

Puente de La Concordia. Maniobra de gateo y traslación

La Concordia bridge. Jacking and translation maneuver

Juan José Sánchez Ramírez, Pablo Loscos Areoso, Carlos Bajo Pavía,

Rafael Pedro Martínez Turrado

^a Máster Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Ferrovial Construcción. Jefe de Departamento de Estructuras de Obra Civil.

j.j.sanchez@ferrovial.com

^b Máster Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Ferrovial Construcción. Coordinador de Proyectos Estructuras de Obra Civil.

ploscos@ferrovial.com

^c Máster Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Ferrovial Construcción. Jefe de Área de Estructuras de Obra Civil.

carlos.bajo@ferrovial.com

^d Ingeniero Técnico de Obras Públicas, Grado en Ingeniería Civil. Mammoet. Segment Sales Manager-Civil.

rafael.martinez@mammoet.com

RESUMEN

Durante el diseño de detalle del proyecto del Puente de La Concordia, y con el fin de evitar la afección sobre el tráfico de la M-12 que hubiese supuesto un sistema de construcción in-situ, la Dirección Técnica de Ferrovial Construcción y TYLin (antes IDEAM) diseñaron, junto con el especialista en heavy-lifting Mammoet, un proceso constructivo alternativo consistente en el montaje del tramo central de la estructura, un *bowstring* de 2400 toneladas de peso, fuera de la calzada, y su posterior traslación hasta posición definitiva mediante *spmt* (*Self Propelled Modular Transporters*).

ABSTRACT

During the detailed design of La Concordia bridge project, and with the aim to avoid the impact on traffic on the M-12 that an on-site construction system would have entailed, Ferrovial Construction Engineering Services and TYLin (former IDEAM) designed, together with the heavy lifting specialist Mammoet, an alternative construction process consisting of the assembly of the central section of the structure, a 2400 tons bow-string, off the roadway and its subsequent transfer to its final position using *spmt* (Self Propelled Modular Transporters).

PALABRAS CLAVE: arco de tablero inferior, gateo, *spmt*, *megajacks*.

KEYWORDS: bow string, jacking, *spmt*, *megajacks*.

1. Introducción

El proceso constructivo elegido para el montaje del Puente de La Concordia consistió en la ejecución de la subestructura y el arranque del tramo metálico en su ubicación final, mientras que el tramo central se ensambló en campa a unos 200 metros de su ubicación definitiva. Para realizar el traslado del tramo central se desarrolló

una maniobra que comprendió varias operaciones de gateo, desplazamiento y transferencia de carga entre diferentes equipos de gateo apoyados en plataformas autopropulsadas tipo *spmt*, hasta dejar este tramo del puente en su posición final, para soldarlo a la estructura que esperaba.

2. Descripción de la maniobra

El tramo central del puente, que medía unos 130 m de largo, 24,5 m de ancho y pesaba unas 2400 toneladas, se montó en una zona lateral de la obra paralela a la autopista de peaje M-12, uniendo los tramos que se transportaron desde el taller metálico de Dizmar en Galicia.



Figura 1. Montaje en un lateral de la obra del tramo central a partir de las dovelas prefabricadas en taller

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, durante un corte total de la autopista, que duró tan solo 4 días.

La maniobra comprendió diferentes etapas, que se describen en los párrafos sucesivos, las cuales requirieron del uso de una serie de equipos de elevación y traslación. 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 orográficos presentes en la trayectoria de desplazamiento, especialmente complicado era hacerlo sobre una de las calzadas de la M-12, ya que se elevaba unos 5 metros sobre las otras, lo cual condicionó en gran medida la secuencia de transporte porque suponía un obstáculo que impedía que la maniobra pudiera realizarse de manera continua. La solución, como veremos con detalle más

adelante, consistió en emplear un tercer equipo de plataformas móviles.



Figura 2. Vista general del tramo central del puente tras la finalización del ensamblaje de la estructura metálica

Una vez concluido el ensamblaje de todas las piezas de tablero, arco y *diagrid*, y ejecutada parte de la losa de hormigón armado, la estructura a trasladar quedó apoyada sobre las cinco bancadas utilizadas para su montaje y por tanto lista para su movilización.

