. IDEAM. Doctor Ingeniero de Caminos, C. y P. TYLin.

^bMáster Ingeniero de Caminos, C. y P. TYLin. Director General. miguel.ortega@tylin.com

^cMáster Ingeniero de Caminos, C. y P. TYLin. Director de Departamento de Puentes. daniel.martinez@tylin.com

^dMáster Ingeniero de Caminos, C. y P. TYLin. Director de División de Inspecciones y AT. jesus.martin@tylin.com

^eMáster Ingeniero de Caminos, C. y P. TYLin. Jefe de Proyecto Senior. pablo.solera@tylin.com

^fMáster en Arquitectura. Estudio Guadiana. lfo@estudioguadiana.com

^gDoctor en Arquitectura. francisco.domouso@universidadeuropea.es

RESUMEN

El puente de la Concordia, con una luz de 162 m, está llamado a convertirse en uno de los hitos más relevantes de Madrid. Su concepción se rigió por las limitaciones de los servicios circundantes, la preocupación estética y la eficiencia estructural. El resultado es un arco de acero con tablero mixto, cuya forma inspirada en el diseño industrial, se funde con la Terminal T4 del Aeropuerto de Barajas. El puente también muestra una conexión innovadora entre el arco y el tablero: diagrid, una malla de acero que, combinada adecuadamente con los dispositivos de iluminación, dota al puente de una personalidad única.

ABSTRACT

“La Concordia” Bridge, with a 162 m span, is due to become one of Madrid’s most relevant landmarks. Its conception was governed by the surrounding services constraints, aesthetical concern and structural efficiency. The result is a bowstring steel arch with composite deck, whose shape inspired in industrial design, blends with Barajas Airport’s T4 Terminal. The bridge also displays an innovative connection between arch and deck: diagrid, a steel mesh which, adequately combined with the lighting devices endows the bridge with unique personality.

PALABRAS CLAVE: Viaducto urbano, viaducto mixto, iluminación, diagrid, Valdebebas, Concordia.

KEYWORDS: Diagrid, bowstring, lighting, industrial design, diagrid, Valdebebas, Concordia.

1. Introducción

En marzo de 2007, los más renombrados ingenieros de puentes españoles fueron convocados a un concurso de exclusividad para

un puente singular que conectará la nueva área urbana de Valdebebas con la Terminal T-4 del aeropuerto de Barajas. El puente tiene una luz

aproximada de 162 m sobre la carretera M-12 sin ningún apoyo intermedio para no condicionar hipotéticas operaciones de ampliación de la carretera. Las restricciones de gálibo vertical, relativas a la carretera M-12, así como a las prescripciones aeronáuticas, también eran muy estrictas.

La licitación no se rigió por parámetros estrictamente funcionales o estructurales, estando muy influenciada por el entorno donde se llevaría a cabo el emprendimiento, el plan de desarrollo urbanístico "Parque de Valdebebas". Por lo tanto, el puente es llamado a convertirse en un referente urbano de primer orden, en la tarjeta de visita de Valdebebas y también en un acceso a la terminal T-4 desde el nuevo área urbana en el Parque de Valdebebas. El objetivo es diseñar un puente singular y con la suficiente personalidad como para destacar entre hitos urbanos y arquitectónicos como la Nueva Ciudad de la Justicia de la Comunidad de Madrid, la nueva Ciudad Deportiva del Real Madrid, la ampliación del Recinto Ferial y la propia terminal T-4, diseñada por los prestigiosos estudios de arquitectura Lamela y Richard Rogers.

La propuesta de IDEAM (en la actualidad TYLin), bajo la coordinación de un equipo de ingenieros y arquitectos, finalmente ganó la licitación (figura 1). El proyecto de construcción se llevó a cabo en 2008. Las obras comenzaron en 2016 y finalizaron en 2021.



Figura 1. Render de la propuesta ganadora con vista en alzado

En este artículo se describen las principales singularidades del proyecto y construcción del Puente "La Concordia".

