







# Proyecto y Montaje del Arco Metálico del Viaducto 1E en el Tren Interurbano México - Toluca (México)

Detailed Design and Exection of the Viaduct 1E Bowstring in the Interurban Mexico – Toluca Railway (Mexico)

Jordi Revoltós Forta, Ignacio Pita Olallab, Juan Miguel Cereceda Boudetc, Javier Sánchez-Mateos Enriqued, Ignacio Casas Morenoe, Diego Rubio Peiroténf

- <sup>a</sup> Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Jefe de la Sección de Puentes y Viaductos de SENER. jrevoltos@sener.es
  - <sup>b</sup> Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Sección de Puentes y Viaductos de SENER. ignacio.pita@sener.es
  - <sup>c</sup> Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Sección de Puentes y Viaductos de SENER. jmcereceda@sener.es
- d Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Sección de Puentes y Viaductos de SENER. jsanchez@sener.com.mx
- <sup>e</sup> Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Sección de Puentes y Viaductos de SENER. ignacio.casas@sener.com.mx

#### RESUMEN

SENER ha diseñado y dirigido la fabricación y proceso constructivo del Puente Arco ubicado en el Viaducto 1E de la Línea de Tren Interurbano México – Toluca (México), actualmente en construcción. Bajo la traza del puente discurre una vía de ferrocarril con un gran esviaje con respecto a la alineación del puente, lo que impedía llevar a cabo cualquier trabajo bajo la sombra de la nueva estructura en su posición definitiva. Fue preciso, por ello, una vez fabricada la estructura metálica, montarla sobre unas estructuras auxiliares provisionales ubicadas a 28.55 m de su posición definitiva y proceder al ripado dela estructura mediante unos cables accionados por medio de gatos hidráulicos.

#### **ABSTRACT**

SENER performed the detailed design of the Viaduct 1E bowstring arch located in the interurban Mexico - Toluca railway and led the technical assistance during its erection process participating in the different stages of the construction sequence. The above-mentioned structure crosses over an existent railway track at a very high skew angle, so no temporary works were possible to be carried out beneath the final structure. This is the main reason why the steel structure was lifted by cranes onto temporary supports 28.55 m away from its final position, and then side launching it by pulling through cables powered by hydraulic jacks.

PALABRAS CLAVE: arco, bowstring, celosía, esviaje, péndolas, análisis a fatiga, ripado.

**KEYWORDS:** arch, bowstring, truss, skew angle, hangers, fatigue analysis, side-launching.

#### 1. Antecedentes

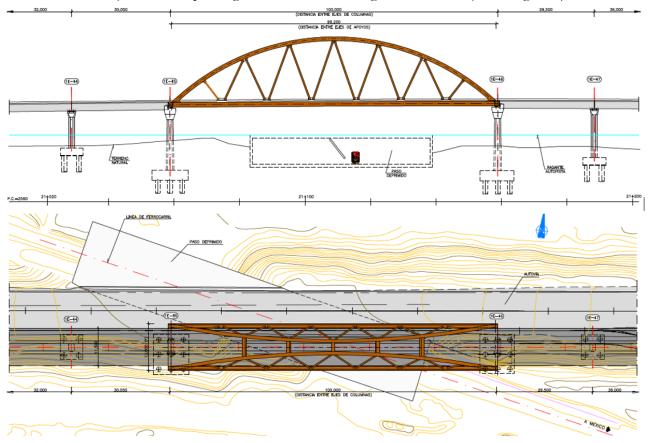
La Secretaría de Comunicaciones y Transportes de México (SCT) encarga a SENER el diseño y la asistencia técnica especializada durante la ejecución de la línea del Tren Interurbano entre Ciudad de México y Toluca, que consta de tres tramos y que tiene una longitud total de 58 km,

aproximadamente. La estructura objeto del presente artículo se encuadra dentro del Tramo 1 que, con una longitud de 37 km (de los que 32 km aproximadamente, discurren sobre viaducto) parte de Zinacantepec en Toluca de Lerdo y discurre por el suroeste de la ciudad atravesando

<sup>&</sup>lt;sup>f</sup>Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Sección de Puentes y Viaductos de SENER. diego.rubio@sener.es

Metepec y Lerma. Entre las columnas 1E-45 y 1E-46 de dicho tramo es preciso recurrir a una solución diferente de la estándar empleada en el resto de la línea (constituida por vigas artesas

prefabricadas con losa de compresión), debido al cruce muy esviado de la línea de tren con un paso deprimido existente por el que circula una antigua línea férrea (véase Figura 1).