De manera esquemática, la maniobra para llevar la estructura a su posición definitiva se puede dividir en las siguientes fases principales:

- Elevación.
- Rotación de 90°.
- Traslación longitudinal (salto sobre calzada elevada de la M-12).
- Traslación transversal.
- Descenso.

2.1 Fase de elevación

La primera fase de la maniobra consistió en el desapeo de las bancadas, y la elevación de la estructura unos cuatro metros mediante ocho conjuntos de equipos de gatos de trepa de 500 toneladas de capacidad, de manera que la cota alcanzada permitiese la entrada bajo el tablero de las plataformas autopropulsadas, equipadas cada una de ellas con los dispositivos de elevación final denominados *Megajacks*, también de 500 toneladas de capacidad.

El proceso de elevación inicial se realizó en cuatro etapas sucesivas con la ayuda de

diferentes estructuras auxiliares de apeo temporal.



Figura 3. Estructura auxiliar sobre gatos de trepa

Para el apoyo del puente sobre los equipos de apeo y transporte se emplearon cuatro juegos de viga cajón de unos 3 metros de canto y 24 metros de longitud, que llegaban a pesar unas 70 toneladas cada una de ellas.

Posteriormente, con la ayuda de los equipos de *Megajacks* situados sobre las plataformas, se realizó una elevación adicional de otros 4 metros, con el objeto de alcanzar la cota necesaria para poder desarrollar a continuación todas las fases de movimientos y transferencias de carga garantizando un gálibo suficiente, de forma que se evitaran interferencias, elevando de esta manera el puente unos 14 metros sobre el terreno, con objeto de que a partir de ese instante se pudiera dar comienzo al traslado propiamente dicho.



Figura 4. Pareja de sets de *spmt* con equipos de elevación *Megajack* recogidos

Una vez se introdujeron los dos sets de *spmt*, equipados cada uno de ellos con 4 sistemas *Megajacks* de 500 toneladas, el sistema se encontraba preparado para iniciar la maniobra

propriadamente dicha. En los apartados siguientes se detallan los diferentes movimientos que fue necesario realizar para que este tramo central del puente quedase situado en su posición definitiva.



Figura 5. Estado final de la fase de elevación

2.2 Fases de rotación y traslaciones

En cada uno de los esquemas de la maniobra que se sucedieron a continuación, la estructura permanecía siempre apoyada en dos equipos de plataformas *spmt*, sobre los cuales se dispusieron sistemas de gateo en los casos necesarios y estructuras metálicas auxiliares de grandes dimensiones y capacidades.

Sobre éstas se instalaron dos parejas de apoyos de neopreno zunchado. La presencia de estos aparatos de apoyo fue decisiva para evitar afecciones tanto a la estructura como a los propios equipos de transporte durante las diferentes fases de la maniobra.

Al realizarse los desplazamientos mediante dos equipos de plataformas, sin arriostrar entre sí, se hacía imprescindible dotar al sistema de cierta flexibilidad que acomodase los pequeños movimientos relativos que pudieran producirse entre ambos, sin inducir esfuerzos significativos que comprometiesen la estabilidad de los equipos o la integridad del puente.

El transporte comenzó con un giro de 90° dentro de la campa de montaje, y una traslación perpendicular a la autopista, que situó el extremo delantero de la estructura sobre una de las calzadas que presentaba una sobreelevación de varios metros respecto al resto. En dicha calzada esperaba un tercer equipo de plataformas

autopropulsadas, que recogió el puente mediante una transferencia de carga, liberando así el equipo delantero de los dos colocados inicialmente.



Figura 6. Inicio de la fase de rotación



Figura 7. Fin de la fase de rotación

Sobre dicha calzada elevada se realizaron tres desplazamientos de 10 metros, en dirección perpendicular a la M-12, con dos transferencias de carga adicionales. Para ello fue necesario movilizar el equipo recientemente liberado en campa hasta la calzada elevada, de manera que, en cada etapa, sucesivamente, el equipo libre se situaba detrás del cargado para tomar su carga y realizar a continuación un nuevo avance de 10 metros.

