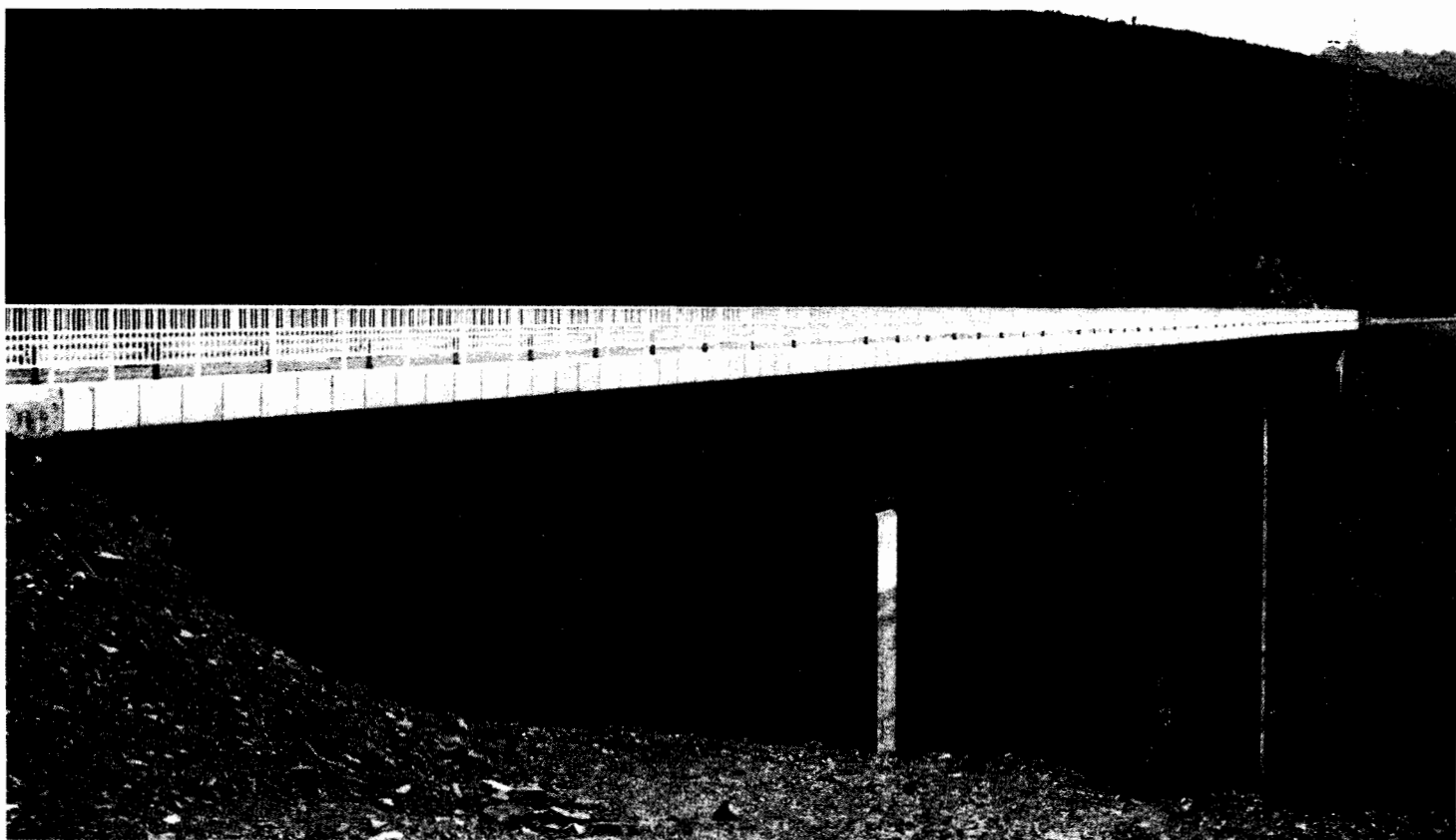




PUENTE PARA LOS IBORES

Ramiro R.-Borlado y Olavarrieta
Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

Introducción

Es un hecho curioso que, frecuentemente, cuando se abandonan las carreteras nacionales, para transitar por otras de segundo orden, lo que se pierde en velocidad, se gana en belleza del paisaje.

Si se deja la NV unos kilómetros antes de llegar a Navalmoral de la Mata para tomar la que conduce a Guadalupe, se tendrá un buen ejemplo de lo que acabamos de decir.

Los valles paralelos por donde discurren los ríos Ibor, de Viejas, Almonte, Garganta de Santa Lucía, sorprenden por su belleza, sus altas sierras, Palomeras, Villuercas, Ortijuela, su abundante vegetación.

En estos parajes discurre la carretera que llega hasta Guadalupe y que se decidió mejorar.

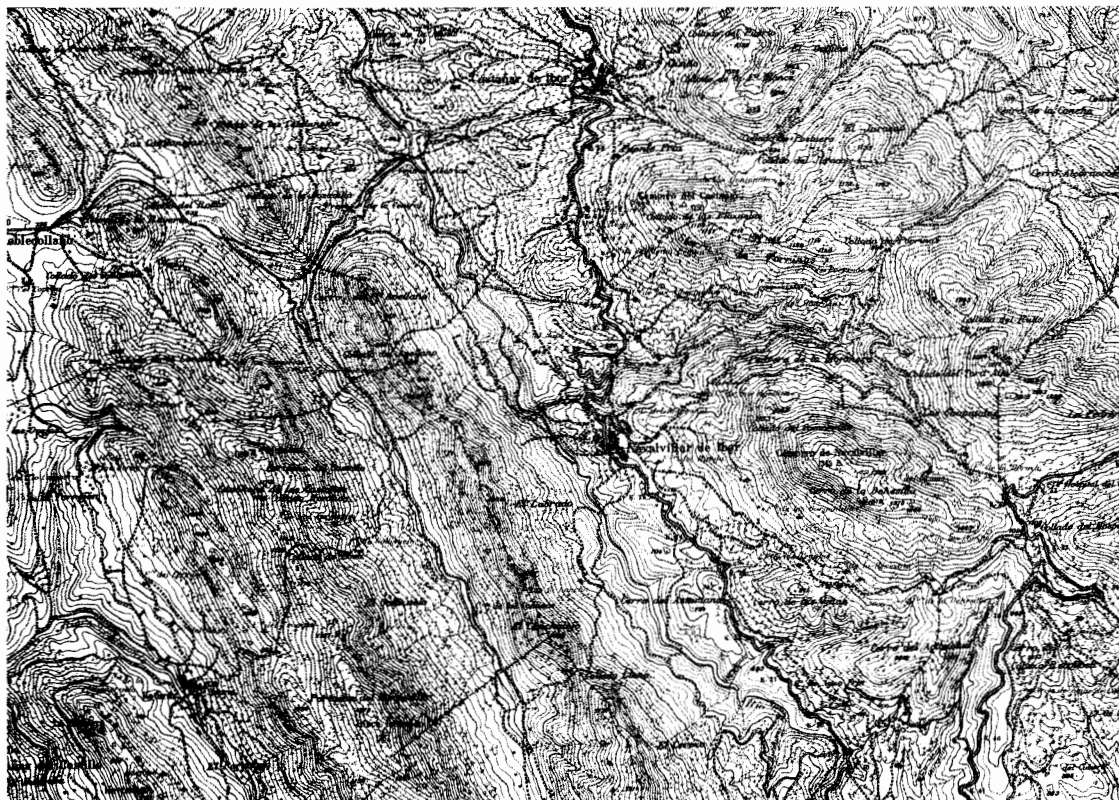
En fecha 16.08.88 se licitó (concurso para acondicionamiento y ensanche del tramo Ampliación y mejora de la carrera CC-713 de Navalmoral de la Mata a Guadalupe, P.K. 0.00 a P.K. 72,8 que fue adjudicado a Dragados y Construcciones, S.A. en 14.09.88.

La carretera de Navalmoral de la Mata a Guadalupe discurre en su mayor parte próxima al río Ibor, entre las sierras de Villuerca y Palomeras, en un espléndido paisaje de topografía muy movida y cubierto de abundante vegetación.

El trazado existente se ha mantenido en su conjunto salvo ligeras modificaciones.

Sin embargo, en el tramo próximo al pueblo de Navalvillar de Ibor, dicho trazado descendía hasta el fondo del valle, 65 m, en una longitud en planta de unos 3 Km.