2. Diseño conceptual

Urbano, ambicioso en su diseño, innovador en sus materiales, concepción formal, tipología

estructural y proceso constructivo, el puente diseñado fué concebido como un objeto y, como tal, como un icono representativo del emprendimiento.

El puente se presenta deliberadamente con líneas claras y precisas, más cercanas a los diseños industriales de Roger Tallon o a los de la industria aeronáutica que a las tipologías estructurales típicas de un vano de 162 m.

La influencia del aeropuerto nunca se omitió: inspiró la forma aerodinámica del puente, la concepción del tablero como un caparazón, la elección de la pintura de aluminio galvanizado que confiere a la estructura un aspecto similar al techo de la terminal T-4 (figura. 2).



Figura 2. Render del puente frente a la Terminal T4 del Aeropuerto de Barajas

Al mismo tiempo, el puente se inspira en una concepción estructural potente y completa, de la que derivan sus principales virtudes: claridad, simplicidad formal, pureza estructural y geometría dinámica, sugerente y atractiva.

La forma del puente, de carácter geométrico muy peculiar, casi aeronáutico, evoluciona a partir de una sección en T invertida (figura 3), asociada a una tipología de arco inferior poco profundo (bow-string), un esquema clásico que permite salvar grandes luces sin transmitir fuerzas de empuje horizontales a las cimentaciones.

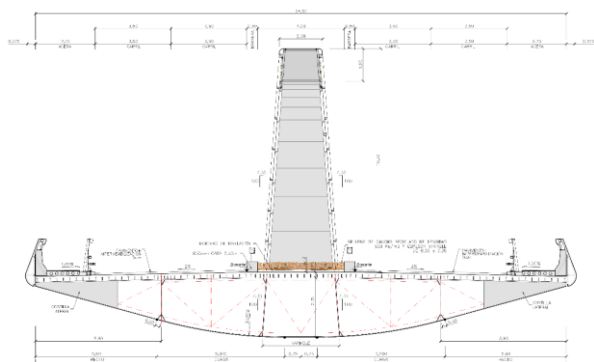


Figura 3. Sección transversal del puente

El aspecto formal más relevante y singular del diseño está formado por una doble rejilla (figura 4), una malla estructural permeable, que conecta el tablero con el arco y, como plano de gran rigidez, materializa el entramado enrejado de una viga de canto variable. El diagrid consta de un doble plano a cada lado de la columna vertebral de la estructura, creando así una malla offset de cuatro planos que, además de garantizar la transparencia visual, dota a la estructura de un carácter dinámico, generando luces y sombras que reverberan y enriquecen con diferentes matices la percepción visual que surge de las diversas perspectivas, tanto de día como de noche.

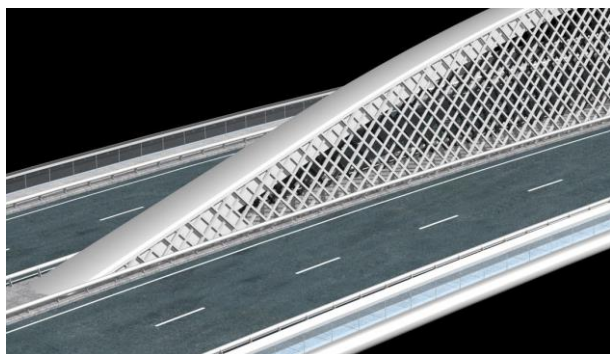


Figura 4. Vista detallada de la doble Diagrid en la conexión arco-cubierta

La estructura de malla, diagrid, crea una silueta lateral similar a la fachada de un edificio. Además, la forma es totalmente eficiente, desde el punto de vista estructural, sin accesorios ornamentales superfluos. Su diseño estructural es esencialmente ortodoxo.

La vista en alzado de la estructura es imponente y reconocible, inspirada en una tipología estructural clásica y ortodoxa. Como resultado de estas dos corrientes, surge un

diseño innovador: atractivo arquitectónico combinado con eficiencia estructural.