Tras las operaciones descritas en la calzada elevada, el extremo del puente quedó situado sobre la calzada adyacente a la espera del que quedó liberado en la calzada elevada, y así, mediante una nueva transferencia de carga, el puente quedó apoyado sobre los dos equipos con los que se hizo el descenso final sobre los arranques. Primeramente, fue necesario realizar

la aproximación final mediante dos traslaciones, la primera de ellas perpendicular a la autopista y la segunda paralela, de manera que el puente quedase situado en la vertical de su ubicación definitiva.

La última fase de la maniobra consistió en el descenso de la estructura hasta una cota tal que los elementos auxiliares dispuestos en la misma, denominados perchas, hiciesen contacto con los aparatos de neopreno provisionales dispuestos en los arranques. En ese momento se procedió a la transferencia final de carga a los arranques mediante descenso de los sistemas hidráulicos de los *Megajacks* dispuestos sobre las plataformas.

Las mencionadas perchas son elementos auxiliares de acero, soldados en voladizo a la estructura a trasladar, que permiten un apoyo limpio sobre los apoyos de neopreno situados en los arranques, evitando cualquier interferencia entre estos y el tramo central. Este sistema, comprendido por las perchas y los apoyos de neopreno, tenía la principal ventaja de permitir la liberación automática de los medios de transporte inmediatamente después de la transferencia de carga, ya que el esquema provisional resultante es estructuralmente estable.



Figura 8. Set final de *smt* una vez pasado el obstáculo de la calzada elevada

Previamente a la realización de la aproximación final, y para garantizar una perfecta alineación en planta y alzado del tramo central con sus arranques, fue necesario realizar un replanteo topográfico muy preciso, tanto de la ubicación de cada uno de los neoprenos, como de la geometría e instalación de las perchas.



Figura 9. Fase final de traslación, paralela a la M-12, hasta ubicación definitiva

Durante el desarrollo de la maniobra se llevó a cabo un control exhaustivo de las reacciones transmitidas, la posición en planta y alzado de la estructura, y las deformaciones experimentadas por los aparatos de apoyo.

Se efectuaron las paradas necesarias a lo largo de los 250 metros de desplazamiento, con el fin de evaluar y mantener constantemente cada una de las magnitudes dentro de las tolerancias previamente establecidas

3. Descripción de los equipos

3.1 Gatos de trepa

El sistema de gateo de trepa de 500 toneladas de Mammoet se componía de cilindros hidráulicos de la citada capacidad y una carrera efectiva de 150 mm, situados cada uno dentro de una carcasa metálica a la que están rígidamente unidos. Esta carcasa proporciona una superficie adicional durante el gateo para poder realizar los

apoyos mecánicos necesarios en cada fase, permitiendo así al sistema trepar sobre sí mismo.

La trepa se realizó sobre un castillete de tacos de madera de alta resistencia; así a medida que el cilindro hidráulico finalizaba una etapa de elevación, se pasaba a disponer bajo la carcasa una primera cama de tacos, para a continuación, realizar la siguiente etapa y colocar la siguiente cama de tacos contrapeados sobre la capa anterior.

De esta manera, se fue formando en etapas sucesivas un castillete de tacos sobre el que gato y carcasa realizan la trepa.

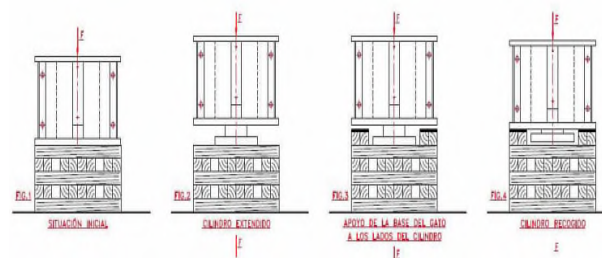


Figura 10. Esquema de funcionamiento de autotrepa

Durante las maniobras de gateo iniciales, se utilizaron 8 gatos de trepa de 500 toneladas de

capacidad, dispuestos en dos grupos de cuatro bajo sendas costillas del tablero. Mediante sucesivas elevaciones de los gatos, así como el uso de apoyos mecánicos adicionales materializados en base a perfilería metálica, se realizó la elevación inicial de unos 4 m, desde la posición sobre los apeos de ensamblaje, hasta crear el espacio suficiente para introducir los conjuntos de *sfmt* y los equipos de ganeo *MJS500* que se definen en los siguientes apartados.