La empresa adjudicataria entendió que mejoraba considerablemente la seguridad y calidad del



servicio de la carretera sustituyendo ese tramo por un puente y sus accesos de mucha menor longitud.

Admitida en principio la variación, se realizaron diversos tanteos, llegándose a la conclusión de que la mejor solución consistía en proyectar un puente de 200 m. de longitud total.

Proceso proyectivo

Se comenzó entonces a la realización de una de las fases más apasionantes del trabajo del proyectista de puentes: el de idear las diversas soluciones y determinar la más idónea.

Como en toda obra de ingeniería, pero especialmente en los puentes, la actitud del ingeniero debe de ser la de satisfacer los diversos condicionantes destinados a que se cumplan las funciones de resistencia, de economía, de durabilidad y también aquellas otras de carácter no técnico como las estéticas, medio-ambientales y de integración en el entorno.

Ello es cierto en cualquier obra de ingeniería pero en cada caso, cada función, puede tener un peso diferente, y necesita un grado de cumplimiento distinto, según las circunstancias particulares, desde el punto de vista urbanístico, paisajístico o de uso.

Mientras que en un entorno urbano, en una ciudad importante, puede tener justificación dotar a un puente de cierta monumentalidad, sería inadecuado hacerlo en un entorno rural, en una llanura donde la solución menos llamativa puede aunar la economía, la estética y hasta la ética, pues el em-

pleo de recursos, que siempre son limitados, de forma arbitraria, restándolos de otros destinos más vitales, no se justifica éticamente.

En nuestro caso partimos de estas consideraciones resumidas en estas dos ideas:

- Integración en el entorno en su doble vertiente de usuario de la carretera y de habitante de la región. Para el primero, lo fundamental es la menor longitud y la menor perturbación a la vista, lo que apunta a un puente recto de tablero superior. Para el segundo hay que buscar formas y colores que armonicen lo mejor posible con el paisaje que inevitablemente perturban.

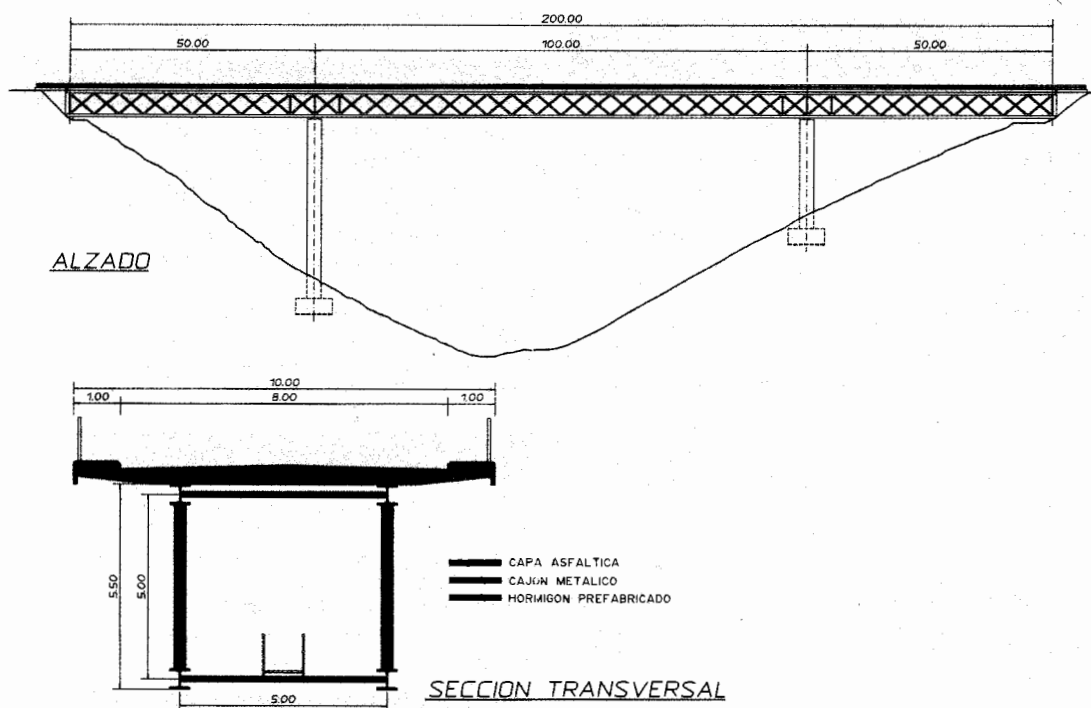
- Aplicación de la mejor técnica para llegar a la mejor depuración de las formas dentro de una economía razonable desechando tanto la cicatería como el despilfarro.

Pero existe un tercer condicionante que también emana del terreno y que es lo abrupto del mismo. Ello implica que la solución que se adopte tiene que contar desde el principio con el procedimiento constructivo.

La utilización de medios mecánicos de elevación, grúas, etc... desde el fondo de la vaguada se veía sin destrozar el entorno, muy dificultado por problemas de acceso, (curvas muy cerradas, carretera estrecha). Así mismo la realización de pilas es complicada por lo que era aconsejable reducir éstas al menor número posible, lo que hacía desear un viaducto de múltiples tramos.

Llegamos así a la conclusión de que la mejor opción era un viaducto en viga continua de tres vanos y tablero superior para lanzarlo desde ambos estribos.

VIADUCTO EN NAVALVILLAR



Los vanos laterales habían de ser lo más cortos posible a fin de no encarecer excesivamente el coste de las pilas. Fijamos así las luces en 50 m + 100 m + 50 m.

Había a continuación que elegir los materiales de tablero, vigas principales y pilas.

Son numerosos los proyectistas españoles que empiezan a reconocer que para puentes de luces grandes, desde 100 m. en adelante, los puentes metálicos pueden competir con los de hormigón u hormigón pretensado.

Según nuestra experiencia el límite económico entre unos y otros materiales está, según las circunstancias, en luces más reducidas.

Decidimos pues adoptar como material para las vigas principales el acero, y como tipología la de vigas en celosía que es, para un amplio rango de luces, la que proporciona la mayor economía, ya que un arco sería de más difícil ejecución.

Hace algunos años, se han construido muchos viaductos, tanto de carretera como de ferrocarril de vigas rectas, celosía múltiple y cordones paralelos.

Las almas muy caladas producían una impresión de ligereza que contrastaba con las robustas pilas. Como ocurre en los puentes del Salado y de Canalejas en Alcoy.

Actualmente no se construyen muchos puentes en celosía aun cuando constituyen una estructura muy ligera a la vista y que interfiere menos al paisaje que las vigas de alma llena.

Hay que procurar que las celosías respondan a las normas de buen orden para no alterar el efecto estético, con todas las barras con el mismo aspecto exterior.

Aún cuando el acero empleado sea autopatinable, por razones económicas, desde el punto de vista estético y ambiental sería preferible pintarlo armónicamente.

Cuando la Administración se decida a pintarlo «estrenaremos de nuevo puente» como decía no recuerdo quién.

Las pilas, de 30 m y 35 m de altura se han proyectado de hormigón armado, así como los estribos.

El tablero se ha realizado mediante losas prefabricadas de hormigón.

A continuación describiremos los distintos elementos del proyecto.

Bases de cálculo

Materiales.

El material de la estructura es ENSACOR con un límite elástico de 3.600 Kg/cm².

El acero para armar la losa se ha tomado el AEH-500N.

El hormigón de la losa es H-250.

Los tornillos de alta resistencia son tipo A-10t.

Coefficiente de seguridad

En la estructura metálica, se ha tomado 1,33 para las cargas permanentes y 1,50 para las sobrecargas. Sin embargo, la gran mayoría de las barras están dimensionadas con tensiones máximas bastante inferiores.

En la losa, se ha considerado para el acero de la armadura un coeficiente de minoración de 1,15

y de 1,50 para el hormigón. Como coeficiente de mayoración de las cargas, se ha considerado 1,6.

Modelización e hipótesis de cálculo de la estructura

Se han utilizado los siguientes dos modelos:

■ **Modelo 1:** En él, se han tenido en cuenta todos los nudos y barras de la estructura metálica total, puesto que hay que considerar hipótesis de carga no simétricas. En este modelo, se han contemplado las siguientes hipótesis de carga:

■ **Peso propio.**

Esta hipótesis se ha realizado simplemente a efectos de comprobación de peso aproximado de la estructura y de su deformabilidad. En los cálculos, no se consideran estos esfuerzos, puesto que, por la forma de realizarse el lanzamiento, los valores que realmente deben de intervenir en los cálculos de los esfuerzos en las barras son los correspondientes a los de dicho lanzamiento (Modelo 2), como luego se indica.