La luz que, durante el día, atraviesa la malla de cuatro planos (figura 5), multiplica, en función de la intensidad lumínica y del punto de vista del conductor o del peatón, el rico juego de transparencias, luces y sombras que proyecta la celosía, en un efecto que recuerda e inspira las creaciones escultóricas de Eusebio Sempere.



Figura 5. Vista general de la estructura durante la construcción

Por la noche, la fachada de cuadrícula se convierte en la referencia del puente. El puente está tenuemente iluminado y, al encontrarse las lámparas entre los planos de la cuadrícula, la luz está contenida dentro de la jaula creada por él.

La iluminación se mejora mediante farolas de buen diseño y alta calidad situadas a lo largo de las aceras. Además, varios puntos de luz exterior iluminan la cara inferior del tablero y la transición del arco hacia el estribo. Esta iluminación ornamental, tenue y sugerente, debidamente calibrada en potencia y orientación, perfilan los diferentes volúmenes, superficies y líneas, realzando así el puente dentro de su complejo entorno (figura 6).



Figura 6. Maqueta con iluminación nocturna

3. La solución estructural

A pesar del innovador diseño formal de la propuesta y de su planteamiento arquitectónico, poco habitual en el ámbito de los puentes, este diseño es la consecuencia de una concepción estructural ortodoxa en la que, como se ha explicado, todos sus elementos proceden de un esquema estructural optimizado, y donde se han eliminado los elementos ornamentales o superfluos. La incidencia formal y el carácter arquitectónico de esta propuesta se derivan del orden y tratamiento del diseño de los elementos portantes.

3.1 Respuesta estructural

El esquema estructural longitudinal puede interpretarse de dos maneras [2] que sólo representan dos enfoques diferentes de un mismo concepto estructural:

- Los 156 m de luz, aparentemente (o visualmente) largos, equivalentes a entre los apoyos ocultos de los estribos, se resuelven mediante un largo arco de acero con tablero mixto (o tirante) (figura 7). Los soportes de suspensión están inclinados, como en los arcos bowstring [1], pero en este caso, se sustituyen por una malla cuádruple 'diagrid' dispuesta en dos planos con secciones huecas rectangulares convencionales (RHS) en ángulos de 45° creando un plano de suspensión rígido que evita el pandeo del arco en el plano.

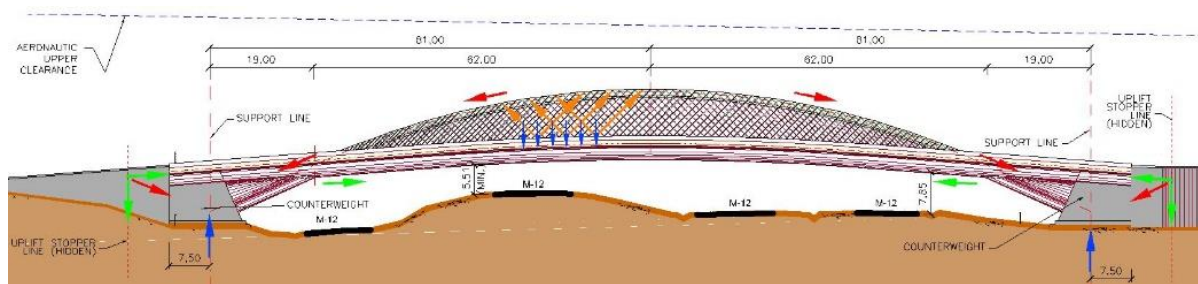


Figura 7. Comportamiento del arco

Las reacciones verticales de la cuerda del arco llegan al cartabón en el encuentro con el tablero, a 19 metros de las líneas de soporte. La reacción se puede proyectar en dos direcciones: una puntual de compresión a lo largo de la cara inferior del cartabón (que debe estar correctamente conectada a una cabeza inferior interior de hormigón, en doble acción compuesta) y una fuerza de tracción horizontal soportada por el tablero de acero. Este esquema se autoequilibra en una disposición tradicional de celdas triangulares: la fuerza de tracción superior se resiste mediante un tirante de hormigón pretensado anclado en el extremo del tablero mixto y oculto dentro de los estribos. Esta fuerza se puede dividir en dos: una fuerza vertical ascendente compensada por el contrapeso (anclado en el extremo del estribo), y un puntal de hormigón comprimido inclinado

que, dirigiéndose al apoyo del vano principal, cierra la celda transmitiendo la fuerza vertical resultante a una cimentación profunda.

