

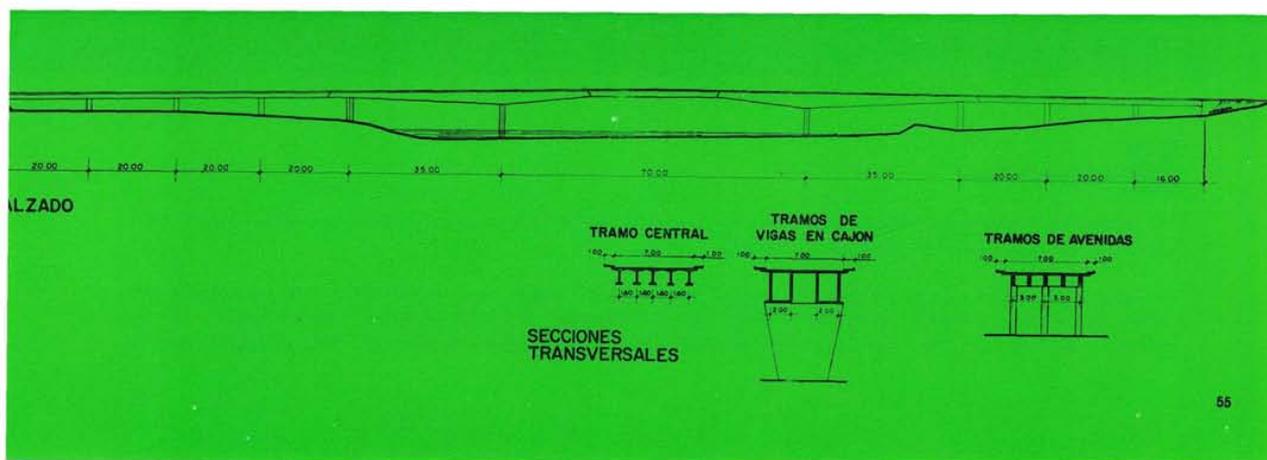
## *puente de Almodóvar sobre el río Guadalquivir, cerca de Córdoba*

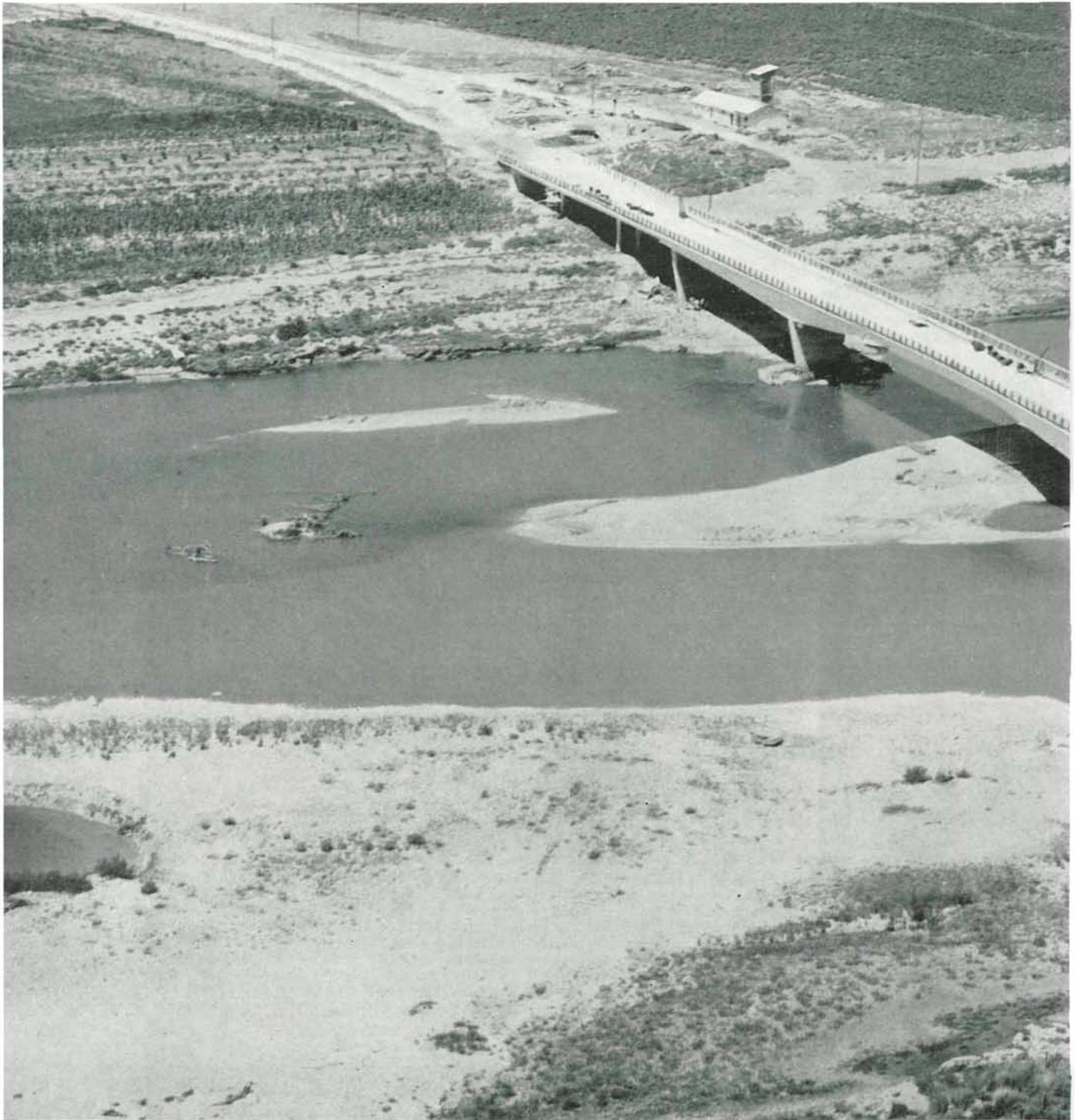
CARLOS FERNANDEZ CASADO, Dr. ingeniero de caminos