■ **Cargas permanentes.**

En esta hipótesis se han considerado el peso propio de la losa, las aceras, de $1,00 \times 0,20$ m., y el pavimento del aglomerado asfáltico de 0,05 m. de espesor.

- Sobrecarga uniforme en los vanos laterales.
- Sobrecarga uniforme en el vano central.
- Sobrecarga uniforme en dos vanos contiguos.

Estas tres últimas hipótesis se han combinado en los cálculos para encontrar el efecto más desfavorable.

■ **Vehículo de 60 toneladas.**

Se han considerado 20 subhipótesis que configuran las distintas posiciones del vehículo.

El efecto de las ruedas del vehículo equivale, con mucha aproximación, tanto en el cálculo de la barra sobre la que actúa, como para la estructura, a una sobrecarga uniforme de 12 t/m. en 5 m.

Los cálculos se han realizado con el programa GTRESS.

— **Modelo 2:** En este segundo modelo, se considera sólo la mitad de la estructura, por lo que la numeración de los nudos y barras es distinta de la del Modelo 1.

Por la forma de efectuarse el lanzamiento, como antes indicamos, se ha realizado con este Modelo la hipótesis de peso propio, en la posición final del lanzamiento. Los valores así obtenidos de los esfuerzos en las barras son los que hay que considerar en el cálculo de los esfuerzos más desfavorables, combinación de las distintas hipótesis posibles.

Comprobación de las barras de la estructura y de la fatiga

La comprobación de las tensiones máximas en las distintas barras, ha sido realizada mediante una «Hoja de Cálculo» del programa SIMPHONY.

Asimismo, en el mismo listado, se incluyen los valores $\Delta\sigma$, que son inferiores en todos los casos al límite de endurencia correspondiente a un detalle tipo C.

Efecto de viento y arriostrados

En el efecto de viento, se ha considerado el empuje prescrito por la vigente Instrucción.

La transmisión de dicho empuje a los apoyos se efectúa, en la parte correspondiente, por la jácena de arriostrado inferior y por la losa en la parte superior, a través de los arriostrados transversales.

Los arriostrados horizontales se han dimensionado, además, para coaccionar el pandeo de los cordones comprimidos y para transmitir los efectos de torsión, por disimetría de la sobrecarga.

Uniones

Todas las uniones de taller se realizaron por soldadura con preparación de borde, como la indicada en los Planos y con penetración total, y se radiografiarán en un 20 %.

Las uniones de obra son en parte atornilladas y en parte soldadas. Las soldadas se radiografiarán al 100 %.

Descripción del puente

El ancho de la plataforma es de 10 m. Está dotada de dos aceras elevadas de 1 m a ambos lados.

La longitud total del puente es de 200 m. entre juntas.

La estructura principal está constituida por dos vigas continuas de tres vanos, de 50 m. los laterales y 100 m. el vano central.

La separación entre las dos jácenas es de 5 m. entre ejes como puede observarse en la figura 1.

La elección del número de jácenas ha venido determinada por el criterio de que son mejores pocos elementos robustos que más elementos delgados.

En la misma figura puede observarse el tipo de triangulación, en rombo, elegido, que a nuestro criterio es de los más armónicos.

El canto teórico entre ejes de cordón superior e inferior es de 5 m. y el canto total de 5,50 m. Ver figura 2.

Para su transporte y posterior montaje en obra, se han proyectado los cuchillos cortados por la línea media horizontal y en trozos de aproximadamente 20 m. de longitud, que se fabricarán en taller, con todas las uniones soldadas y preparación de borde. Ver figura 3.

Los elementos fabricados en taller tienen una dimensión de 2,75 m. por una longitud aproximada de 20 m., que pueden transportarse por carretera.

Una vez en obra, se unieron para formar los cuchillos, realizándose el montaje en obra por mitades de su longitud total (100 m.) en cada uno de los accesos, una vez preparados éstos convenientemente. Las uniones en obra se proyectan en parte atornilladas con tornillos de alta resis-

Figura 1.

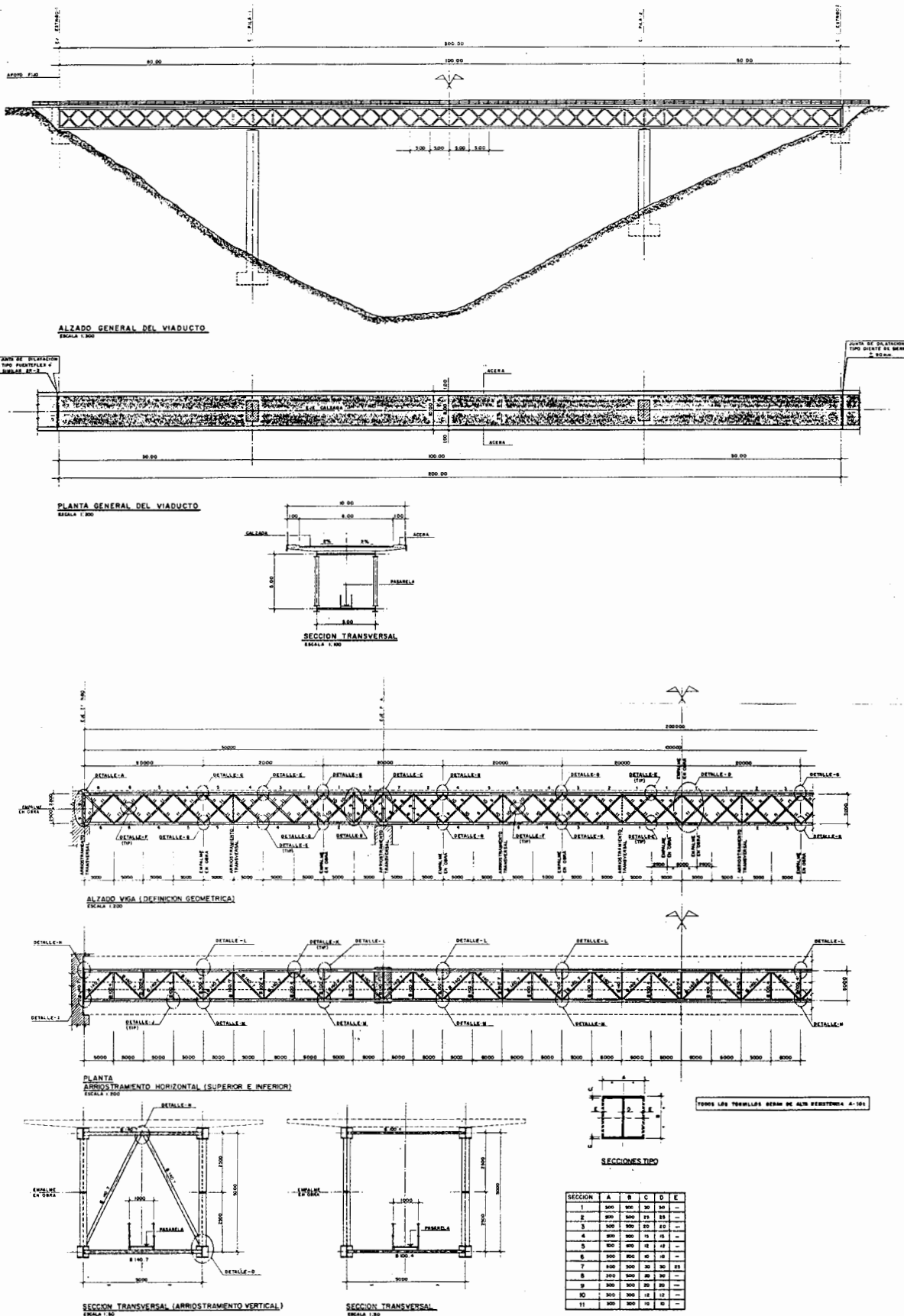


Figura 2.