Alternativamente, el esquema estructural puede explicarse desde un ángulo diferente: se diseña un vano doblemente empotrado de 162 m de longitud. En el centro de vano, la flexión positiva es resistida por una viga de canto variable con un alma enrejada (diagrid). El arco actúa como cabeza de compresión y el tablero, como tirante a tracción. En las zonas de flexión negativas, en los extremos, junto a los soportes, la losa del tablero el mixto soporta la tracción superior y el cartabón, con doble acción mixta, la compresión inferior. El momento de empotramiento, gracias al esquema de celdas triangulares (figura 8), es proporcionado por un corto vano de compensación oculto, cuya

reacción negativa extrema se equilibra con un contrapeso.

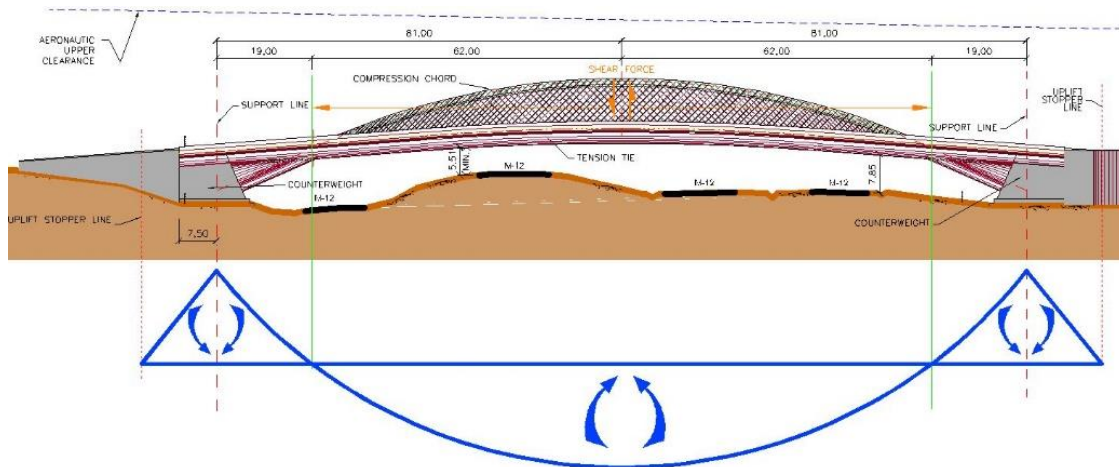


Figura 8. Comportamiento como viga empotrada

A pesar de que ambos enfoques estructurales de la explicación conceptual del diseño son correctos, el segundo (viga empotrada) es mejor para describir el comportamiento del puente frente a cargas vivas. El comportamiento como arco “bowstring arch with network hangers” entre los puntos de momento cero y un tablero apoyado sobre celdas triangulares supone que la estructura arco-tablero está articulada en su intersección o que el punto de momento cero de la viga de tres vanos (22,5+162+22,5) se encuentra justo allí. El arco y el tablero están conectados y, el punto de momento cero de la viga de canto variable se encuentra en la sección más reducida para una carga permanente.

Con el fin de optimizar el comportamiento de la estructura durante el proceso de montaje, una vez que el puente es continuo y antes de colocar las cargas muertas, se colocaron gatos para reajustar las reacciones. De este modo, es posible controlar la posición del punto de momento cero de la viga de tres vanos, llevándola a la intersección del arco y el tablero (aproximadamente) y reduciendo la flexión en las secciones más débiles de la estructura. También se realizó un análisis dependiente del tiempo para obtener las redistribuciones, fuerzas

y reacciones después de un período de tiempo infinito.

