

# PUENTES SOBRE EL RIO SIL

Hugo Corres Peiretti  
Alejandro Pérez Caldentey  
José Romo Martín  
Jorge Calvo Benítez

FHECOR ■ Ingenieros Consultores

## 1. INTRODUCCIÓN

Los puentes sobre el río Sil son dos celosías mixtas de tres vanos de 93.50+170.00+93.50 m y 357.00 m de longitud total, situados en el tronco de la Autovía del Noroeste entre San Román de Bembibre y Villafranca del Bierzo. La obra ha sido realizada por la Dirección General de Carreteras del Ministerio de Fomento, siendo el Director de Obra D. Julio Saullo Masso. La empresa constructora es A.C.S. siendo el jefe de obra D. Emilio Titos Martínez. El empuje de la estructura metálica ha sido realizado por Lastra Ibérica. El proyecto de los puentes y la asistencia durante el montaje y construcción ha sido realizado por FHECOR Ingenieros Consultores.

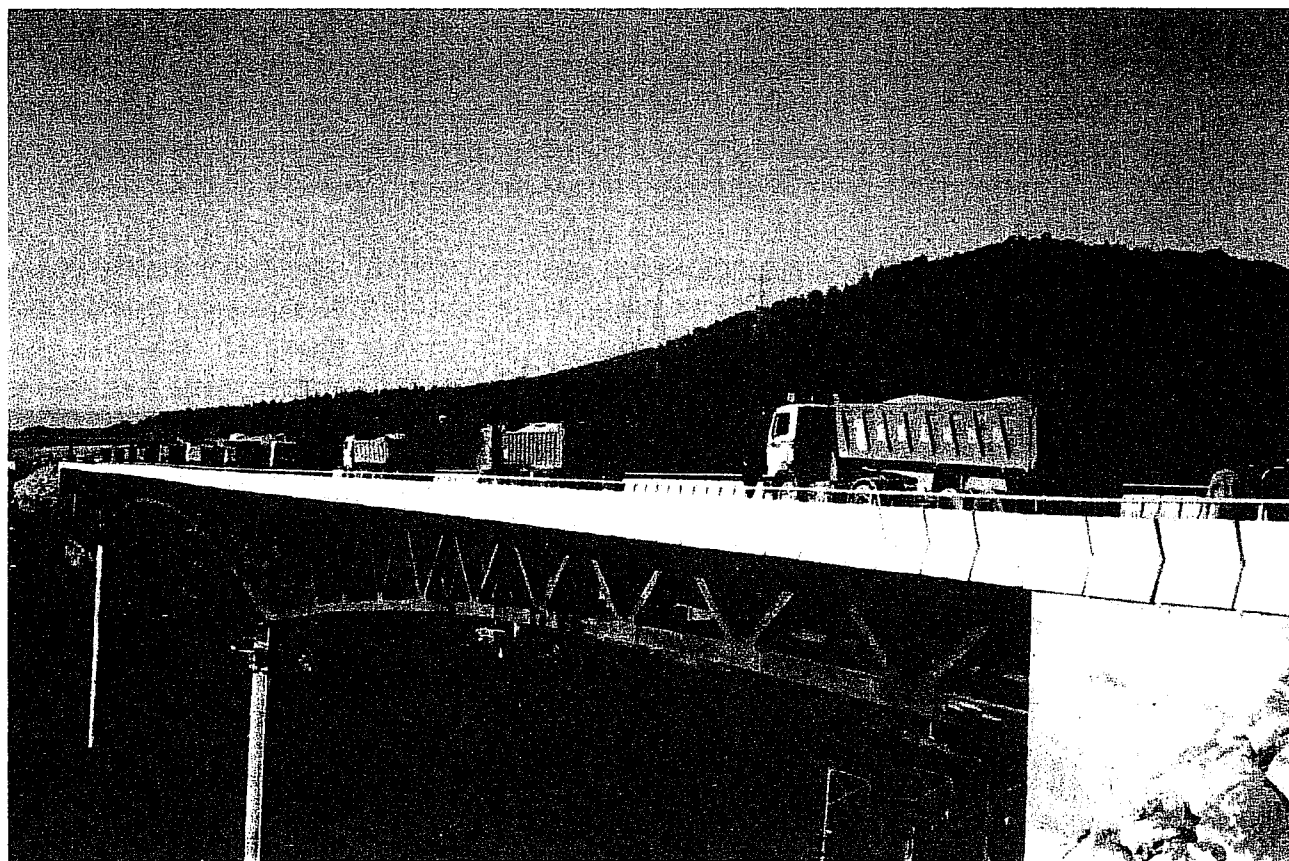


Figura 1. Puentes sobre el río Sil.