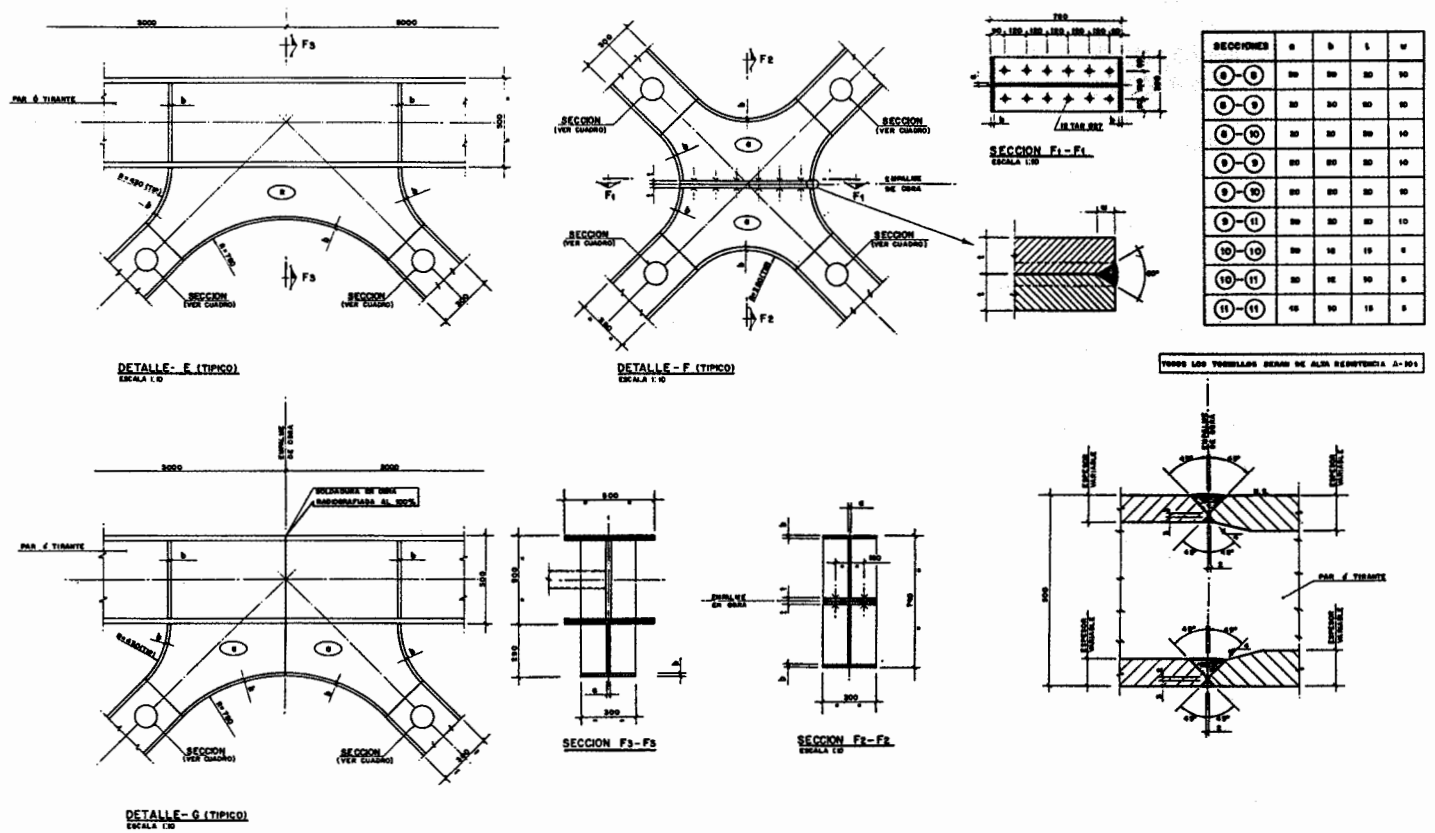


Figura 3.

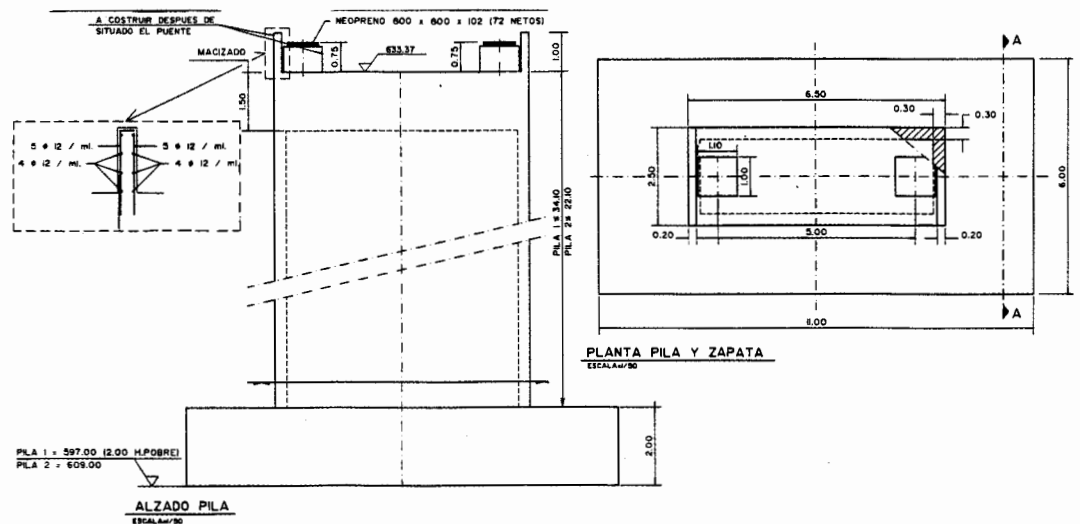


Figura 4.

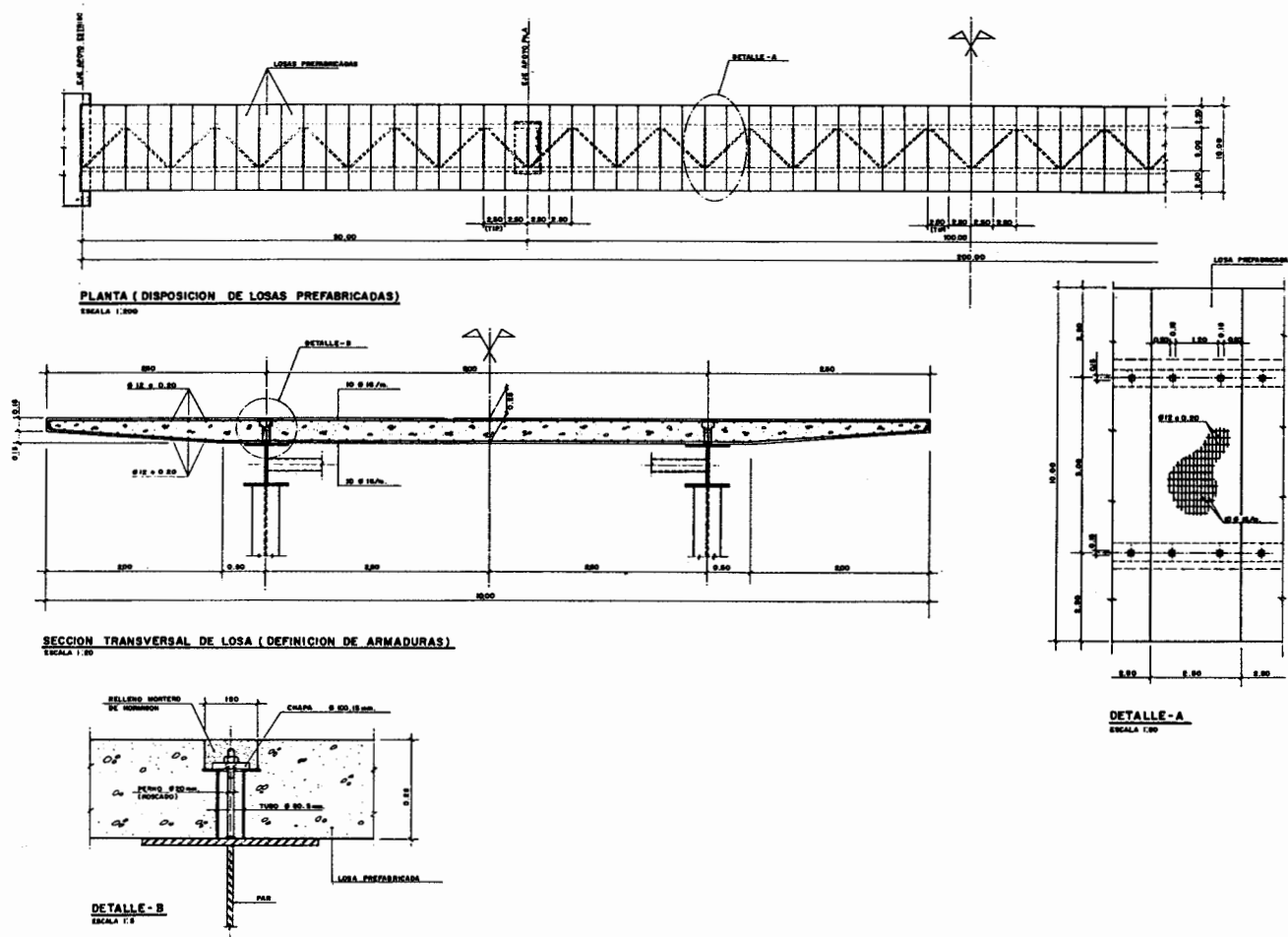


Figura 5.

cia y en parte soldadas; las horizontales irán atornilladas y luego soldadas.