3.2 Arco

Todo el tablero está suspendido del arco (figura 9), con una altura estructural de 10,30 m y una luz de 124 m (considerando solo el arco sobre el tablero), que da una relación de elevación/luz de 1/12, lo que indica que se trata de un arco reducido. La sección compuesta del arco (acero y hormigón) es casi rectangular, con dos salientes que sobresalen en la parte superior para sujetar los planos de 'diagrid'. El arco tiene una profundidad constante de 1,50 m y una anchura variable que oscila entre los 4,0 m al inicio y los 2,0 m en la corona. Está fabricado en acero S355J2, con máximo espesor en la corona y mínimo en el arranque. Visto en alzado, el arco sigue una curva circular de aproximadamente 150 m de radio y continúa en una tangente hasta el inicio. Por debajo del tablero, continúa hasta los soportes a medida que se ensancha y permanece unido al tablero, creando una estructura triangular volumétrica, de gran incidencia formal. La geometría del cartabón contribuye a distribuir la tensión de compresión transmitida desde el arco a los apoyos.



Figura 9. Elevación de la sección central del arco

3.3 Tablero

Consiste en una viga cajón hueca de acero multicelular de 3,0 m de canto (en su centro) sobre la que se apoya una losa de hormigón de 0,25 m de espesor (figura 10). Se utiliza acero S355J2, con un límite elástico de 355 N/mm². El fondo de la sección sigue una curva circular de 21,65 m de radio que se extiende tangente hasta los estribos. La sección transversal de la cubierta consta de 5 celdas mediante el uso de 4 almas. Para manejar fácilmente los elementos de la sección y fijar la 'el diagrid' a las redes interiores, estas últimas tienen la misma inclinación que dicho diagrid.

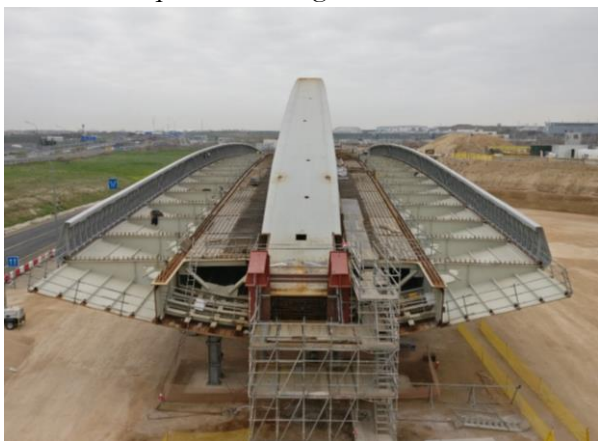


Figura 10. Sección transversal de la cubierta

Dentro de la sección y cada 5,0 m, las cerchas transversales se ubican de forma que los efectos de torsión derivados de las acciones excéntricas puedan ser transferidos al 'diagrid', que actúa como un plano de tirantes inclinados que desvían las cargas a lo largo del arco. El momento torsional, muy importante debido a la anchura del puente, se resiste en los 124 m

intermedios gracias a la alta rigidez torsional de la sección compuesta del tablero.

La rigidez a la torsión del tablero se evaluó, del lado de la seguridad, considerando diferentes hipótesis de fisuración debido a la tracción soportada por el tirante que constituye el tablero compuesto del puente.

3.4 Diagrid

El tablero está unido al arco por medio de una malla o celosía de tubos de acero de S355J2H denominada "diagrid". Su misión estructural es transferir las cargas verticales que actúan sobre el tablero desde el mismo hasta el arco. Por lo tanto, básicamente responde bajo tensión, ya que el esfuerzo cortante que podría tener que soportarse actuando como un alma de una sección en T invertida se reduce drásticamente por el componente inclinado a la compresión del arco, así como por la rigidez a la flexión del tablero. Cada malla 'diagrid' consta de dos familias coplanares de perfiles tubulares mutuamente perpendiculares dispuestas en ángulos de 45° con respecto al plano horizontal. Hay dos planos de "diagrid" a cada lado del arco (figura 11), uno en cada dirección.