# 2. Descripción del Arco Metálico

Se trata de un puente con doble arco simétrico y tablero inferior que salva una luz de 100 m entre ejes de pilas (99.2 m entre ejes de apoyos).

Es, por tanto, una estructura singular situada en un emplazamiento de gran accesibilidad y visibilidad, motivos por los que, en fase de Proyecto, se decide dotarla de un especial dinamismo y originalidad inclinando los planos de los arcos 12.68° respecto de la vertical (véase la Figura 2) [1].

Tal y como es habitual en esta tipología estructural, los arcos (también denominados, cordones superiores) se atirantan por medio de unos cajones metálicos dispuestos en los bordes del tablero. Arcos y cordones inferiores están unidos entre sí por medio de una configuración

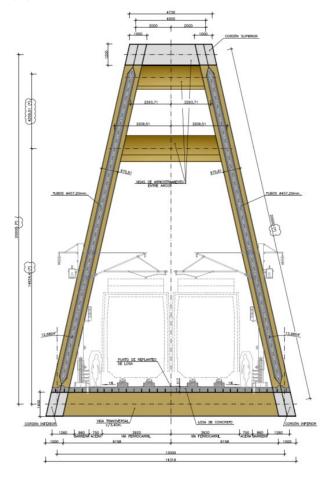
triangulada de péndolas que dota al conjunto de una rigidez tal que su comportamiento se asemeja al de una celosía de canto variable, circunstancia que cobra una especial relevancia a la hora de analizar el proceso constructivo planteado en la fase de Proyecto y que se describirá con detalle más adelante [2].

Dada la naturaleza de las acciones que solicitan la estructura, durante la fase de Proyecto se llevó a cabo un análisis pormenorizado de fatiga de todos los elementos estructurales, prestando especial atención a la definición de los detalles constructivos, a fin de garantizar que se satisficieran los criterios de fatiga admisibles para el control de las cargas cíclicas debidas al paso de los trenes.

### 2.1 Cordones superiores

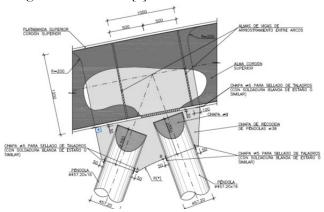
La directriz de los arcos, proyectada sobre un plano vertical, se circunscribe en un acuerdo circular de flecha 20 m, lográndose de esta manera una relación flecha/luz de 1/5.

Cada uno de los cordones está formado por un cajón armado de sección paralelepipédica metálica de 1.20 m de canto, con las placas laterales inclinadas según el plano del arco y con espesores comprendidos entre los 32 y los 45 mm.



Las cartelas de fijación de las péndolas atraviesan la platabanda inferior del cordón superior y, mediante dos diafragmas interiores se materializa la correcta transmisión de los esfuerzos procedentes de la péndola al arco (véase Figura 3).

Los arcos se arriostran transversalmente mediante cinco cajones armados cerrados del mismo canto que los arcos y 1.0 m de ancho, con espesores de platabandas de 19 mm, logrando de esta manera un doble objetivo: asegurar la estabilidad lateral de los cordones y reducir la longitud de pandeo global de los arcos. El primer arriostramiento se dispone a unos 9 m de altura sobre la losa para permitir el paso del ferrocarril con gálibo suficiente [3].



#### 2.2 Cordones inferiores

Siendo su principal misión la de equilibrar la componente horizontal de la carga de los arcos, evitando transmitir esfuerzos horizontales a la subestructura, actúan además como apoyo de las vigas transversales sobre las que descansa la losa de hormigón y como cordón inferior de la celosía de canto variable a la que se hacía mención anteriormente.

Cada uno de los cordones está formado por un cajón similar al de los cordones superiores anteriormente descritos, con espesores de placas comprendidos entre los 19 y los 45 mm, y con un canto ligeramente superior (1.4 m). Ambos cordones están separados entre sí transversalmente una distancia de 13.0 m (distancia medida entre centros geométricos de los cordones).

En las secciones de las péndolas, las cartelas de fijación atraviesan las platabandas superiores del cajón lográndose de esta manera materializar un detalle similar al descrito entre péndolas y cordones superiores (véase Figura 4).

Ambos cordones se conectan transversalmente mediante un conjunto de vigas metálicas del mismo canto que los cordones inferiores, y con una sección "doble T". La

modulación de estas vigas transversales varía entre 3.9 m (en la zona próxima a los estribos) y 3.4 m en la zona central.