En la misma figura 3 pueden verse los detalles de los nudos y la forma de canalizar las tensiones para evitar las concentraciones de las mismas y los consiguientes fenómenos de fatiga.

Se ha dotado a la estructura de los arriostros horizontales y transversales necesarios tanto para las diversas fases del montaje como para la situación final definitiva. La disposición y dimensiones de estos arriostros puede verse en la figura 2, donde también está indicada la pasarela de inspección y conservación.

El material de la estructura es acero ENSACOR con un límite elástico de 3.600 kg/cm².

El acero para armar de la losa se ha tomado el AEH-500N.

El hormigón de la losa es H-250.

Los tornillos de alta resistencia son tipo A-10t.

Los apoyos son de neopreno habiéndose tomado como punto fijo el de el estribo del lado de Castañar de Ibor. Ver figura 4.

El tablero está constituido por una losa prefabricada en elementos de 10 m x 2,5 m cuyas dimensiones se indican en la figura 5. Dicha losa, al menos teóricamente, no es colaborante con las

vigas principales. La unión de la losa a la estructura metálica se diseñó de forma que no se produzca transmisión de esfuerzos entre ambas.

Las pilas, de hormigón, se han construido con arreglo a las dimensiones que se indican en la figura 6.

En la figura 7 pueden verse esquemas de algunas de las diapositivas de lanzamiento, carros, gatos, bogies, etc...

En la figura 8 se representa la pieza que cierra la clave.

La relación proyecto-construcción

En el proyecto de puentes, el proyectista debe de idear un método viable de montaje con una economía razonable, de forma que el proyecto no sea una entelequía imposible de construir sin modificaciones esenciales y costosas.

Ello no quiere decir que cuando llega el momento de la ejecución, el constructor no sea capaz, en muchos casos, de adecuar el proceso de montaje a los medios de que dispone, mejorando el de proyecto.

Este estimamos que ha sido el caso en el puente de Navalvillar.

Figura 6.

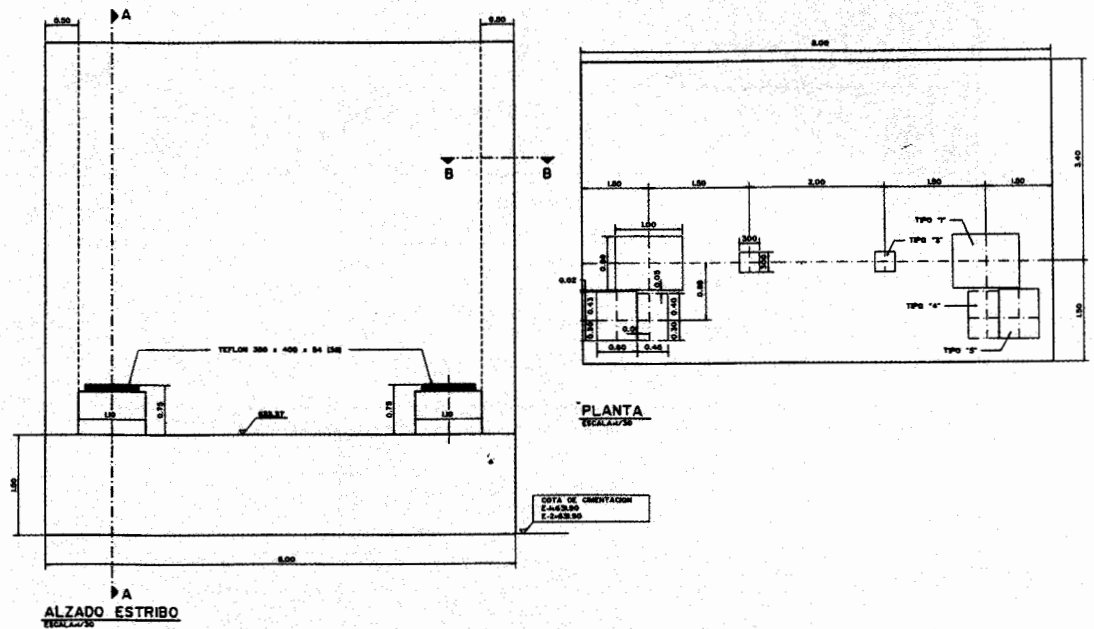
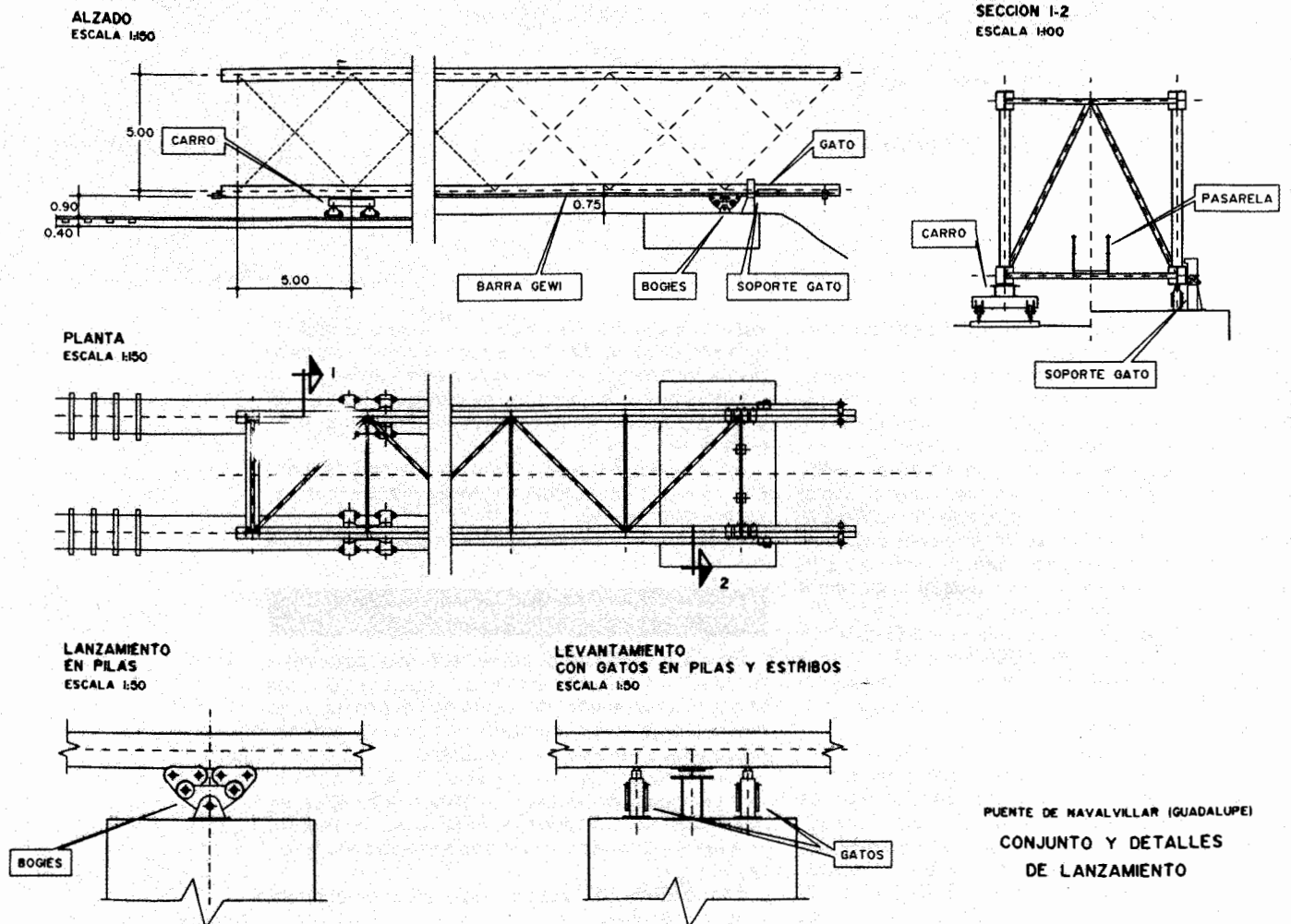


Figura 7.