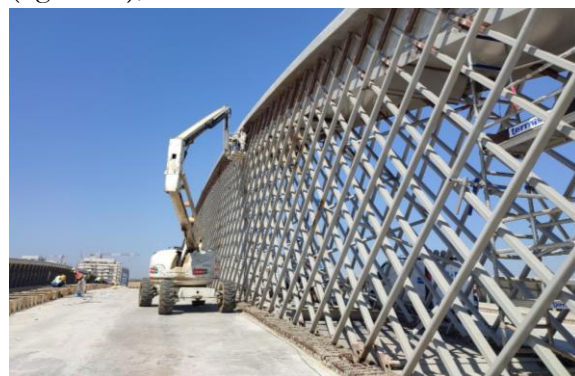


Figura 11. Montaje de diagrid

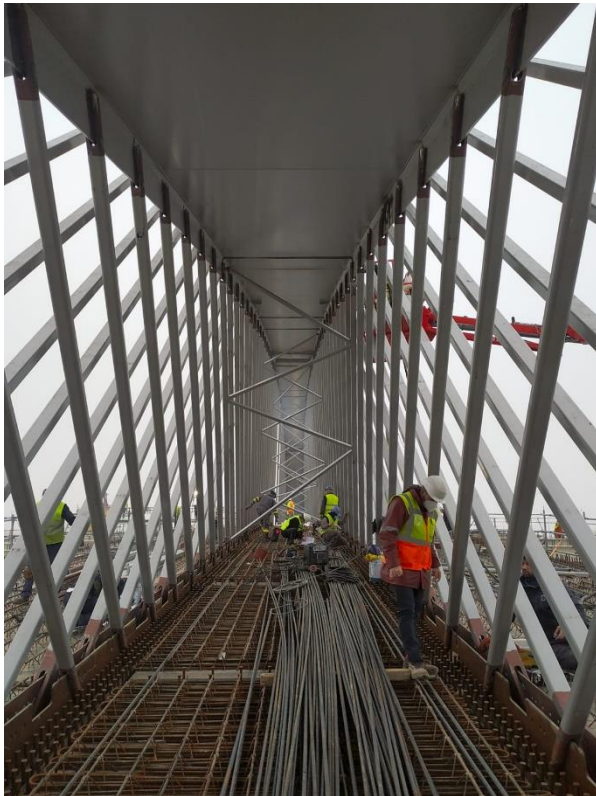


Figura 12. Diagrid interior

La rigidez de Diagrid dentro de su propio plano suprime cualquier problema de inestabilidad del arco en el plano. Del mismo modo, los dos planos de "diagrid" a cada lado del arco están arriostrados entre sí por medio de rótulas para evitar las vibraciones inducidas por el viento, como estabilizar los perfiles (figura 13). Estas cerchas son paralelas a la dirección de los tubos 'diagrid', evitando así interferencias visuales y de iluminación interior.