Los puentes sobre el río Sil se enmarcan dentro de la tipología de celosías mixtas, bien conocida y muy utilizada a lo largo del tiempo en diferentes esquemas estructurales y con distintos procedimientos constructivos. El puente de Tordera y el puente sobre el río Muga, ambos construidos en 1939 y proyectados por Torroja<sup>(1)</sup>, son dos magníficos ejemplos de las posibilidades de este tipo de puentes.

El puente de Tordera, de tres vanos isostáticos de 45.00+54.00+45.00 m de luz respectivamente, está resuelto con una celosía de canto variable elípticamente y una losa superior de hormigón armado que constituye el tablero. La geometría de celosía metálica está definida para optimizar el comportamiento estructural a costa de complicar su empuje, que requiere una estructura auxiliar muy importante. El puente sobre el río Muga es también una celosía mixta de 3 vanos isostáticos de 33.00 m de luz cada uno, pero de canto constante. En este caso el empuje se realizó más fácilmente, dando continuidad temporalmente a la estructura metálica. Luego los vanos fueron cortados y deslizados verticalmente hasta su situación definitiva. Años después Torroja reflexionaba sobre la posibilidad de mantener la continuidad y de utilizar la doble acción mixta, hormigonando una losa inferior en la zona de compresiones próxima a los apoyos.

Más recientemente estas ideas se adoptaron, a nivel internacional, en el puente de ferrocarril sobre el río Main en Nantenbach<sup>(2)</sup> y puente de Oresund<sup>(3)</sup>, en la unión fija entre Dinamarca y Suecia.

En ambos casos la tipología está fuertemente vinculada al procedimiento constructivo. El primer puente se construyó apeando los dos vanos laterales sobre el terreno e izando el vano central desde una barcaza situada en el río. En el segundo caso, los tramos metálicos se construyeron en taller y se trasladaron en barcas. Por último se montaron sobre las pilas y apeos intermedios con potentes grúas.

A nivel nacional existen diversos ejemplos de puentes en celosía: los viaductos sobre el río Neira, el viaducto de Viladrau, los puentes en la variante de Almería y el puente sobre el barranco de Cavalls<sup>(4)</sup>. Este último constituye un ejemplo especial que combina la celosía mixta con pretensado exterior y que, por sus reducidas dimensiones, se montó directamente con grúas.

## **2. DESCRIPCIÓN DE LA SOLUCIÓN ADOPTADA.**

En el momento de diseñar los puentes sobre el río Sil se tenían dos fuertes condicionantes:

1. La solución debía minimizar el plazo de ejecución, que constituía un camino crítico.
2. La solución debía adaptarse a las difíciles condiciones topográficas de la zona y, especialmente, debía minimizar las cimentaciones de las pilas.

Desde el principio, tras la realización de un estudio tipológico que permitiera analizar distintas posibilidades, la solución de un tablero de celosía mixta construido por empuje de la parte metálica, posterior hormigonado de la losa inferior en la zona próxima al apoyo sobre pilas y, finalmente, de la losa superior surgió como la posibilidad más atractiva pues:

1. Se minimizaba el peso del tablero y, por tanto, se reducían y facilitaba la construcción de las cimentaciones.
2. Se podían alcanzar grandes luces, lo que permitía situar las cimentaciones de pilas en zonas accesibles, reduciendo las labores para ejecutar los caminos de acceso.
3. Se reducía el tiempo de ejecución de la estructura, ya que se independiza la construcción de pila y estribos de la de la parte metálica del tablero, que se ejecutaba en taller.
4. La solución en celosía era muy flexible desde el punto de vista del transporte y manipulación de piezas, sin perder la posibilidad de ejecutar en taller los detalles más comprometidos.
5. Frente a una solución mixta de alma llena (bijácena o cajón cerrado) la solución en celosía proporciona una gran transparencia y menor impacto visual.
6. Las posibilidades de colocación de la celosía metálica en posición ofrecían un rango amplio de posibilidades: desde la ejecución y colocación de tramos pequeños con apeos intermedios y potentes medios de elevación, hasta empujes diversos ó combinación de ambos.

La solución adoptada finalmente está constituida por un tablero de tres vanos, de 93.50+170.00+93.50 m de luz, de celosía mixta de canto variable parabólicamente, con 10.00 m de canto sobre pilas y 4.00 m de canto en la sección central del vano principal y sobre estribos (Figura 2).