562 - 102

### **sinopsis**

Es la primera de una serie de obras destinadas a la construcción de la autopista Córdoba-Sevilla. El método de voladizos sucesivos de hormigón pretensado que se ha adoptado para su construcción, es de gran interés y permitirá su empleo en obras posteriores. La estructura del puente, que está constituida por una viga Gerber apoyada en dos pilas intermedias, comprende un tramo central de 70 m de luz y dos vanos laterales de 35 m de luz cada uno de ellos. El tramo central está formado por una viga prefabricada de hormigón pretensado, de 30 m de luz, simplemente apoyada en dos voladizos de 20 m. Los tramos en voladizo se ejecutaron mediante elementos sucesivos prefabricados, solidarizados mediante los cables del pretensado. Completan la obra los dos viaductos de acceso, con tableros contruidos con vigas pretensadas prefabricadas. Este artículo describe el proyecto y ejecución de la obra.

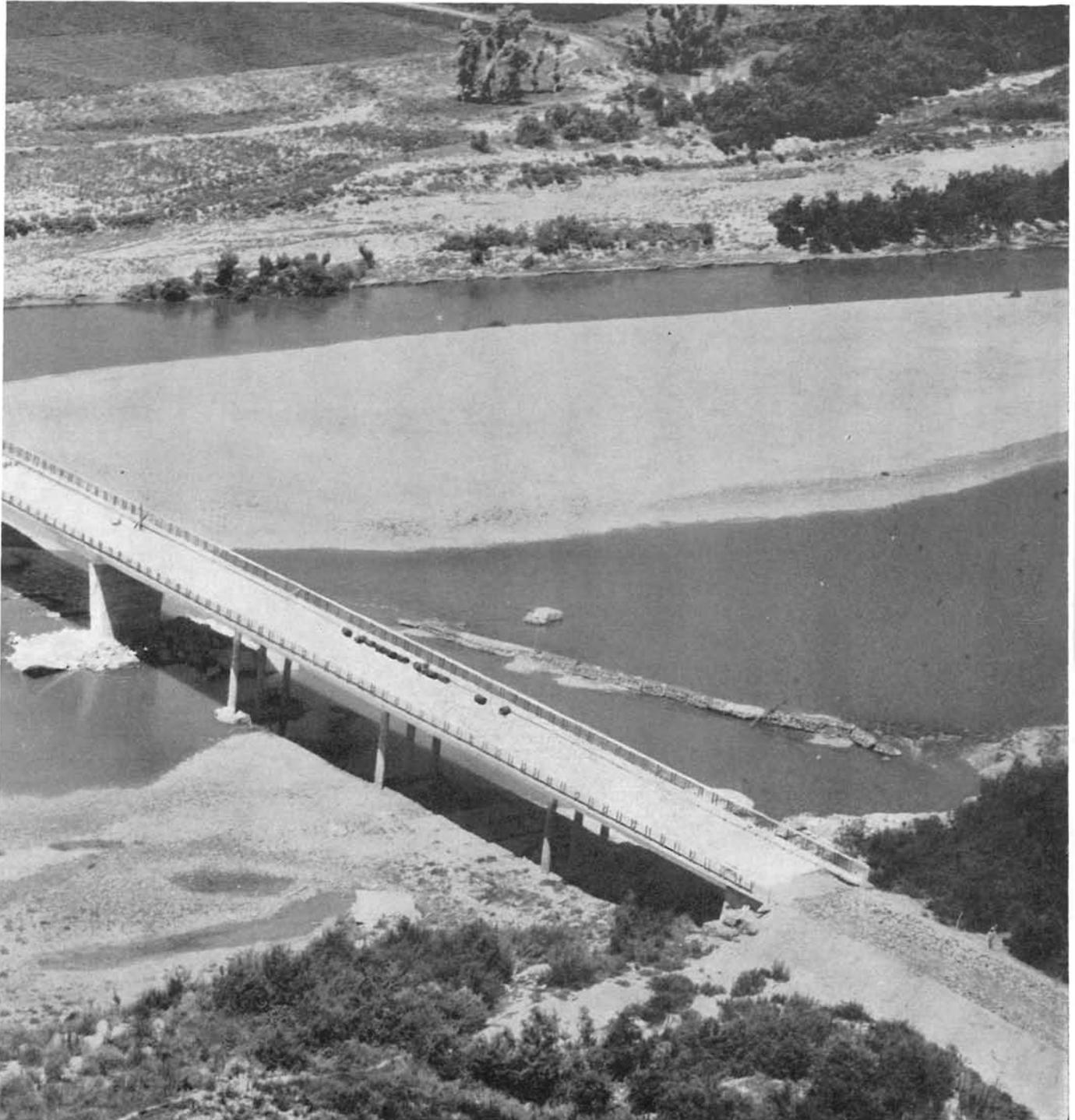




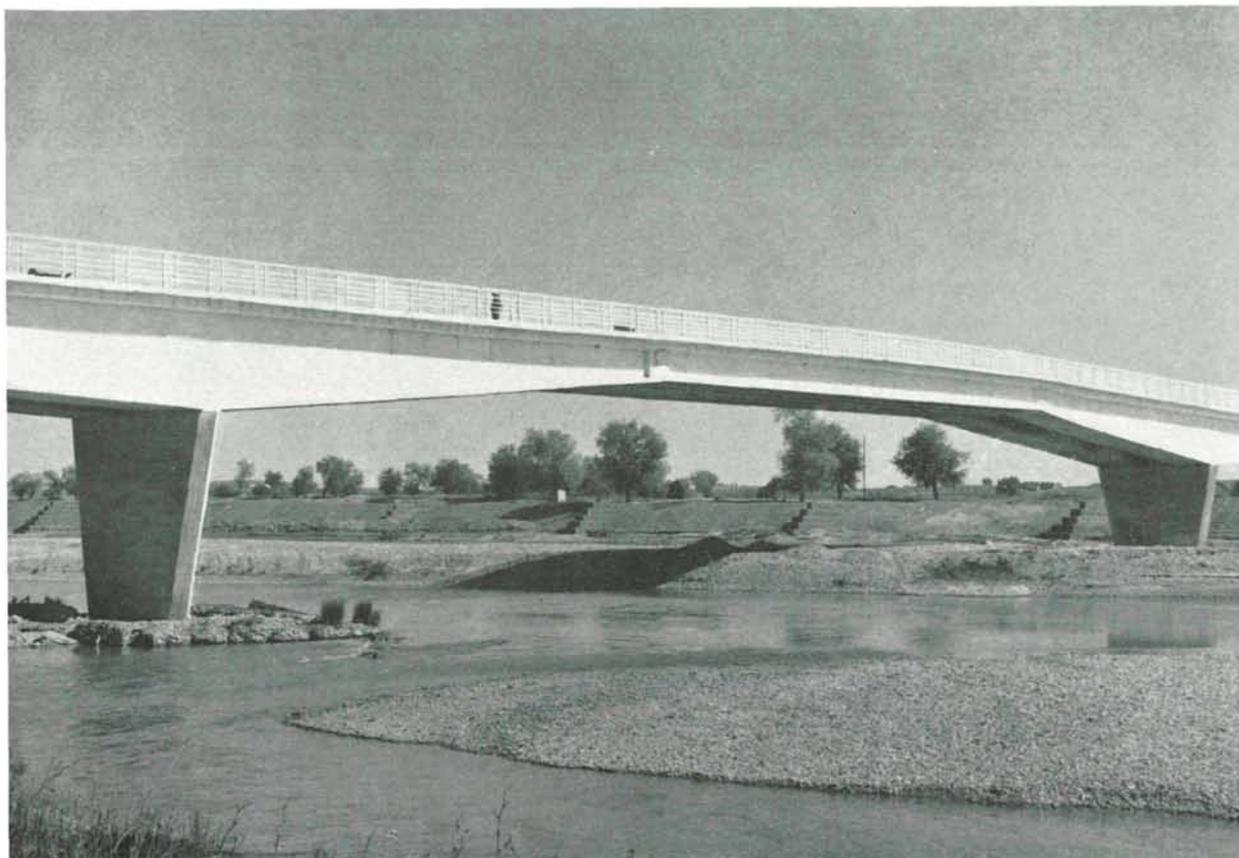
## Introducción

El puente de Almodóvar forma parte de una serie de puentes que serán construidos sobre el río Guadalquivir en el trayecto de Córdoba a Sevilla.

Al construirlo se ha tenido presente un punto de vista más amplio que el particular del caso o, mejor dicho, de la serie, tratando de poner a punto procedimientos constructivos que sean aplicables a los puentes españoles de una cierta importancia, dadas las características de nuestros ríos y la fisonomía de



nuestras Empresas constructoras. Hay que tener en cuenta que en nuestro plan actual de carreteras se destinan dieciséis mil millones de pesetas a puentes, entre los cuales se incluyen también los viaductos para cruce de carreteras o autopistas a distinto nivel, así como los más frecuentes de paso de carreteras sobre ferrocarril. Por este motivo, todos los puentes que hemos construido en estos últimos años han tenido siempre este carácter de experimentar sistemas constructivos con medios auxiliares sencillos, maquinaria mínima y de tipo universal y que permitan además hacernos independientes del río al construir pilas y estribos. Esta última condición es de importancia primordial en España, dada la irregularidad de nuestros ríos y la violencia de sus avenidas.