PUENTE DE NAVALVILLAR (GUADALUPE)
CONJUNTO Y DETALLES
DE LANZAMIENTO

Figura 8.

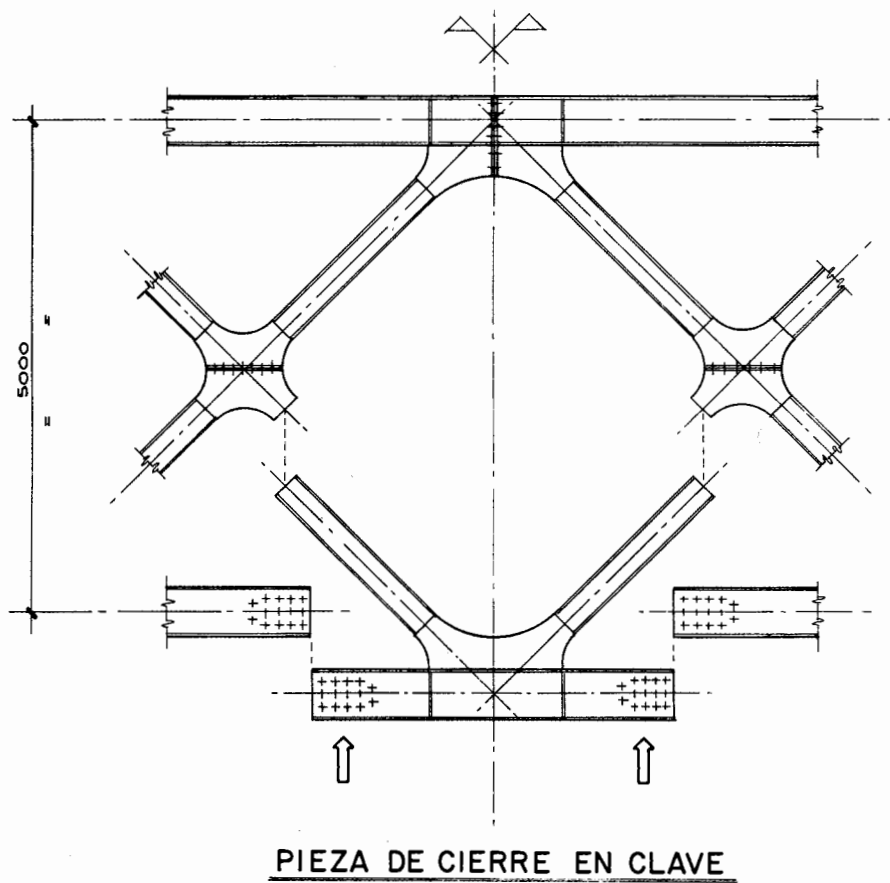
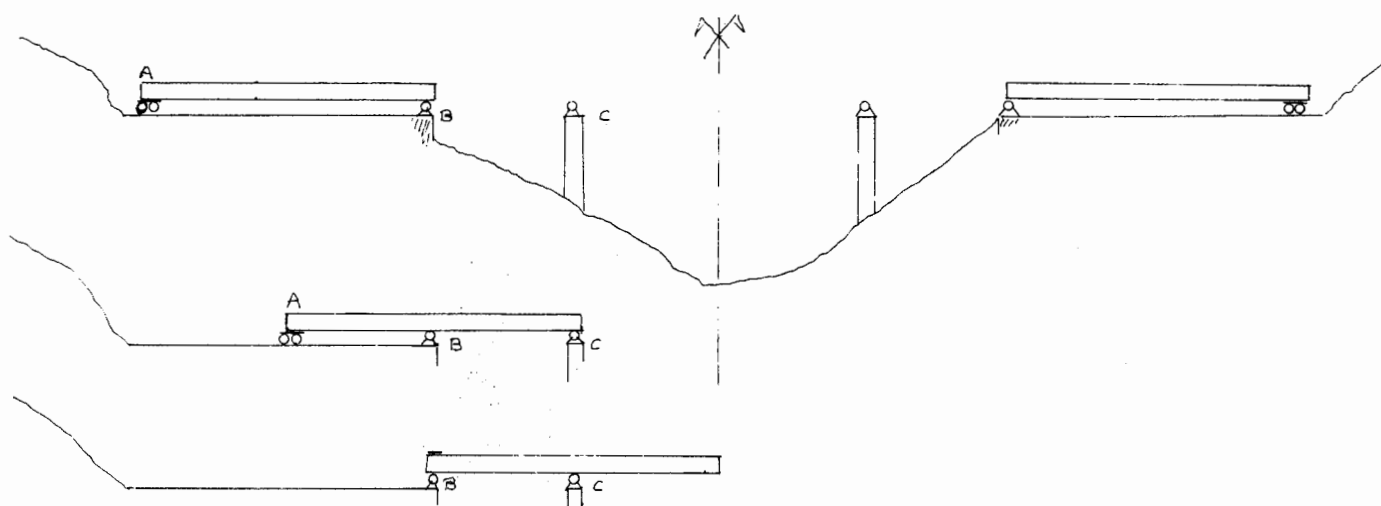


Figura 9.



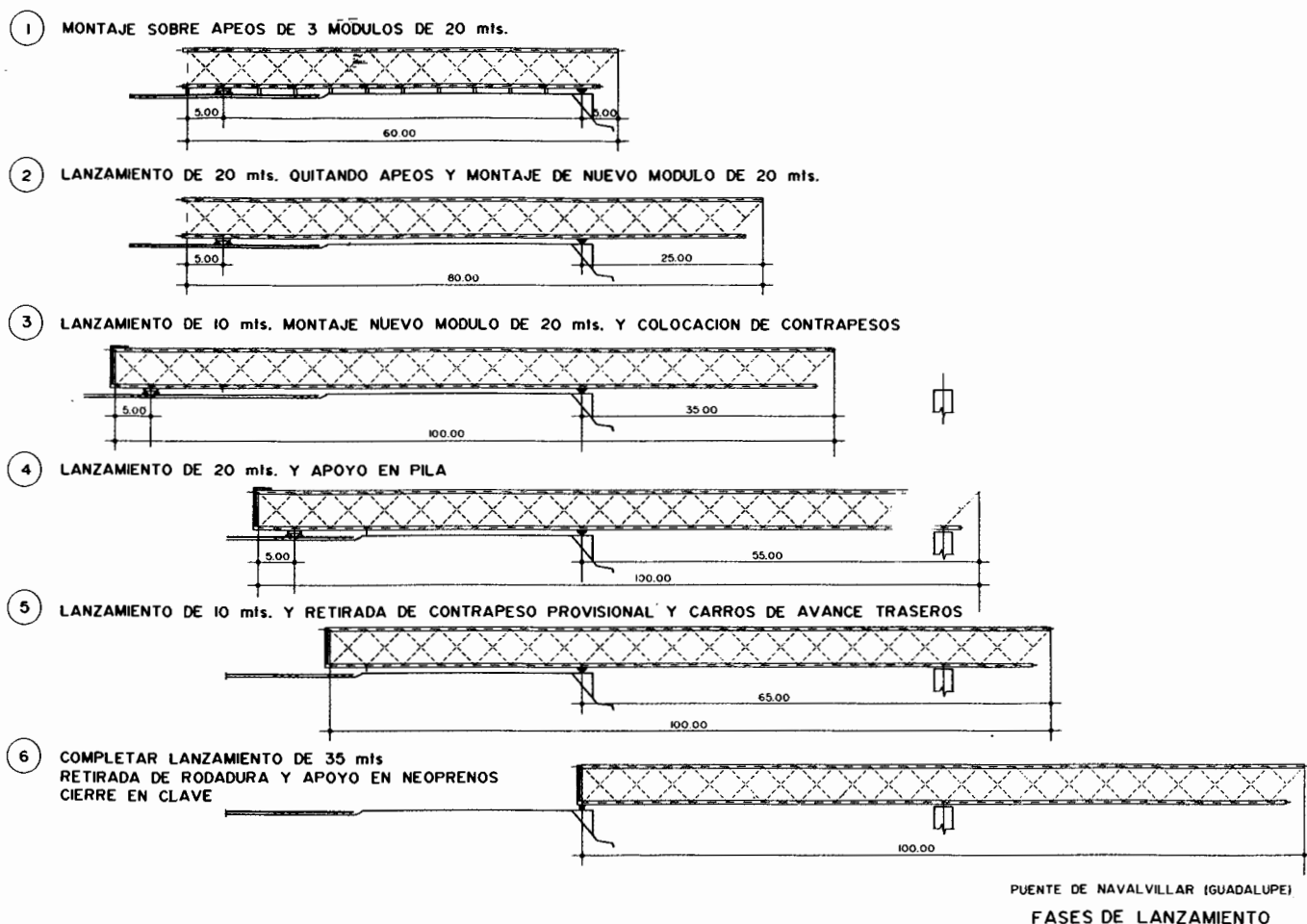


Figura 10.