Además, en el plano medio de las vigas transversales se dispone un sistema de arriostramiento transversal en "K", materializado por perfiles tubulares laminados de sección rectangular con el propósito de prever el correcto funcionamiento de la estructura durante las fases de construcción frente a acciones horizontales.

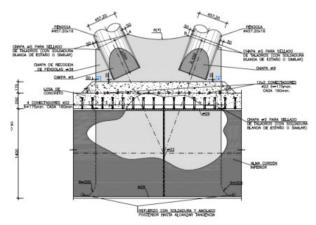


Figura 4. Detalle de nudo péndola - cordón inferior

## 2.3 Nudo de arranque del arco

El nudo de arranque del arco es una de las piezas más complejas de la estructura, ya que materializa la unión entre cordones superior e inferior, permitiendo la adecuada transición entre sus elementos resistentes y la correcta transferencia de esfuerzos entre ellos.

Tal y como se puede observar en la Figura 5, el equilibrio de fuerzas en el nudo se materializa transmitiendo la carga del cordón superior a través de las almas del cajón.

Para asegurar la correcta transmisión de dichos esfuerzos garantizando que no se produzcan daños por cargas cíclicas, las almas laterales del cordón superior presentan una transición circular en la intersección entre cordones, y mediante una serie de rigidizadores interiores, se garantiza la apropiada transferencia de la carga vertical a los aparatos de apoyo.

La conexión transversal de los arranques del arco en ambos extremos se realiza mediante una viga riostra armada de sección cajón que recoge la componente horizontal transversal generada debida a la inclinación de los arcos, garantizando, adicionalmente, el equilibrio general del conjunto.

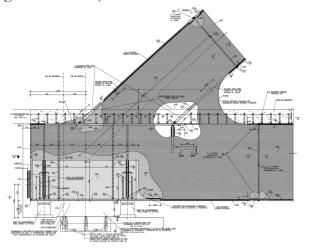


Figura 5. Detalle de nudo cordón superior - cordón inferior

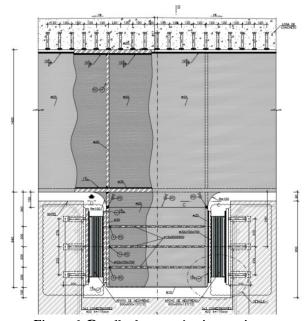


Figura 6. Detalle de tope sísmico en riostra

Por otra parte, en el punto medio de las vigas riostras, se dispone un tope transversal diseñado para transmitir los esfuerzos derivados de la eventual acción sísmica directamente a la subestructura, de tal manera que los aparatos de apoyo para cargas verticales situados bajo cada nudo estén dimensionados tan sólo para ser capaces de resistir las cargas de servicio operacional de la línea (véase Figura 6).

#### 2.4 Péndolas

Las péndolas, materializadas mediante perfiles tubulares de 457 mm de diámetro, actúan como elemento de unión entre el tablero y el arco, transmitiendo las cargas del primero al segundo.

Como se ha comentado anteriormente, dada su disposición en malla triangulada, tienen a su vez el comportamiento adicional de las diagonales de una celosía de canto variable, siendo capaces, por tanto, de resistir no sólo esfuerzos axiles de tracción sino también de compresión.

Los puntos de anclaje inferiores (de los que parten dos péndolas hasta su encuentro con el arco) distan longitudinalmente entre sí 13.6 m, salvo en las zonas más próximas a los apoyos, encontrándose ubicados a 15.6 m de ellos.

El análisis estructural de las péndolas se completó, durante la fase de proyecto, con un estudio pormenorizado del desprendimiento de torbellinos, amplitud de vibraciones. comprobación de fatiga y análisis deformaciones de manera que se pudiese asegurar el correcto comportamiento de estos elementos ante fenómenos de carácter aerodinámico y que pueden influir de manera significativa en su dimensionamiento [4].

#### 2.5 Tablero

La losa de hormigón del tablero presenta un espesor máximo de 32 cm a lo largo de su línea media, con una pendiente transversal a dos aguas del 1%, y se extiende en todo el ancho de la sección transversal.

Presenta un recrecido puntual en los bordes laterales para permitir el embebido de las cartelas de fijación de las péndolas y reducir, de esta manera, los posibles fenómenos de pandeo local de las mismas.