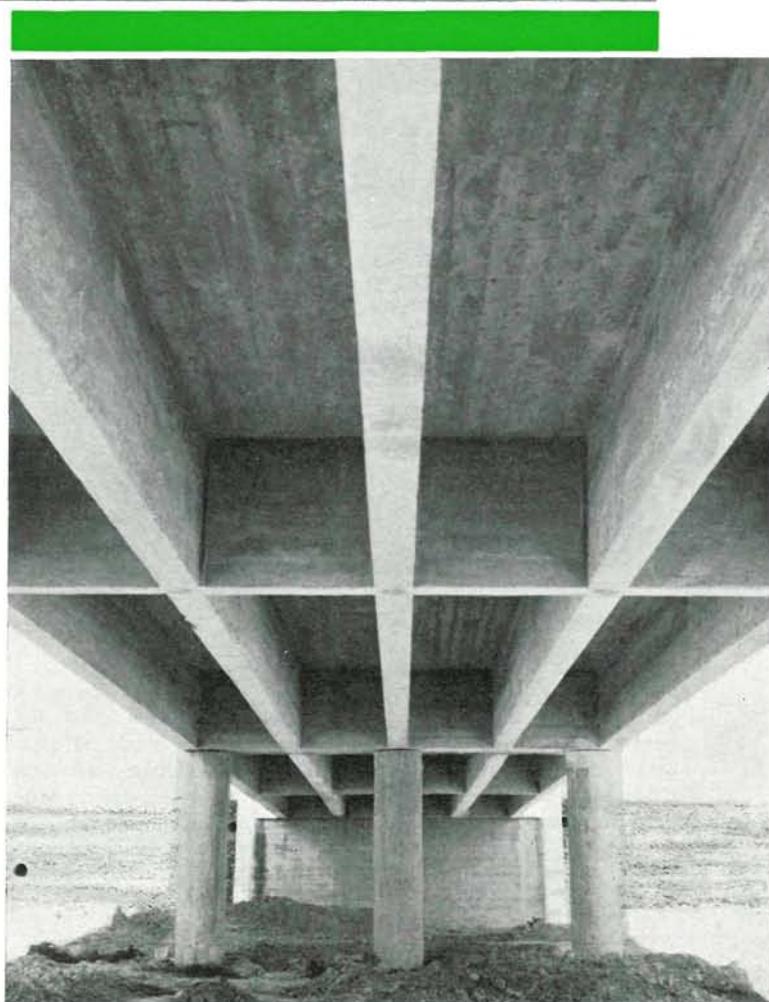
En los puentes de tramo sencillo con luces hasta 40,00 m se han ensayado todos los sistemas de prefabricación, construyendo vigas enteras o vigas por dovelas y todos los procedimientos de montaje:

- lanzamiento longitudinal mediante sencillas torretas y cables;

- desplazamiento longitudinal con puente metálico auxiliar que se lanza previamente;

- montaje de dovelas en pasarela adyacente y desplazamiento transversal;

- lanzamiento de vigas en plano inclinado por la ladera, para después elevarlas verticalmente por un costado deslizando por las pilas.



El tipo de estructura más utilizado ha sido el de tramos independientes simplemente apoyados, aunque en algún caso se ha proyectado tablero continuo de tramos que se montan independientes como vigas simplemente apoyadas para luego darles continuidad, enlazando los tramos contiguos mediante cables cortos y por prolongación de los propios de cada viga. También se ha proyectado en un puente actualmente en construcción el montaje de tramos independientes que luego se hacen continuos partiendo de tramos con la misma longitud del vano, pero colocados con un desplazamiento del cuarto de la luz, de modo que apoya la cola de cada uno sobre la ménsula del anterior, disposición que se invierte al pasar por el vano central, dejando centrado un tramo independiente de la mitad de la luz.

## **Solución estructural adoptada**

En el caso que nos ocupa había que realizar un vano de 70 m compensado de modo natural por dos vanos laterales, habiéndose estudiado todas las soluciones posibles: tramo continuo de 140 m de longitud total; tramos-ménsula, cortando la continuidad del anterior por dos articulaciones que dejan un tramo intermedio de 30 m; pórtico en  $\pi$ , solidarizando dintel y pilas principales, con y sin articulaciones intermedias, y el tipo, ya clásico, de dos elementos en T con articulación deslizante en sección central.

La solución más económica y con mayores ventajas estructurales y constructivas ha sido la adoptada de tramos-ménsula, con relación 2 en luces de vanos y 0,43 entre tramo y vano centrales. Desde el punto de vista estructural tenemos una mejor distribución de flectores totales por encima y por debajo del eje horizontal, sin alternancia de sentidos en todo el vano central. Además, la estructura es isostática, es decir, sin sufrir esfuerzos por asiento desigual de los apoyos, ni por los acortamientos correspondientes al pretensado. El único inconveniente de la estructura adoptada es el de los esfuerzos anormales durante la construcción, dado el sistema constructivo adoptado, los cuales someten a la estructura provisional de los tramos laterales, antes de prolongarse en sus ménsulas y recibir el peso del tramo central, a condiciones de trabajo contrarias a las definitivas en zonas muy importantes.