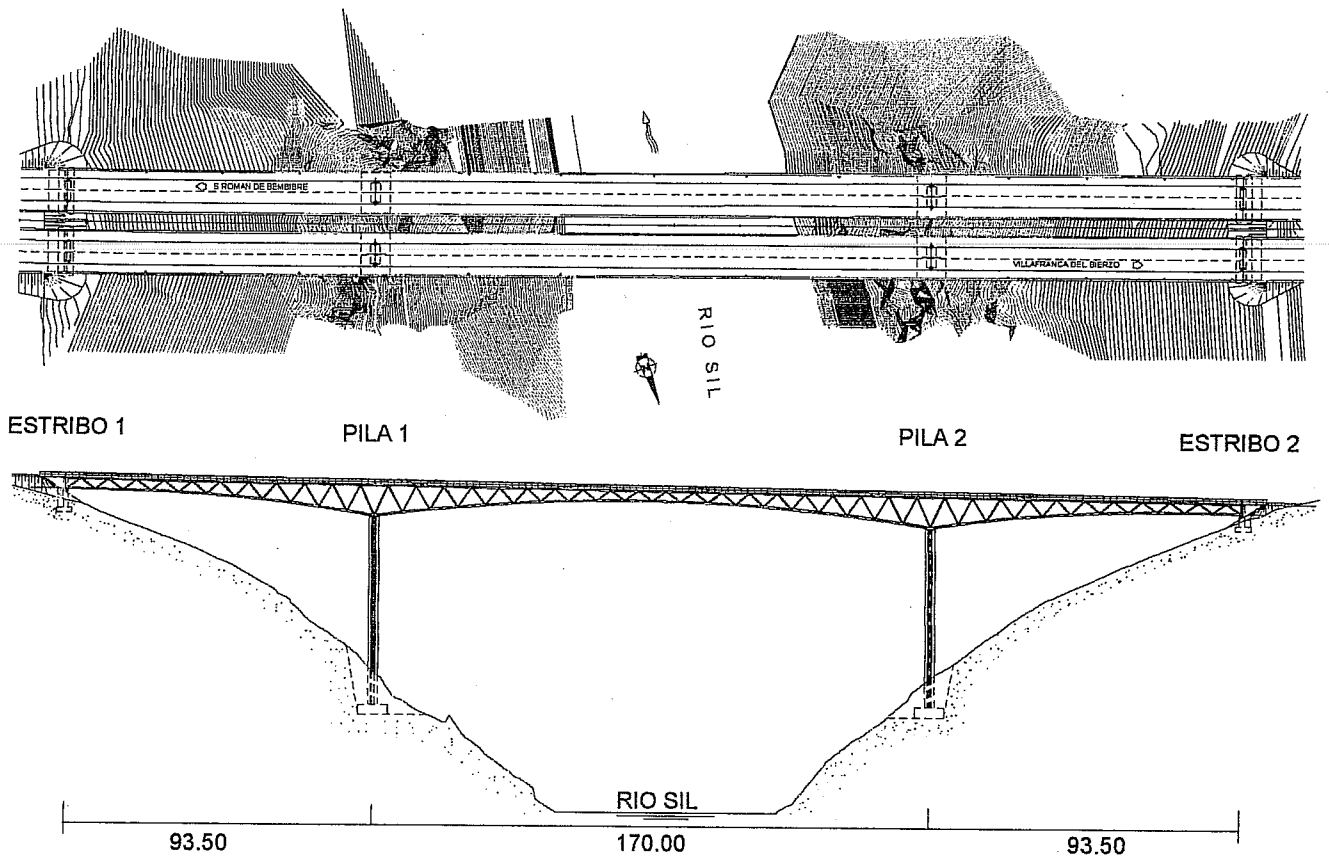


Figura 2. Alzado y planta generales.

La sección transversal del tablero está formada por un par de celosías metálicas separadas a una distancia de 6.05 m entre ejes y unidas por perfiles transversales entre los nudos (Figura 3).