Por otra parte, la losa se encofra inferiormente mediante prelosas prefabricadas de 8 cm de espesor que se apoyan sobre las platabandas superiores de las vigas transversales, y que están dimensionadas para resistir, en

primera instancia, los esfuerzos derivados del vertido de hormigón fresco sobre ella hasta alcanzar el espesor comentado anteriormente, y posteriormente, para trabajar solidariamente con el resto de la losa.

Para que el comportamiento de la losa de hormigón pueda ser el descrito, tanto en la platabanda superior de las vigas transversales, como en la platabanda superior de los cordones inferiores, se dispone un sistema de conexión mediante pernos, que vincula la losa de hormigón a la sección metálica.

#### 3. Fabricación en taller

Habiéndose adjudicado la construcción de todas las estructuras de este tramo de la Línea al consorcio formado por la empresa constructora La Peninsular S.A. de C.V. y CPVM (OHL), la fabricación y montaje de la estructura metálica fue subcontratada a la empresa Aceros Lozano S.A de C.V. (actualmente Unities Alliance Group), que llevó a cabo los trabajos en sus talleres de Monterrey, desde los que se transportó la estructura por piezas hasta su ubicación definitiva.

Bajo el correspondiente estudio de despiece de chapas y análisis de la secuencia de soldaduras de cada elemento, y de su aprobación por parte de SENER, se desarrollan en el taller las operaciones de oxicorte de los diferentes elementos constitutivos, llevándose a cabo controles geométricos de cada elemento conformado previamente al ensamblaje y soldadura de los mismos.

El peso estimado de toda la estructura metálica fue, aproximadamente, de unas 780 toneladas.

Los cordones superiores e inferiores se transportaron a sitio conformados en segmentos de, aproximadamente, un sexto de la longitud total, a los que se exigió ser presentados en blanco en el propio taller a fin de minimizar las desviaciones geométricas a reparar en obra.

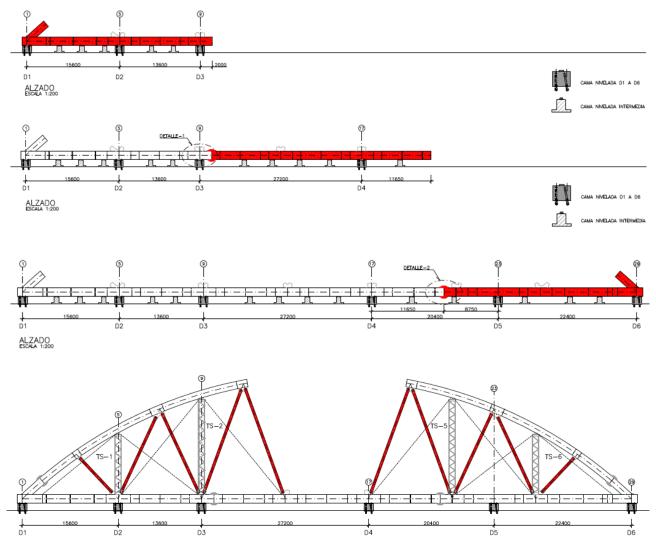
# 4. Montaje en blanco en piso

De acuerdo con las especificaciones de Proyecto, resultaba esencial realizar el montaje en blanco de la estructura completa a fin de representar fielmente la secuencia constructiva prevista, habida cuenta de que, como se ha comentado anteriormente, la estructura metálica se dispondría inicialmente sobre unas torres de apeo para, en segunda fase, ripar la estructura completa hasta su posición definitiva. De esta manera, el montaje en blanco lograría detectar las posibles desviaciones geométricas y anticipar las actuaciones en caso que fuesen necesarias.

Así pues, el montaje en blanco de los tercios de los cordones inferiores conformados y del sistema de arriostramiento de vigas transversales se realizó en obra, antes de izar la estructura metálica, mediante la disposición de unas camas de nivelación micro-pilotadas ubicadas en la misma posición en la que se ubicarían posteriormente las torres de apeo y con la misma geometría en alzado que el trazado teórico.

Además, se emplearon una serie de útiles auxiliares diseñados ad hoc para asegurar la tangencia entre piezas y unas ménsulas para prever el apoyo de unos tramos sobre otros (véase Figura 7).

Todos estos elementos auxiliares (torres de apeo, útiles de tangencia, ménsulas de apoyo, etc.) fueron diseñados por SENER en el ejercicio de sus funciones como Asistencia Técnica Especializada del Proyecto, adicional a su condición de Proyectista de la estructura.