Este inconveniente se hubiera salvado del modo más simple dejando en obra el andamio del vano lateral hasta completar el voladizo correspondiente, lo que no fue posible en nuestro caso porque este andamio quedaba en la zona del río afectada por todas las avenidas del río. Cabían dos soluciones para quedar a salvo de los inconvenientes derivados: reforzar provisionalmente la armadura de pretensado en cabeza inferior para hacer frente a los esfuerzos que dan tracciones en dicha cabeza, o bien introducir flexiones de sentido contrario en todo el vano, prolongando lo suficiente el dintel para aplicar en su extremidad una fuerza descendente, bien mediante un lastre pesado (caso del puente de Juazeiro), o bien mediante una péndola inclinada anclada en la misma cimentación de la pila inmediata.

La solución adoptada fue una intermedia entre las dos primeras, o sea, se dejó un apeo provisional al cuarto de la luz del tramo intermedio y reforzando la armadura inferior mediante barras colocadas sobre la losa ancladas en las vigas riostras de apoyo y la intermedia más alejada. Esta armadura servía por sí sola cuando se hubiera completado el voladizo correspondiente, pudiendo entonces desmontarse el apeo y quedar independientes de toda clase de avenidas. No nos acompañó la suerte y una gran avenida derribó los apeos cuando sólo estaban avanzados los voladizos en menos de la mitad de su vuelo definitivo, con lo cual la armadura suplementaria no era suficiente y las tracciones en cara inferior produjeron la rotura de ambos tramos laterales a distancias de 9 a 10 m de la pila correspondiente. Hubo necesidad de reforzar la armadura provisional aceptando las roturas, ya que en situación definitiva sólo existen compresiones en dicha zona.

## **Descripción**

Consta de tres partes bien definidas: puente para paso del cauce propiamente dicho con tres vanos de 35 + 70 + 35 m y dos viaductos de acceso, el de la orilla derecha con tres vanos de 20 + 20 + 16 m, y el de la orilla izquierda con cuatro de 20 m. La anchura total de plataforma es de 9 m, para calzada de 7 y dos aceras de 1 metro.