El proceso de montaje previsto en el proyecto, se esquematiza en la figura 9.

Se preveía explanar una zona de longitud suficiente para montar en obra la estructura metálica de medio puente, que se transporta en tramos de 20 m de longitud y lanzarla apoyando en un carro en A y un rodillo en B.

El rodillo B se debía situar sobre gatos para poder compensar la flecha del extremo, a fin de poder alcanzar el rodillo en C.

La solución propuesta por el constructor se basaba en ir lanzando la estructura a medida que se construía (fig. 10) con lo que la explanación necesaria es menor.

En algunos momentos el carro A ha de desplazarse dejando temporalmente la estructura apuntalada en un punto, además de apoyada en los rodillos.

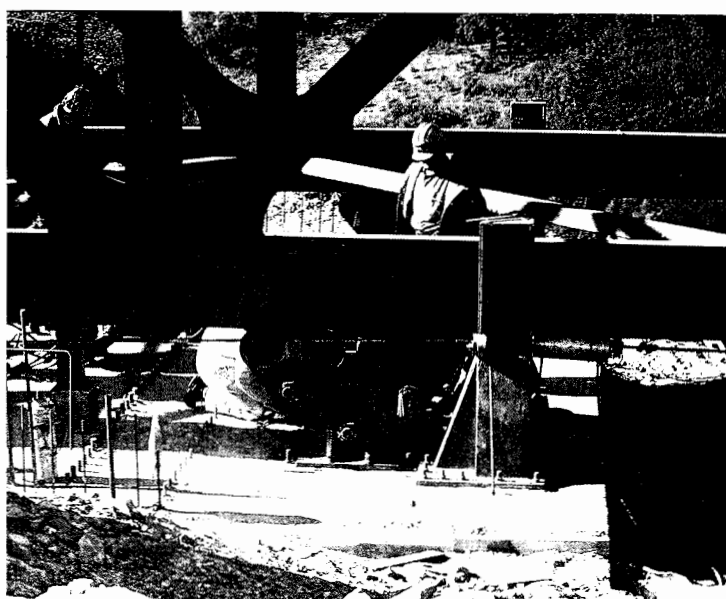
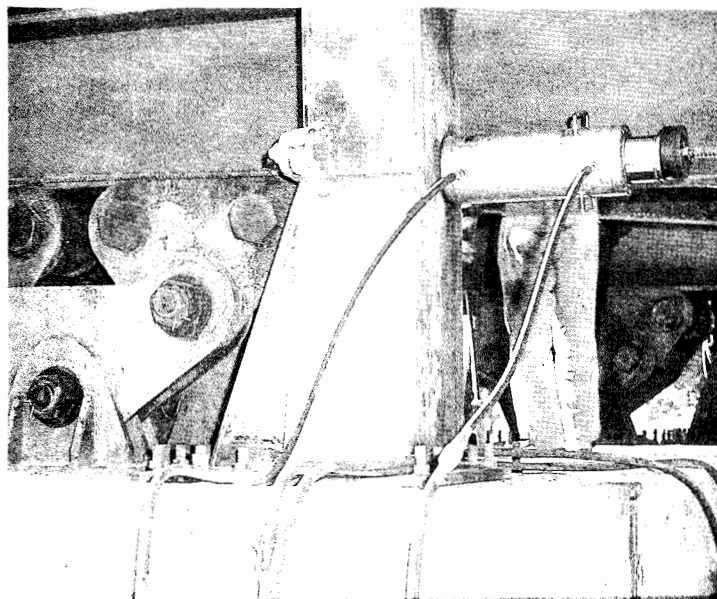
En algunas fases del proceso se colocaron tramos de la losa prefabricada a modo de contrapeso.

Ejecución

Mientras se preparaba la estructura metálica en taller, en obra se realizaban las siguientes operaciones:

- Ejecución de las cimentaciones de las pilas.
- Ejecución parcial de los estribos.
- Ejecución de las pilas.
- Preparación de las explanadas y gálibos de montaje en ambas márgenes así como de las pistas de lanzamiento.

Las vigas principales se transportaban a obra en elementos planos $20 \times 2,75 \times 0,5$ m que se acoplaban en obra primero con tornillos y luego con soldadura. Se enlazaban después los tramos de vigas principales mediante los arriostrados superior e inferior. Ver fotografía 1.

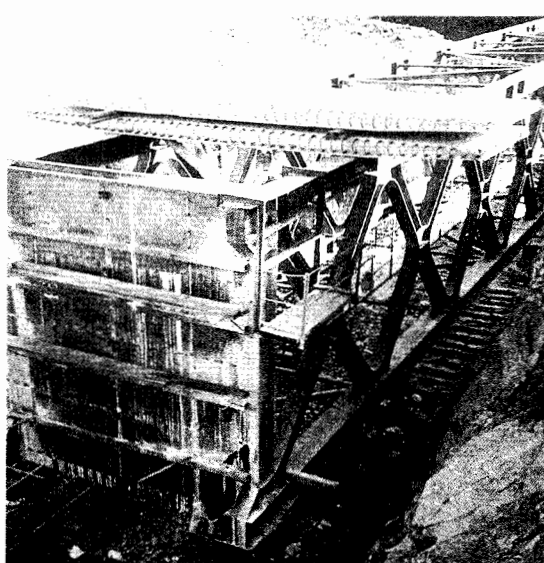


De la misma manera se fueron añadiendo tramos de estructura hasta tener una longitud total de 60 m. En este momento se comenzó el lanzamiento a fin de disponer de espacio en el gálibo para añadir un nuevo tramo de 20 m. Se prosigió de igual forma, según se indica en el esquema de la figura 8.

En las fotografías 2, 3 y 4 se pueden ver algunos de los elementos mecánicos utilizados en el proceso de lanzamiento.

Por la disposición de luces que se tuvo que adoptar, ha sido necesario hormigonar sendos contrapesos en los extremos del puente que se hormigonaron después de terminado el lanzamiento. En la fotografía 5 se puede ver la chapa posterior del contrapeso.

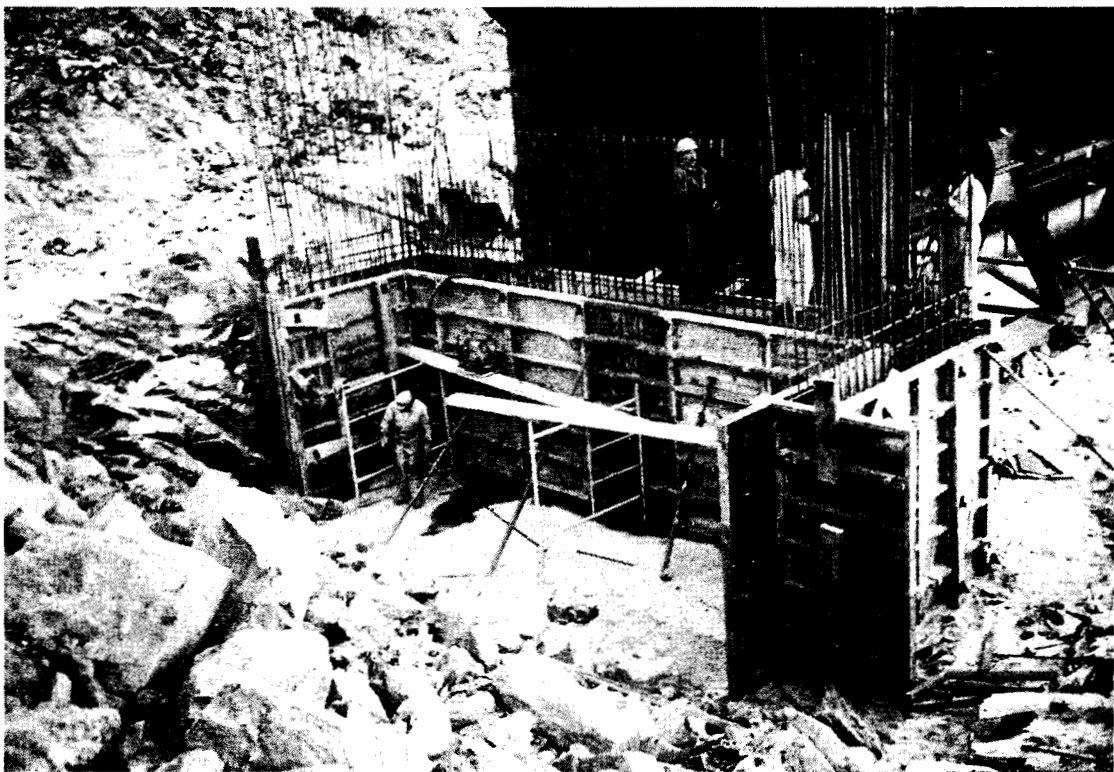
En las fases avanzadas de lanzamiento, cuando los tramos se aproximaron a su posición final, pero antes del cierre en el centro, estaba previsto, para aumentar la seguridad al vuelco, colocar contrapesos, para lo que se utilizaron tramos de la propia losa prefabricada, que se han fabricado