Una vez se hubo llevado a cabo el montaje en blanco de los cordones inferiores, sobre cada tercio se dispusieron unas torres de apeo provisionales sobre las que descansarían los tercios conformados del cordón superior. Una vez dispuestos los tercios inicial y final del cordón superior sobre las torres de apeo, se colocaron las péndolas de ambos tramos y, tras verificarse la adecuación de la geometría a sus valores teóricos de los tercios completos, se procedió a materializar la unión de los cordones superior e inferior en su arranque (véase Figura 8).

Cabe destacar que no se llevó a cabo montaje en blanco del tramo central del cordón superior porque en la fase de Proyecto se diseñó con sobre-longitud para poder llevar a cabo el ajuste preciso una vez se fuera a ejecutar la unión.

### 4. Izado mediante grúas

Tras la confirmación de la validez geométrica de los tramos conformados por medio del montaje en blanco de cada uno de los tercios, se procede a izar la estructura hasta la posición de inicio de ripado, con el objetivo ineludible de asegurar la tangencia entre tramos para garantizar así la geometría final y los esfuerzos teóricos empleando para ello los útiles de tangencia comentados anteriormente y las ménsulas de apoyo.

Esto fue posible gracias a un control preciso teórico de reacciones y deformaciones fase a fase. La secuencia de izado fue la siguiente:

- Izado del primer tercio (cordones inferiores, cordones superiores, riostra, vigas transversales, vigas de atado de cordones superiores y péndolas), próximo a la columna 1E-45 (véase Figura 9).
- 2. Izado del tercer tercio (cordones inferiores, cordones superiores, riostra,

- vigas transversales, vigas de atado de cordones superiores y péndolas), próximo a la columna 1E-46.
- 3. Izado del tercio central (cordones inferiores y vigas transversales).

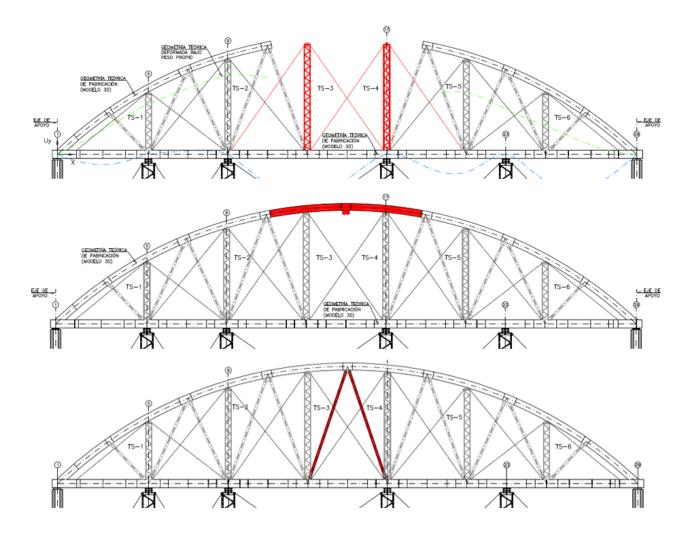
Una vez llegados a este punto, se colocaron sendas torres de apeo auxiliares para el apoyo del tercio central del cordón superior. A continuación, se procedió al izado de los cordones de forma individual y, en última instancia, a la colocación de la última viga de atado.

Tras llevar a cabo el ajuste previsto de la longitud del tramo central del cordón superior, se procedió a su soldadura con el resto de la estructura y a la colocación de las péndolas faltantes (véanse las Figuras 10 y 11).





Llegados a este punto la estructura se encontraba lista para proceder a la maniobra de ripado.



# 5. Maniobra de ripado

Tal y como se ha anticipado anteriormente, bajo la traza definitiva del puente discurre una vía férrea que presenta un gran esviaje con respecto a la alineación del puente, lo que impedía llevar a cabo cualquier trabajo bajo la sombra de la nueva estructura en su posición definitiva.

Fue preciso, por ello, montar la estructura metálica sobre las previamente comentadas estructuras auxiliares, ubicadas a 28.55 m de su posición definitiva y llevarla a sitio mediante un proceso de desplazamiento transversal (ripado), tirando de ella mediante cables accionados por gatos hidráulicos, y haciéndola deslizar sobre almohadillas de neopreno –teflón. La subcontrata encargada de la maniobra de ripado fue Freyssinet S.A.

Antes del inicio de la maniobra el puente se encontraba apoyado sobre 4 parejas de torres de apeo intermedias. En los extremos, la estructura apoyaba sobre pilas de hormigón.