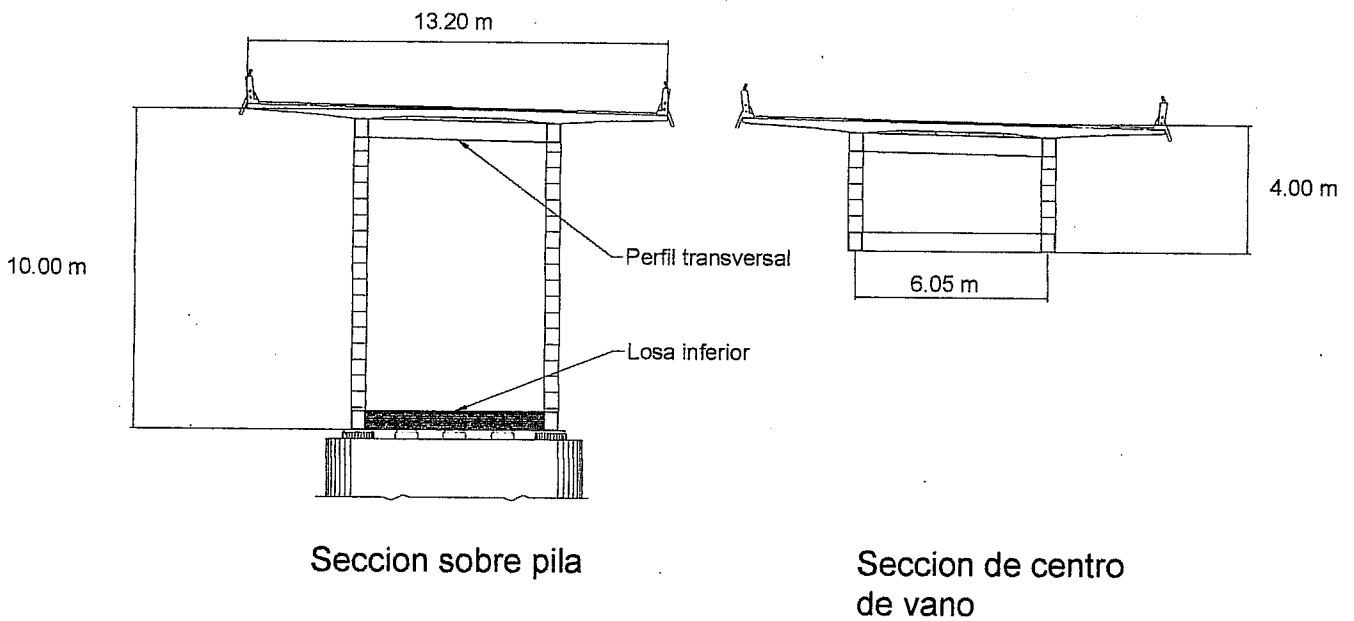
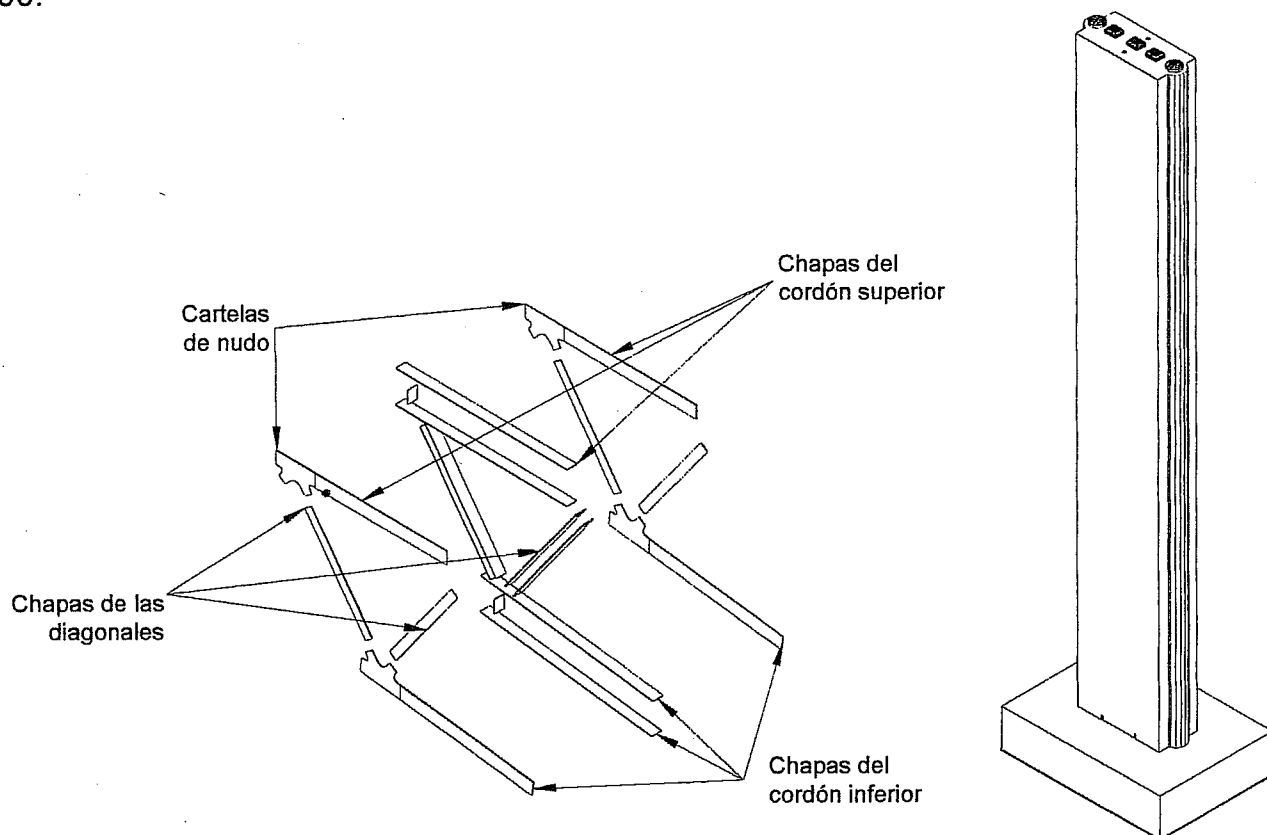


Figura 3. Secciones transversales sobre pila y centro de vano del vano principal.