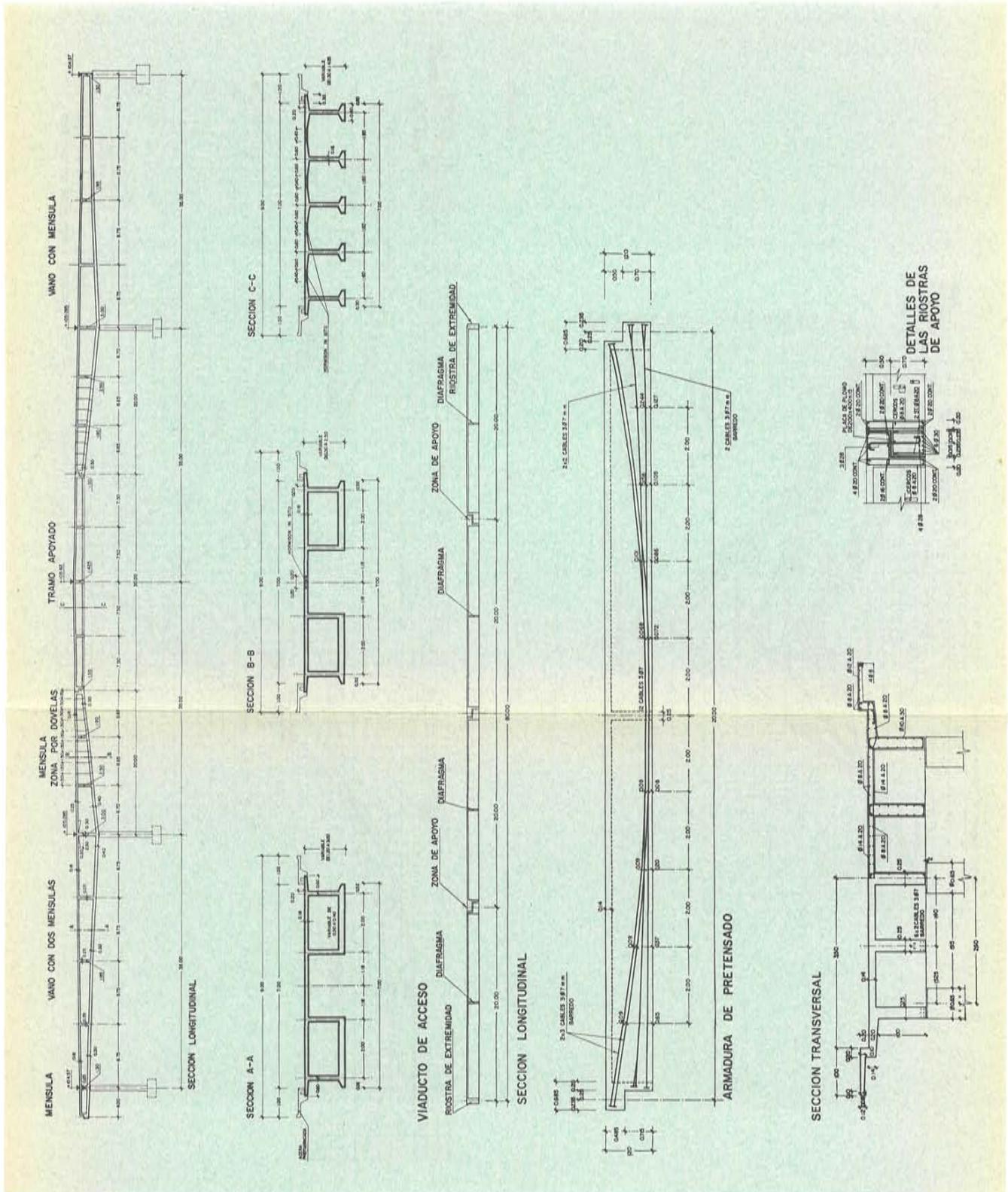


## **Puente principal**

Como ya se ha indicado la obra principal tiene tres luces, que se salvan mediante tres tramos, dos laterales que penetran en el vano central con ménsulas de 20 m sobre las que se apoya simplemente el tramo central de 30 m de luz. El tramo lateral derecho se prolonga del otro lado en ménsula de 4 m para servir de apoyo al tramo de 16 m del viaducto correspondiente.