Figura 12. A la izquierda, el puente en su posición inicial antes del ripado. A la derecha, el dintel definitivo

estructura, se dispusieron neoprenos provisionales, al objeto de reducir las cargas sísmicas longitudinales a absorber por las pilas de hormigón.

Transversalmente se colocaron topes metálicos, que transferían las cargas al dintel definitivo.



neoprenos permitían un reparto uniforme de la carga vertical sobre los patines. Las rótulas permitían absorber los giros provocados por errores en la ejecución de la viga de ripado sin introducir torsores en dicha viga.

Con un proceso idéntico al utilizado para la elevación, se descendió el puente hasta el contacto y transferencia de carga a las rótulas esféricas.



#### 5.1 Inicio de la maniobra

La maniobra comenzó con la elevación del puente a través del accionamiento de cilindros hidráulicos de elevación dispuestos a cada lado de cada uno de los puntos de apoyo (4 gatos de 1000 kN por cada apoyo). De esta manera quedaba liberada la carga de los neoprenos y de las torres de apeo intermedias. Los cuatro gatos de cada apoyo se conectaron hidraúlicamente, de forma que la carga era la misma en cada uno de ellos.

La posición de los mismos coincidía con la posición para los gatos de cambio de apoyos de la estructura, específicamente rigidizada para este tipo de maniobras. Los gatos estaban provistos de tuercas de bloqueo, cabezales basculantes y cajas de estabilización.

Una vez elevada la estructura se retiraron los apoyos de neopreno provisionales, y se colocaron los patines de ripado.

Sobre los patines de ripado se volvieron a colocar los neoprenos provisionales anteriormente utilizados, y sobre los mismos se dispusieron unas rótulas esféricas. Los



# 5.2 Ripado

Una vez el puente estuvo cargando sobre los patines se llevó a cabo la maniobra de ripado propiamente dicha.

Unos gatos hidráulicos huecos con una capacidad para 1320 kN, anclados sobre unas ménsulas de tiro ubicadas en el extremo opuesto del cabezal, traccionaban unos cables de pretensar (7\phi0.6") que se anclaban al carrito delantero. A su vez, ambos carritos se

encontraban conectados a través de dos barras de alta resistencia de 26.5 mm de diámetro.

En la cara inferior de los patines se dispuso una chapa de acero inoxidable, permitiendo el deslizamiento sobre la viga de ripado mediante la disposición intermedia de almohadillas de neopreno-teflón.

Los coeficientes de rozamiento obtenidos fueron de un 9% en estático y de un 4.5% en dinámico.

En emboladas de 300 mm el puente fue llevado a su posición, recorriendo una distancia total de 28.55 m. Durante todo el proceso se llevó a cabo un monitoreo, con toma de datos intermedios relativos a las cargas de tiro, deformaciones de viga de ripado, y giros de los distintos elementos.



Figura 16. Proceso de ripado

# 5.3 Transferencia a apoyos definitivos

Terminada la maniobra de ripado, fue preciso levantar el puente para posibilitar la retirada de los elementos de ripado ubicados en la superficie del cabezal (chapa de deslizamiento, mortero de nivelación...) y facilitar la soldadura del tope lateral del puente. Se realizó un procedimiento análogo al descrito en el apartado 5.1 del presente artículo, utilizando de nuevo los 4 gatos por a poyo de 1000 kN de capacidad.

Realizadas las maniobras necesarias se descendió el puente hasta apoyarlo sobre sus apoyos de neopreno definitivos.



Figura 17. Puente en posición elevada

### 5.4 Fin de los trabajos

La ejecución de la estructura finalizó con la colocación de las tabletas prefabricadas, el hormigonado de la losa y la colocación de los elementos de vía (plintos, carriles, etc.).

#### Referencias

- [1] P. Ramondenc, X. Dilly, J. Martin, M. Triquet. El bow-string de Bonpas sobre el peaje de la A7 en el intercambiador de Avignon, Bulletin Ponts métalliques no. 19.
- [2] D. Friot, Bonpas Tied-Arch TGV méditerraée high-speed rail. Bridge over the A7 motorway toll plaza.
- [3] C. Petersen, Statik und stabilitat der baukonstruktionen, Springer Vieweg, 1982.
- [4] W. Hoeckman, T. Vrouwenvelder, Vortexinduced vibrations of the diagonal hangers of the Werkspoorbridge (Utrecht, NL), Steelbridge 2004.