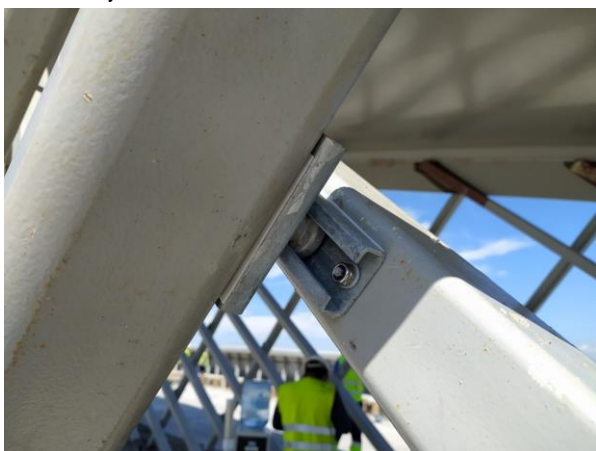


Figura 13. Elemento fijación entre perfiles tubulares del diagrid

3.5 Pilares y contrapesos

El puente está en equilibrio en su extremo colocando un contrapeso de hormigón a lo ancho del tablero. El equilibrio se logra en la parte superior del contrapeso (figura14). Las fuerzas actuantes son la tensión del tablero, la fuerza vertical del contrapeso y la compresión a lo largo del puntal de hormigón que une el contrapeso con la sección de apoyo del arco. Con el fin de facilitar la transmisión de esfuerzos, los metros finales del tablero, ocultos dentro de los estribos, se concibieron en hormigón pretensado, de tal manera que el tablero de acero (donde se conectan los cables de pretensado) transfiere adecuadamente su tensión. Además, se crea un nodo masivo en la cabeza del contrapeso (figura15).

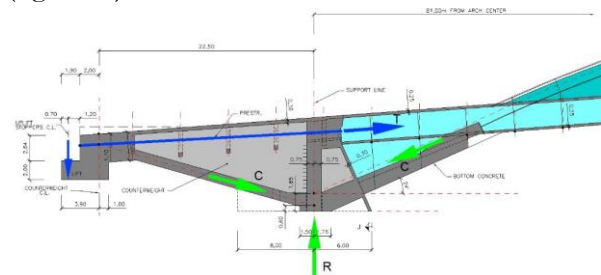


Figura 14. Diseño de pilares

El tiro hacia arriba del cartabón se soporta con un tope y 6 apoyos esféricos. Dado que el pilar 2 está fijado longitudinalmente, los apoyos también se fijan a lo largo de esa dirección.



Figura 15. Pilares y contrapesos

4. Procedimiento constructivo

A continuación, se describe someramente el proceso constructivo, dado en que detalle queda

descrito en otros 2 artículos del presente congreso del ACHE:

- Puente de La Concordia. Maniobra de gateo y traslación
- Puente de La Concordia. Proceso constructivo

La construcción del puente comienza con la ejecución de las cimentaciones (Fig.15) de pilas (zapatas corridas) y contrapesos (estribo de para resistir las fuerzas de tiro).



Figura 16. Descripción general de las cimentaciones

A continuación, se ejecuta el contrapeso de hormigón pretensado, así como los laterales en voladizo tablero de acero. (figura16).

Una vez finalizada la etapa constructiva descrita anteriormente, se procede al tensado de los tendones postensados ubicados en las almas del tablero, de manera que se puedan retirar los andamios y apuntalamientos provisionales.

El contrapeso de hormigón permanece fuera de la vista debido a algunos muros de hormigón prefabricado erigidos a su alrededor (figura17).



Figura 17. Diseño de pilares

A su vez, en el taller metálico construye la estructura metálica del tramo central del puente

(figura 18), dividida en unos elementos que son transportados a la obra para su montaje final con grúas (figura 19).



Figura 18. Estructura de acero fabricada en taller

La construcción del tablero metálico se ha desarrollado gracias a un importante trabajo realizado por el taller.



Figura 19. Estructura de acero montada en obra

El segmento central del puente, de 128,65 m de longitud, 24,5 m de ancho y unas 2.400 toneladas de peso, se montó en una zona lateral adyacente a uno de los estribos paralelos a la M-12 (figura 19). Una vez finalizada la estructura metálica del tramo central, el puente fue rotado y transportado en abril de 2021 en una operación singular mediante dos Transportadores Modulares Autopropulsados (SPMT) de Mammoet hasta su posición final perpendicular a la M-12, para permitir el cruce sobre el terraplén intermedio de la M-12.

La operación realmente compleja duró 4 días completos sin parar día y noche (Figura 20).