En sentido longitudinal la distancia entre nudos, tanto en el cordón superior como en el inferior, es constante e igual a 8.50 m. Los cordones superior e inferior están formados por cajones cerrados de 0.60 x 0.45 m y las diagonales por cajones de 0.40 x 0.45 m. Los espesores de chapa son diferentes dependiendo de su situación en la estructura, variando entre 10 y 40 mm. Los nudos de la celosía se resuelven con dos cartelas con acuerdos circulares, a las que se unen la chapas que constituyen los cajones del los cordones superior e inferior y las diagonales (Figura 4). Los perfiles transversales son vigas armadas de sección equivalente en un IPE-600.



Figuras 4 y 5. Despiece de las chapas de los cajones de la celosía y pilas.

La sección transversal del tablero se completa con dos losas de hormigón armado:

- La losa superior, que constituye la plataforma propiamente dicha, es de canto variable transversalmente, de 0.15 m en los extremos de los voladizos a 0.35 m sobre la celosía y de 0.35 m sobre la celosía a 0.25 m en el centro de vanos entre celosías. Esta losa se proyectó con hormigón H-25 aunque, por razones de rapidez de construcción, se ejecutó y proyectó con hormigón H-45.
- La losa inferior, situada en las zonas próximas a las pilas, recoge parte de las compresiones del comportamiento longitudinal del tablero. Esta losa tiene una longitud de 52.00 m en los vanos laterales y 43.50 m en el vano principal y es de canto variable entre 0.25 m a 0.50 m, sobre la pila. Esta losa se proyectó y ejecutó con hormigón H-45.

Para minimizar los costes de mantenimiento se empleó acero autopatinable resistente a la corrosión, tipo Corten ó Ensacor. La calidad del acero de la estructura metálica es S355J2G2W. La conexión entre la losa y el cordón superior de la celosía se realizó con pernos conectadores  $\varnothing 19$  mm. La conexión entre la losa y el cordón inferior se realizó mediante tacos conectadores de cuadrado de 50 x 50 mm

Las pilas, con una altura máxima de 56.00 m, son de sección rectangular hueca de 6.50 x 3.00 m y 0.40 m de espesor de pared. Presentan dos molduras semicirculares de 2.00 m de diámetro en las caras laterales (Figura 5). Las pilas son de hormigón H-45.

El tablero se apoya sobre las pilas en pots fijos, situados sobre las molduras semicirculares, y en los estribos en apoyos de neopreno-teflón libres.

Para recoger la componente vertical de la losa de hormigón del cordón inferior, existen tres neoprenos, situados entre los apoyos fijos antes indicados, que permiten transmitir las fuerzas de desvío directamente a la cabeza de la pila.

En el sentido transversal el cordón superior de la celosía, formado por la losa superior y el cordón metálico correspondiente, está apoyado en el estribo mediante un tope especialmente diseñado que impide ese movimiento. Este sistema permite que las cargas horizontales, debidas al viento fundamentalmente se transmitan a los estribos, a través de la flexión de la losa superior funcionando como viga. Para cumplir con este cometido la losa superior dispone de una armadura especial en los bordes del voladizo. Este esquema minimiza los momentos transversales de las diagonales y de los perfiles transversales de unión de celosías, lo que ha permitido simplificar notablemente el detalle de los nudos.

Longitudinalmente el tablero, que como se ha dicho está apoyado sobre teflones libres en los estribos y fijos en las pilas, tiene el movimiento longitudinal limitado a 0.10 m, en ambas direcciones. Esta solución, ya utilizada en otros proyectos por FHECOR Ingenieros Consultores, permite controlar los efectos de segundo orden de las pilas ya que el efecto de las deformaciones sobre los esfuerzos queda limitado al movimiento máximo admitido. Esto asegura el libre desplazamiento del tablero para movimientos lentos debidos a fenómenos reológicos y temperatura. Para movimientos rápidos, de frenado por ejemplo, el tope longitudinal dispuesto entre el cordón inferior y el paramento superior del hastial del estribo garantiza una deformación máxima como la prevista. Las pilas han sido dimensionadas teniendo en cuenta las condiciones indicadas.

### 3. PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO

La ejecución de los puentes sobre el río Sil se llevó a cabo según las etapas que se indican a continuación:

- Ejecución de pilas y estribos en obra y, al mismo tiempo, fabricación de las distintas dovelas de la celosía metálica en taller. La estructura metálica se dividió en 13 dovelas, que fueron fabricadas en taller y transportadas a obra. Cada una de estas dovelas estaba constituida por los cordones superior e inferior, con sus correspondientes nudos, y, aparte, las diagonales.
- Una vez en la obra se montaron las dos celosías que formaban una dovela, levantándolas y uniéndolas con perfiles transversales. El proceso de montaje se inició en la dovela que corresponde a la zona del tablero que apoya sobre la pila. A esta dovela se fueron añadiendo, a ambos lados, el resto hasta completar un semitablero de estructura metálica de 85.00+93.50 m de longitud.
- Finalizada la etapa de montaje se inició la etapa de lanzamiento para situar el semitablero metálico en posición definitiva. El lanzamiento se realizaba según las siguientes fases (Figura 6 y figuras 7 a 10).
  - ✓ Desapeo de la estructura de las torres de montaje.
  - ✓ Empuje sobre una pista de deslizamiento, situada en terraplén existente detrás del estribo, hasta que el extremo del semitablero se situaba en la vertical de la pila. En esta etapa el semitablero permanecía en voladizo, apoyándose en el cordón inferior, en una sección situada dos nudos por detrás del nudo de apoyo en pila y colgando del pórtico dispuesto al final del semitablero, donde se situaban asimismo los contrapesos.
  - ✓ Giro de la estructura hasta apoyar el extremo en voladizo sobre la pila. Para materializarlo se dispuso una viga de giro en la misma sección de apoyo durante el empuje situada dos nudos por detrás del nudo de apoyo en pila. El giro propiamente dicho se realizó levantando el puente con el pórtico trasero.
  - ✓ Deslizamiento de la estructura sobre el cordón inferior hasta su posición definitiva. Esta fase se realizó, primero, dejando que la estructura deslizase por peso propio y controlando el movimiento mediante unos cables de retenida. Los últimos metros de avance, debido a la posición casi horizontal de la estructura, se realizaron tirando desde la propia pila con gatos.

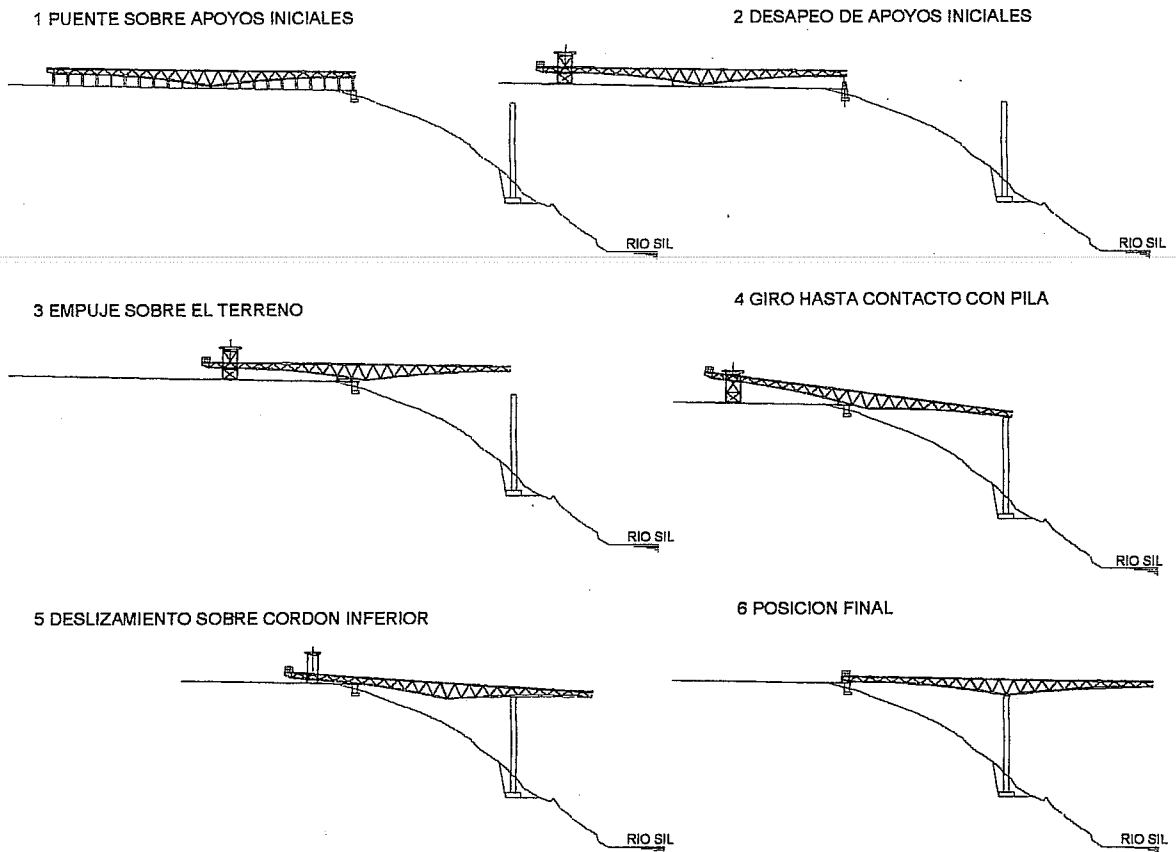
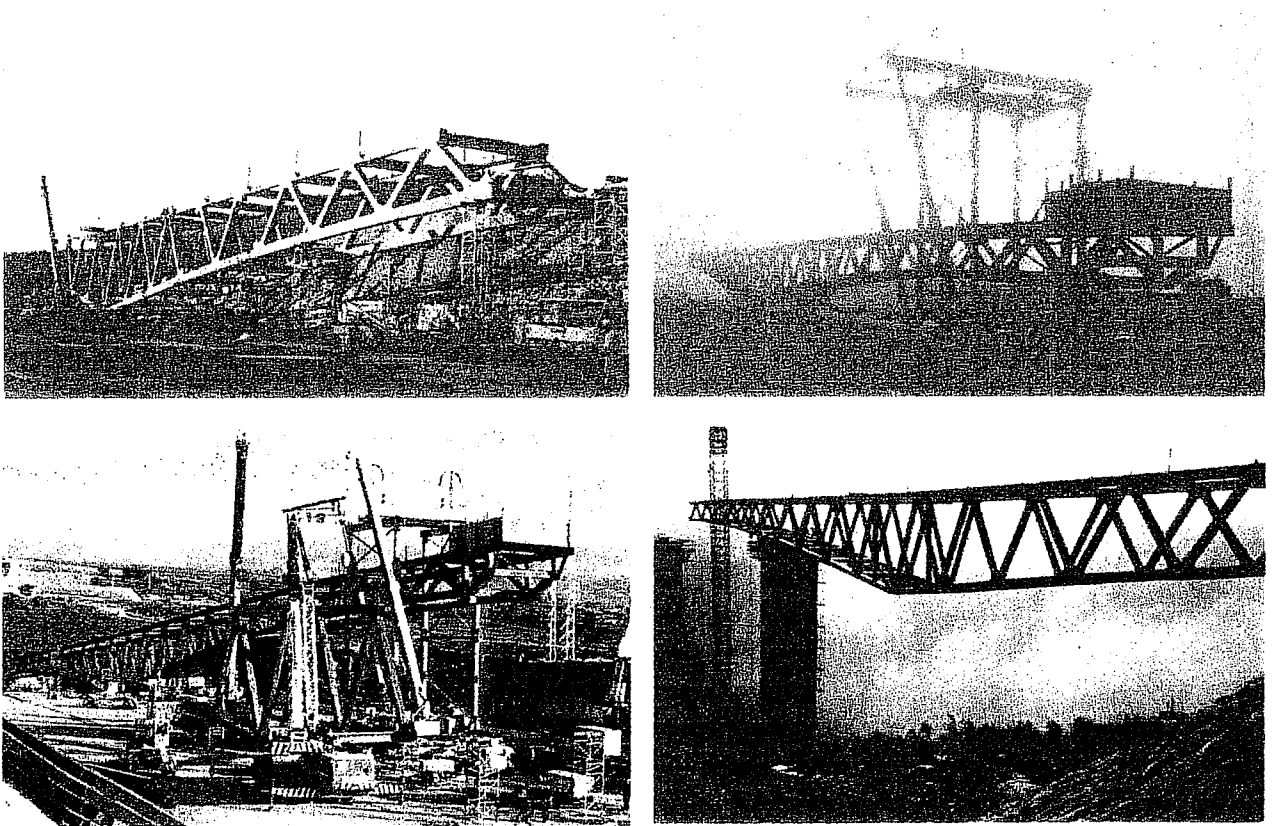