Figura 11. Gatos de trepa en funcionamiento

3.2 Plataformas *sfmt*

La denominación *sfmt* corresponde a las siglas en inglés de “Self Propelled Modular Transporters”, cuya traducción es “transportes modulares autopropulsados”. Se trata de un sistema de carretones de gran capacidad formado por módulos interconectables tanto longitudinal como transversalmente, que permiten configurar plataformas de transporte de las dimensiones y capacidad portante necesarias en cada caso.

Cada uno de estos módulos está formado bien por una fila de 4, o bien de 6 ejes, contando cada eje con dos suspensiones hidráulicas, las cuales tienen respectivamente una capacidad de carga neta que se mueve, en función del modelo, en el entorno de las 20 toneladas por suspensión.

Una vez conectados hidráulica y electrónicamente todos los módulos requeridos, se opera la plataforma de transporte completa desde un solo mando de control como si fuese un único vehículo. En este caso, además, mediante cableado que se pasó por el tablero para evitar cualquier tipo de corte accidental, los

dos sets se manejaban con la misma botonera, de manera que se aseguraba en gran medida la sincronización del movimiento de los dos equipos de plataformas que trasladaban el puente.



Figura 12. Mando de control

La principal característica de estos equipos, aparte de su elevada capacidad de carga anteriormente descrita, es su gran maniobrabilidad, ya que cada suspensión hidráulica cuenta con un motor que la hace independiente de las demás, no estando, por tanto, conectados transversalmente entre sí los ejes como en un vehículo convencional y permitiendo por tanto así un rango de giro de cada una de las suspensiones de 360°.

Para la realización de la maniobra de traslación, se utilizaron un total de 146 ejes *sfmt*, agrupados en 3 plataformas de transporte de 54, 44 y 48 ejes respectivamente en configuraciones 3 x 18, 2 x 22 y 2 x 24 ejes.



Figura 13. Juego de 3 sets de *sfmt* empleados

3.3 Megajacks (MJS500)

El sistema de gateo automatizado y autoestable *MJS500* de Mammoet, empleado en esta maniobra, permite elevar grandes cargas a alturas considerables garantizando una alta estabilidad. Las siglas *MJS* corresponden a “Mammoet jacking system”, cuya traducción es “sistema de gateo de Mammoet”.

Cada torre de gateo está compuesta por una base dotada de 4 cilindros hidráulicos y un sistema de alimentación por cinta transportadora, a través de la cual se introducen los sucesivos barriles o casetes que formaban la torre de gateo.

Mediante los cilindros de la base, se eleva cada casete hasta crear bajo el mismo el espacio suficiente para disponer el siguiente, momento en el cual la carga se transfiere mecánicamente a la propia base, permitiendo así recoger los cilindros y creando espacio para la introducción de un nuevo casete.

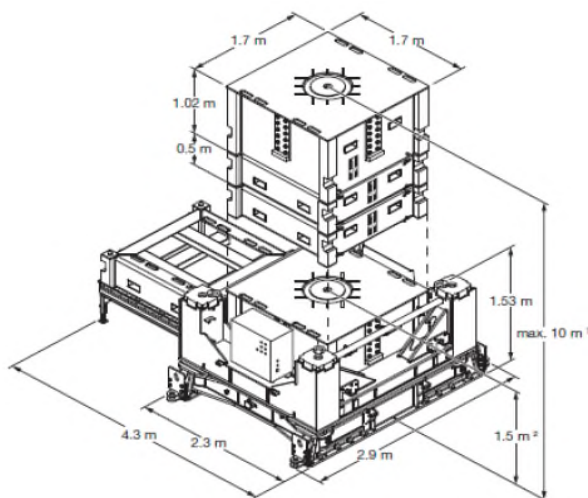


Figura 14. Esquema de componentes de *MJS500*

A partir de ese momento, la secuencia se repite de forma que se va incrementando la altura de la torre, autotrepando sobre la base inicial y los sucesivos casetes.