Fotografías 1, 2, 3 y 4.

Fotografía 5.

Fotografía 6.



Fotografía 7.





Fotografía 8.

en obra y acopiado en la misma. Ver fotografía 5 y 8.

Después de lanzado cada tramo se procedió a construir el resto de los estribos y a rellenar y compactar el área de gálibo de construcción. Ver fotografía 6.

Se procedió de la misma forma desde ambos extremos hasta llegar a la posición de cierre.

El montaje se realizó dotando a la estructura de una forma tal que las dos partes en voladizo tengan tangente horizontal.

Si definimos:

$Y_1 = f_1(x)$ la deformada de las dos semi-vigas en voladizo por peso propio del acero, e $Y_2 = f_2(x)$ la deformada debida a las cargas permanentes, con la estructura cerrada. la forma en blanco $Y_3 = f_3(x)$ se ha definido por $Y_1 + Y_2 + Y_3 = 0$.

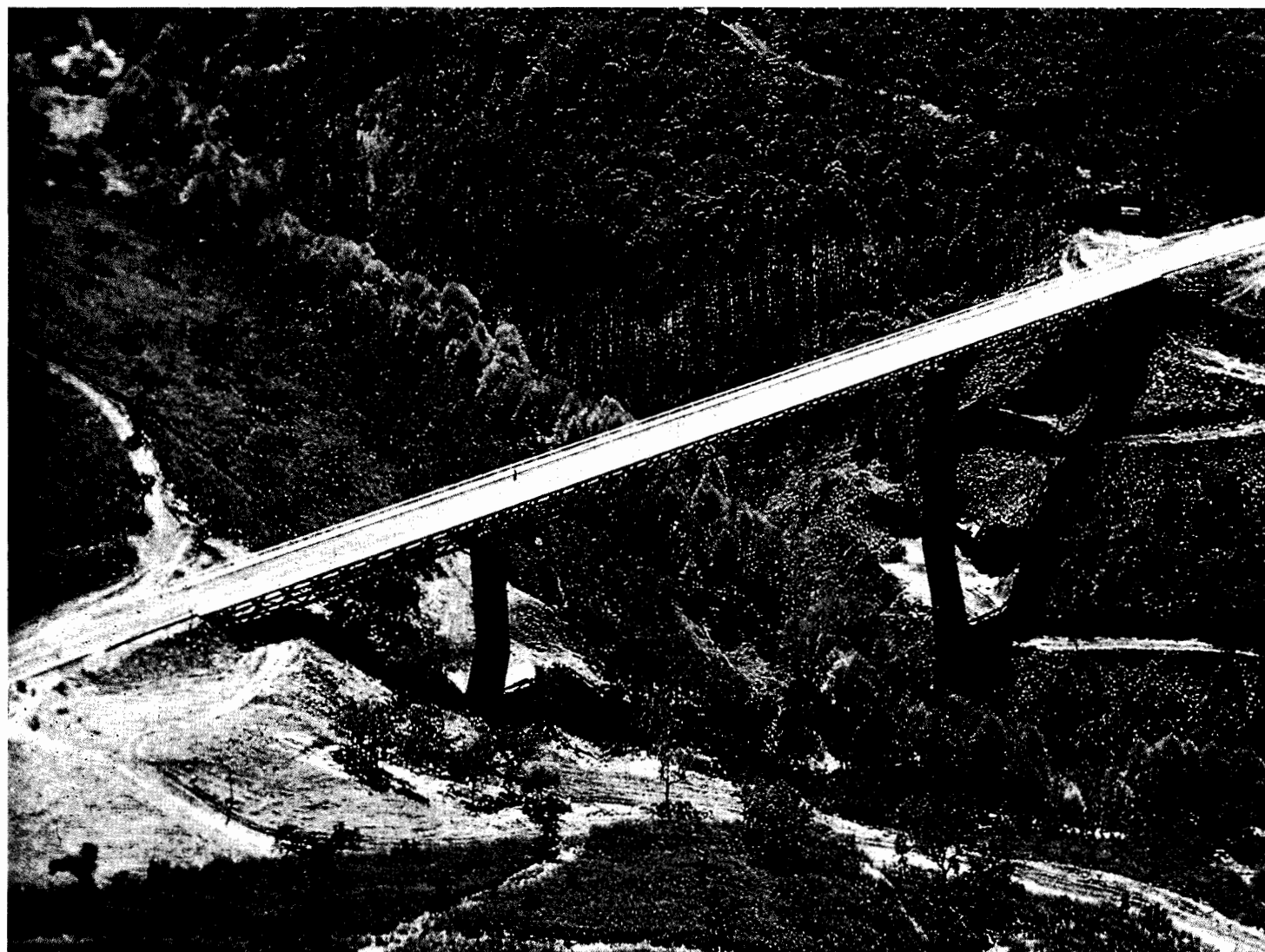
a fin de que el puente una vez terminado tenga una directriz recta y horizontal.

Fotografía 9. —



Fotografía 10.





Fotografía 11.

De esta forma el cordón superior podía enfrentarse con cierta facilidad ya que en ambas pilas y estribos se contaba con medios para dotar de movimientos verticales y transversales a ambos extremos.

Una vez atornillado el cordón superior, figura 9, solo restaba montar la "Pieza de Cierre" que se construyó con holguras suficientes para poder acoplarla con sencillez absorbiendo las pequeñas diferencias de ejecución y montaje. Figura 9.

En las fotos 7 y 8 puede verse una fase intermedia del lanzamiento.

El empuje de cada semipunto se realizó con dos gatos huecos de 60 t de capacidad unitaria que actuaban sobre barras GEWI de redondos 20 mm, ancladas a la estructura, y sobre unos soportes metálicos fijos al estribo. La fuerza aplicada osciló entre 4 y 12 t, para mover un peso máximo de unas 200 t entre estructura y contrapesos, alcanzándose una velocidad de avance de 6 m/h. Para la rodadura se dispusieron dos puntos fijos, mediante bogies anclados a pila y estribo, y sobre los que rodaban los cordones inferiores de la estructura, y uno móvil, consistente en carros so-

bre raíles que recibían el extremo trasero de la estructura y avanzaban con ésta; estos carros eran retirados una vez apoyada la estructura sobre los bogies de pila y estribo.

El sistema preveía la utilización de gatos de acción vertical y horizontal para efectuar correcciones de alineación para el acoplamiento en clave, sustitución de bogies por apoyos definitivos, etc.

Terminado el montaje de la estructura metálica se procedió a la colocación y fijación de las losas prefabricadas de hormigón y al acondicionamiento de las juntas entre ellas. Fotografías 9 y 10.

En la fotografía 11 se muestra el puente terminado que semeja una blanca cinta cruzando el paisaje.

La cantidad total de acero autopatinable del puente es de 153 kg/m². La belleza en los puentes, como en otros ordenes de la vida es opinable e influible por el factor «moda».

Con triangulaciones ordenadas, ligeras y tranquilas, no hay motivo para que este tipo de puente no se realice con más frecuencia, siendo más adecuado para estas luces que otras tipologías. ■