Figura 6. Fases del lanzamiento de un semitablero metálico



Figuras 7 a 10. Montaje, empuje, giro y deslizamiento de la estructura de un semitablero metálico



✓ Este procedimiento se repitió para el otro semitablero. Una vez enfrentados ambos tramos se procedió a ejecutar la dovela de cierre.

- Una alternativa de lanzamiento, que se consideró durante la ejecución del proyecto de los puentes, fue la de empujar la estructura apoyándola en el cordón superior, es decir, sobre un soporte horizontal. Sin embargo, esta solución requería la ejecución de un pórtico de grandes dimensiones sobre el reducido espacio de la pila.
- Con la estructura metálica completa se hormigonó la losa inferior y, finalmente, la losa superior, empleando dos carros de hormigonado que partían desde los estribos y avanzaban hacia el centro del tablero (Figura 11).

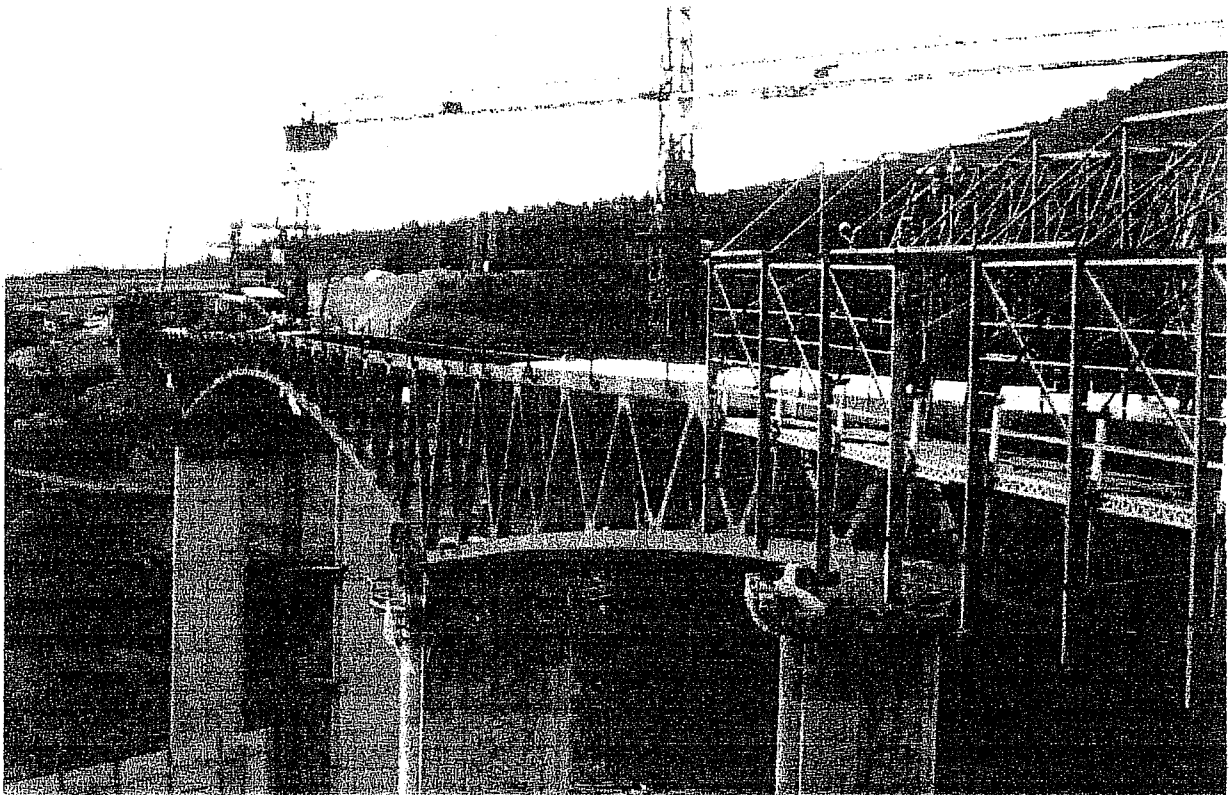


Figura 11. Hormigonado de losa superior con carros.

#### 4. INSTRUMENTACION

Durante las distintas etapas del lanzamiento se realizó un control de las fuerzas, en los distintos gatos, y de la geometría, mediante topografía clásica. Adicionalmente en uno de los semitableros se dispuso una instrumentación, realizada por INTEMAC, cuyo fin era la medida de deformaciones y temperaturas en el acero estructural y en el hormigón en cuatro secciones transversales, a lo largo de las distintas etapas de la construcción y la prueba de carga.

Para ello se dispusieron bandas extensométricas, termopares y barras de armadura instrumentadas en diversas secciones: centro de vano lateral y principal; a  $\frac{1}{4}$  de la luz del vano principal y en la sección de apoyo en pila. Los valores obtenidos en cada etapa concordaron, sensiblemente, con los valores teóricos previstos.

## 5. CONSIDERACIONES FINALES

Los puentes sobre el río Sil se encuadran dentro de la tendencia a reeditar la utilización de las celosías mixtas, muy utilizadas en épocas anteriores, aprovechando las nuevas posibilidades que ofrecen las nuevas tecnologías de lanzamiento y montaje de grandes estructuras.

La ligereza de los tableros mixtos de celosía repercute positivamente en el resto de la estructura, permitiendo minimizar las cimentaciones de pilas en zonas de difícil acceso. El procedimiento constructivo utilizado, con un premontaje de la estructura metálica fuera de su emplazamiento definitivo y el posterior lanzamiento hasta su posición, permite minimizar los plazos de ejecución al independizar la construcción de las distintas partes de la misma.

## 6. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. Torroja, E. "The Structures of Eduardo Torroja. An Autobiography of Engineering accomplishment". F.W. Dodge Corporation, New York 1953.
2. Reiner, S. "Puentes de gran luz con sección compuesta doble". I Jornadas Internacionales de Puentes mixtos. Barcelona 1992.
3. The Oresund fixed link. Oresund Konsortiet.
4. Corres, H.; Pérez, A. "Un ejemplo de estructura mixta combinada con pretensado exterior: el nuevo puente sobre el barranco de Cavalls en Valencia". Estructuras pretensadas en España 1994-1997. XIII Congreso de la FIP y Expositores. Amsterdam. ACHE. 1998.