Todo el control y operación de la maniobra de gateo se realizó de forma centralizada y por ordenador desde una caseta de control específica del sistema, desde donde se monitorizaban todos los parámetros, tales como carga, carrera, peso y centro de gravedad.

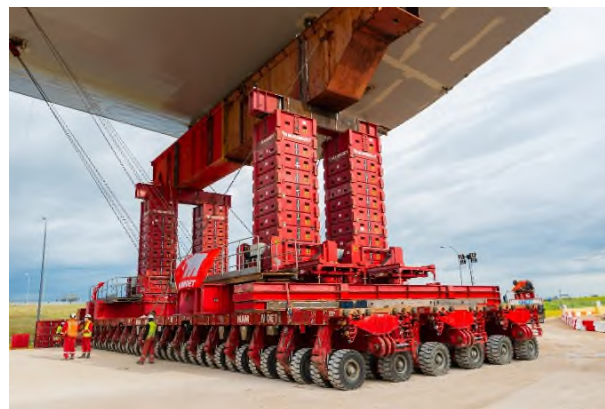


Figura 15. *MJS500* montado sobre *spmt*

Para el izado del Puente de La Concordia se utilizaron 8 torres de gateo *MJS500*, situando 2 parejas de torres sobre sendas plataformas de transporte *spmt*. Las torres elevaron el tablero una altura aproximada de unos 4,5 metros, y realizaron también el descenso de este en posición final sobre las perchas dispuestas en los arranques de ambos extremos.



Figura 16. Puente en posición para iniciar el descenso

4. Controles realizados durante la maniobra

Para garantizar que la maniobra se desarrollara sin incidentes y en condiciones de seguridad, fue necesario diseñar un plan de control de los diferentes conceptos que definen cada una de las operaciones que constituyeron la maniobra, los cuales se describen a continuación.

4.1 Control de reacciones

El peso de la estructura a trasladar, y cómo este se reparte entre los diferentes elementos de apoyo, era el primer parámetro que tenía que controlarse, ya que tanto los refuerzos locales de la estructura, los elementos de reparto, así como los sistemas de traslado estaban dimensionados teniendo en cuenta una cierta carga de diseño, determinada por el peso total de la estructura y por un reparto de reacciones entre los elementos de apoyo, dado por la propia geometría de cada esquema estático y una cierta desviación máxima asumida en el diseño.

El sistema de medida de las reacciones fue el propio del sistema hidráulico que se utilizó en cada una de las fases de la maniobra. Tanto en las fases de gateo como en las fases de transporte, los equipos de gateo y las plataformas de transporte eran capaces de suministrar los valores de las reacciones de manera directa, o valores suficientes para obtener los anteriores de manera indirecta. De esta manera se podía controlar que la reacción sobre cada elemento de apoyo se encontraba en todo momento dentro de los rangos establecidos como admisibles.



Figura 17. Manómetro en spmt

La reacción y posición del centro de gravedad en cada línea de apoyo (medido directa o indirectamente) debía controlarse de forma continua, o bien a intervalos compatibles con cada una de las operaciones a realizar, y quedaba registro de sus valores tras cada cambio de fase.

Los valores que se controlaban fueron los siguientes:

- Reacción esperada sobre cada línea de apoyos.

- Valores máximos de reacción sobre cada apoyo asumiendo el reparto de diseño de 55%-45%, y la desviación trasversal máxima del centro de gravedad dentro de cada línea de apoyos, compatible con la reacción máxima por apoyo. Dichos valores constituían el límite de alerta.