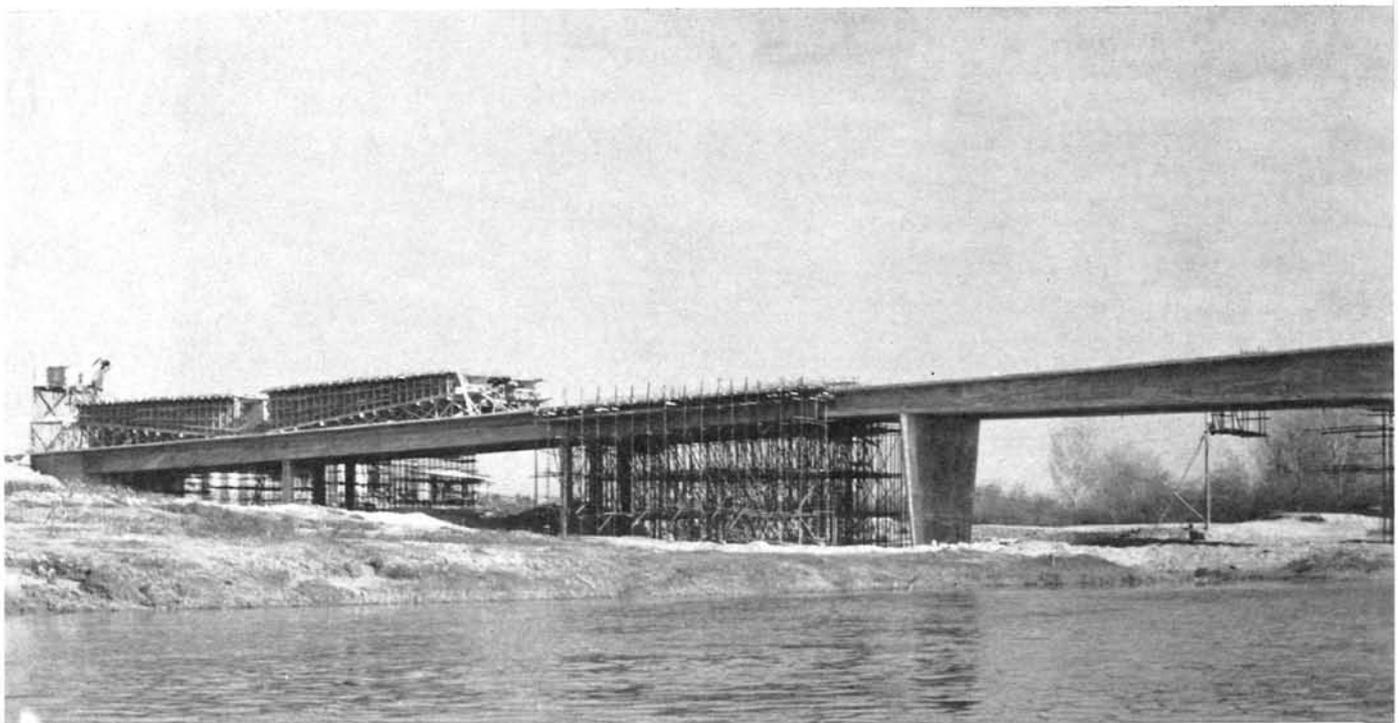
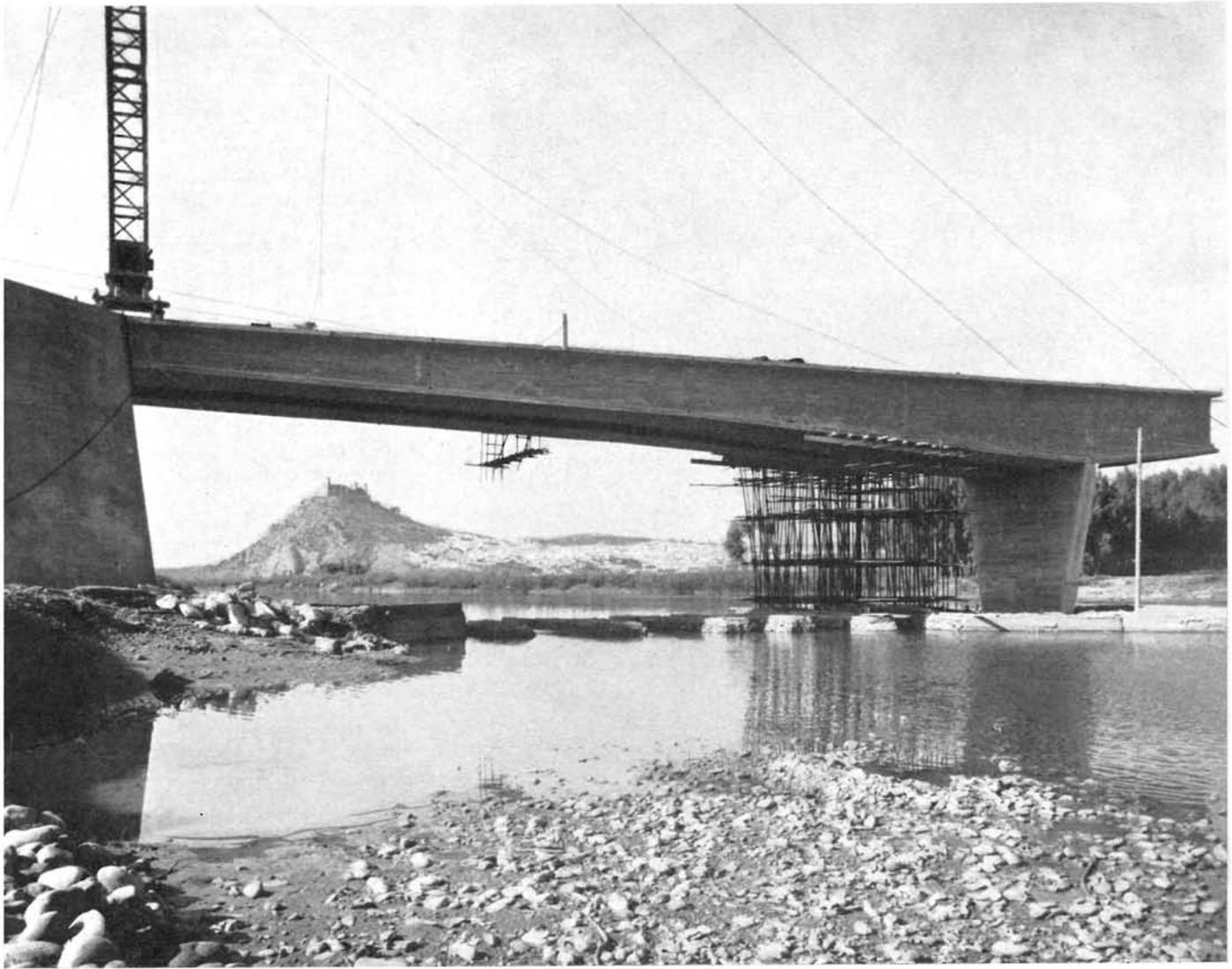
La estructura del tramo central simplemente apoyado ha estado condicionado por el método constructivo seguido: prefabricación de las vigas y colocación en obra por lanzamiento longitudinal.