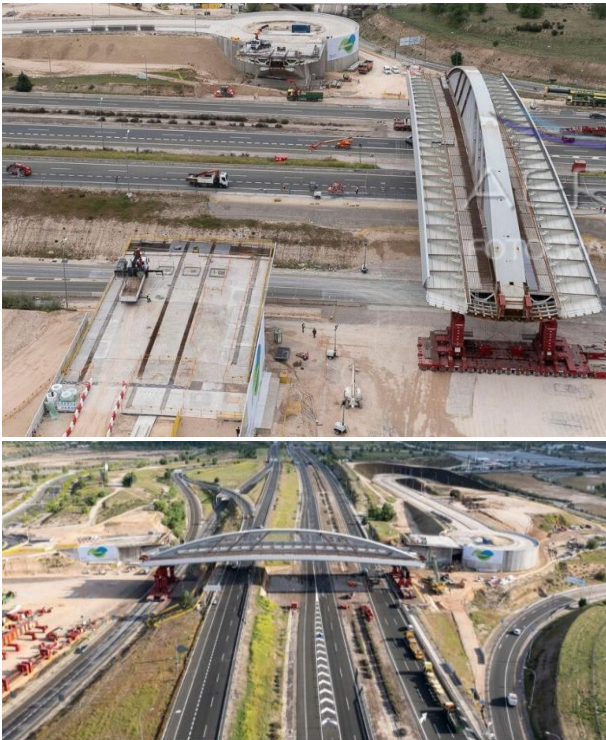


Figura 20. Rotación y transporte del segmento central del puente

Una vez colocado el tramo central en su ubicación definitiva, se ejecuta el vertido del hormigón de la losa superior e inferior. Para

permitir el vertido, se han colocado prelosas prefabricadas de hormigón sobre el tablero de acero. Esta etapa se realiza en dos fases. En primer lugar, se vierte el hormigón sobre la parte central de la sección transversal (12,90 m) y, en una segunda fase, se vierte el hormigón del voladizo del tablero. Esta secuencia permite un rendimiento estructural óptimo de la sección compuesta de acero y hormigón.



Figura 21. Losa de hormigón en sección central de 12 m

Por último, se tensan los tendones de continuidad de la losa superior y se controlan y ajustan las reacciones portantes en los estribos.



Figura 22. Puente ejecutado



Figura 23. Puente ejecutado

5. Conclusiones

Este artículo proporciona una visión general de la concepción el proyecto y la construcción del puente de “la Concordia” en Valdebebas.

El diseño del puente "La Concordia" fue el resultado de un desarrollo estructural ortodoxo y optimizado. Su incidencia formal y carácter arquitectónico se derivan del orden y tratamiento de la propia estructura.

Se desarrollaron soluciones originales e innovadoras, que cumplieron satisfactoriamente con los requisitos estructurales y estéticos.

Agradecimientos

En la siguiente tabla se resumen los principales participantes del proyecto:

Colaboradores del proyecto
Cliente: Junta de Compensación Parque de Valdebebas
Constructora: Ferrovial
Propuesta ganadora en las ideas y Diseño de Detalle:
Ingeniería:

IDEAM (actualmente TYLin): Francisco Millanes, Daniel Martínez, Jesús Martín, Pablo Solera, Reyes García

Arquitectos

Francisco Domouso, Lorenzo Fernandez-Ordoñez, Emilio Rodríguez

Dirección de Obra:

IDEAM (actualmente TYLin): Francisco Millanes, Miguel Ortega, Jesús Martín, Juan Luis Mansilla, Pablo Solera, Juan Mora

Referencias

- [1] Millanes, F.; Ortega, M.; Martínez, D.; Solera, P. 2009. El uso y desarrollo de los sistemas de suspensión inclinados para arcos bowstring. Lisboa. VII Congreso de Construção Metálica e Mista, pp. 97/106. Publicado por Cmm-Associação Portuguesa de Construção Metálica e Mista
- [2] Millanes, F.; Ortega, M.; 2022. Functionality, aesthetics and structural efficiency integrated into the design for an outstanding bridge on the access to the new T4 Terminal at Barajas Airport (Madrid). IABSE, Prague, 2022.