En general se consideró que el límite de parada y acción correctora debía ser aquel que supusiera una desviación del doble de la desviación considerada en el diseño (reparto de 60%-40%), cosa que no sucedió en toda la maniobra.

4.2 Control de la posición en planta

La posición en planta que en cada instante de la maniobra presenta el sólido a desplazar, tenía que compararse con la posición que, para ese mismo instante se había predeterminado al diseñar geométricamente la maniobra. En este sentido, existían cuatro niveles de control, asociados con los diferentes tipos de operaciones que se iban a desarrollar durante la maniobra.

- Giro en campa y traslados: durante estas fases de la maniobra se había de controlar la posición del sólido a desplazar respecto a la trayectoria teórica predefinida. No se consideró necesario fijar límites de control, simplemente los necesarios para salvar los obstáculos físicos que presentase la maniobra.
- Transferencias y descenso final sobre apoyos provisionales: En este caso, se debía realizar un control topográfico más preciso que el establecido para las fases anteriores, ya que debían quedar perfectamente alineadas las chapas a soldar del cupón de cierre.

El sistema de medida era compatible con la precisión requerida en cada fase. En el caso del giro en campa y los traslados se consideraba suficiente un sistema de marcas en superficie de rodadura. En el caso de las transferencias y el

descenso final se emplearon estaciones totales con precisión milimétrica.

Se establecieron una serie de puntos de parada, y puntos intermedios de toma de medidas sin necesidad de parada entre cada cambio de esquema estático, en los cuales se tomaron datos de posición en planta para evaluar la necesidad de corrección. Cada cambio de esquema estático se consideraba punto de parada obligatorio en el que se realizaba una toma de medida de posición en planta.

Como puntos de medida para control topográfico general en planta se empleó un punto en cada una de las cuatro perchas. Las cuatro medidas obtenidas definían automáticamente la posición del eje de la estructura.

Para el control topográfico local de las cuñas de apoyo que iban a depositarse sobre un set, se tomaba medida en los dos prismas de la línea de apoyo asociada a dichas cuñas de apoyo, y se controlaba su posición respecto a los apoyos de neopreno en espera en el set de *spmt*.

4.3 Control de cotas y deformada

Para el control en alzado se tomó como dato de partida la cota de cada sección de control con el puente apeado en campa, y a partir de dicho esquema inicial, se sucedieron las diferentes operaciones de la maniobra, que hacían variar dichas cotas. En las sucesivas fases de traslado el puente siempre quedaba apoyado en dos líneas coincidentes con dos secciones de control.

Cada uno de esos esquemas llevaba asociada una deformada teórica que hacía variar la cota relativa de cada sección de control respecto a las dos en las que estaba apoyado el puente. Adicionalmente, se desarrollaron una serie de operaciones de gateo y de descenso que suponían una traslación vertical de toda la estructura, estas modificaban las cotas absolutas de cada sección de control.

El propósito de controlar la evolución de dichas cotas en todas las secciones de control que intervenían en la maniobra era doble, por un

lado, se quería conocer el comportamiento deformacional del puente en los diferentes esquemas de apoyo, con el propósito de poder compararlos con el comportamiento teórico previsto, y por otra parte, era necesario conocer la cota absoluta de cada sección de control que va a apoyar sobre el set que está esperado en cada cambio de esquema estático, para determinar si era necesario realizar alguna corrección previa.

Como instantes en los que realizar las medidas se establecieron dos por cada esquema de apoyo por el que pasaba el puente, además de otro, a una cierta distancia antes de cada operación de transferencia de carga, así como inmediatamente después de cada cambio de esquema estático.



Figura 18. Prismas para control geométrico y marcas en el vial

En el caso del gateo inicial en campa, se realizó una primera toma de datos durante la primera parada de la operación, prevista tras el primer escalón de elevación de 10 cm, y una segunda toma de datos una vez el gateo se hubo completado.

Los puntos de medida para el control de la maniobra se materializaron mediante prismas situados bajo el tablero, al lado de los enanos estabilizadores de almas laterales de cada una de las líneas de apoyo intervinientes en la maniobra, y dianas en las perchas.

Aunque se dispusieron prismas en ambos enanos laterales, solo se tomaban datos de cota por uno solo de los lados, salvo que se hubiera detectado algún valor fuera de rango, o bien, la desviación de alguna de las reacciones dentro de una línea de apoyo se encontrase fuera de tolerancia.

5. Conclusiones

El singular proceso constructivo diseñado para el montaje de este puente surgió del espíritu de aunar la calidad, seguridad y rapidez de la solución con el objetivo adicional de evitar, en este caso concreto, los mayores inconvenientes posibles en la movilidad de los usuarios de la autopista de peaje M-12 durante la construcción de la estructura, además de poder salvar los accidentes del terreno.

El empleo de varios medios de transporte y elevación combinados abre un amplio abanico de posibilidades constructivas que antaño eran inviables, y que, por tanto, nos abocaban a las soluciones constructivas convencionales menos eficaces. En consecuencia, se trata de un sistema constructivo innovador que aporta ventajas sustanciales en la construcción de puentes sobre vías de circulación con tráfico elevado, en las que un corte del servicio o un desvío parcial o total supondrían un perjuicio muy importante a la movilidad en la zona.

Este sistema constructivo resultó finalista en el año 2022, en los premios que anualmente concede IABSE (*The International Association for Bridge and Structural Engineering*), en la categoría de innovación en construcción.

Agradecimientos

- Promotor (Junta de compensación de Valdebebas): Marcos Sánchez Foncueva, Lisbeth Rodríguez, Antonio Menaya.
- Equipo de obra (Ferroviál Construcción): Maximiliano Eisenberg, Enrique Corrochano, Félix García, Angel Contreras, Eutiquio Montes, Beatriz Moreno, Carmen Cogollos, José Luis Ramos.
- Equipo de TYLin (antes Ideam): Francisco Millanes, Miguel Ortega, Jesús Martín, Juan Luis Mansilla, Juan Mora, Pablo Solera, Daniel Martínez.
- Equipo Mammoet: David Arias, François Benéteau, Salvador Salamanca, Miguel Angel Rodríguez, Jose Angel Morquillas.

Referencias

[1] Timelapse de la maniobra:

<https://www.youtube.com/watch?v=nC7Pljj3dE>

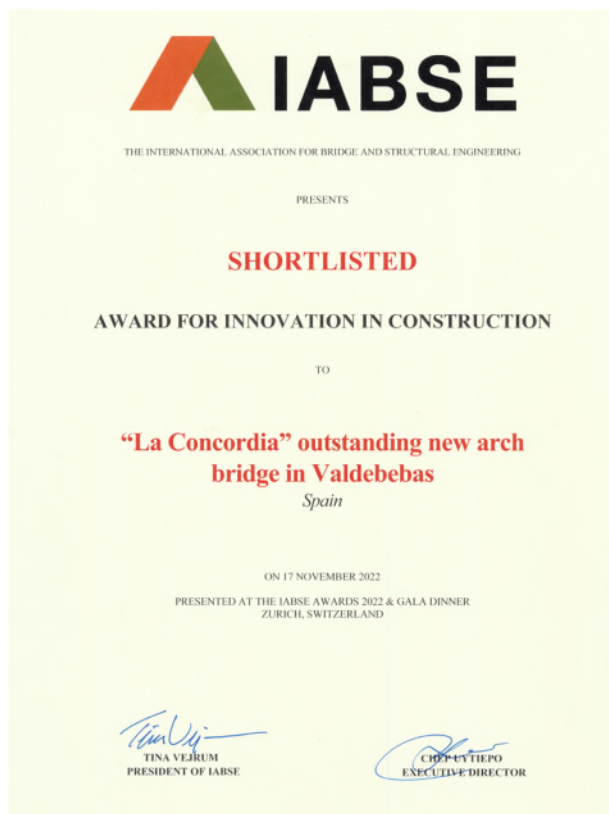


Figura 19. Certificado de finalista de los premios IABSE 2022