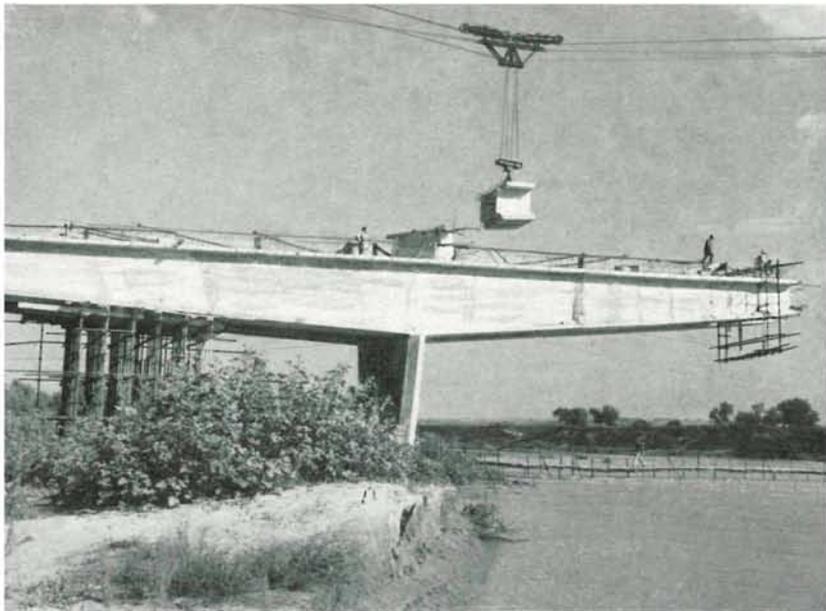












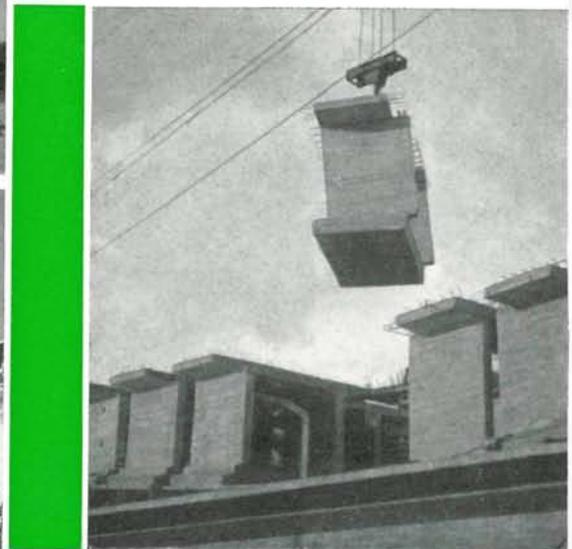
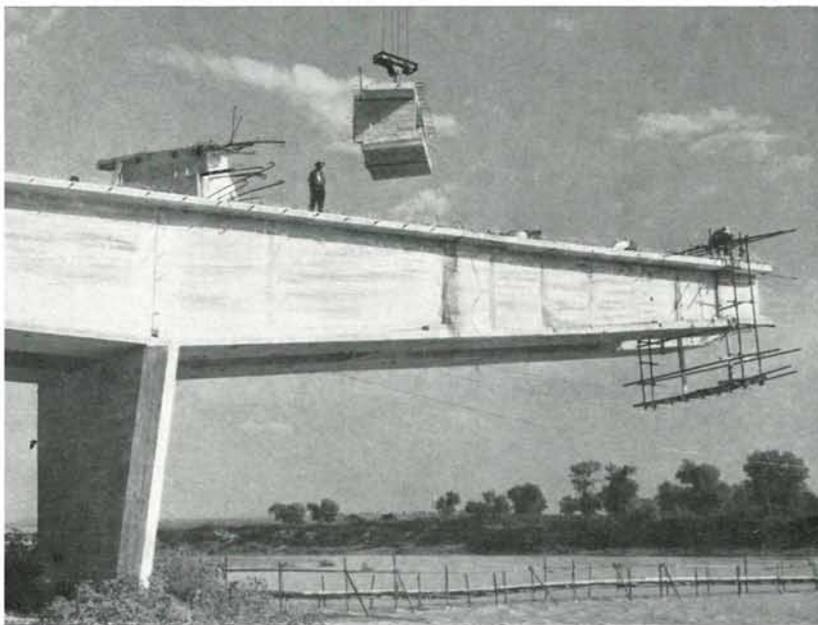
Las vigas se moldearon sobre el tablero de los tramos adyacentes, y pesaban unas 35 toneladas.

La armadura complementaria es de parrillas de  $\varnothing$  8, 10 a 12 mm, separadas a 15 ó 20 centímetros.

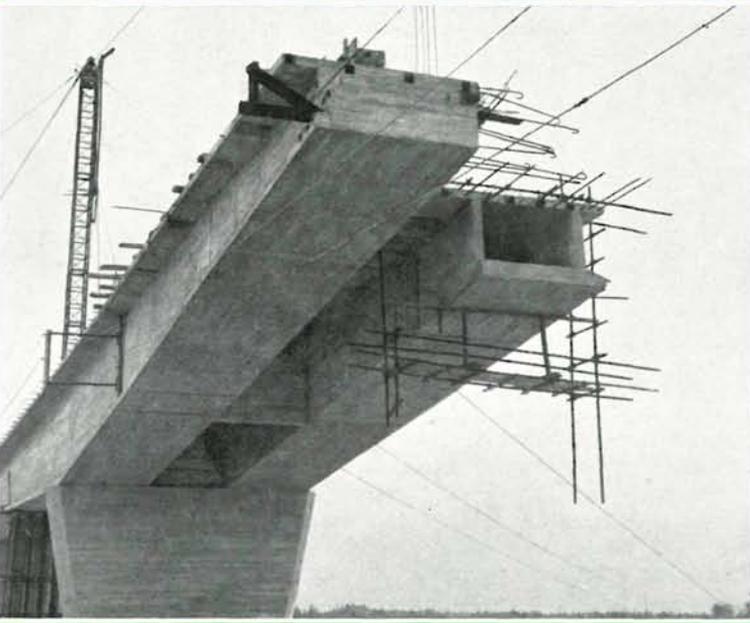
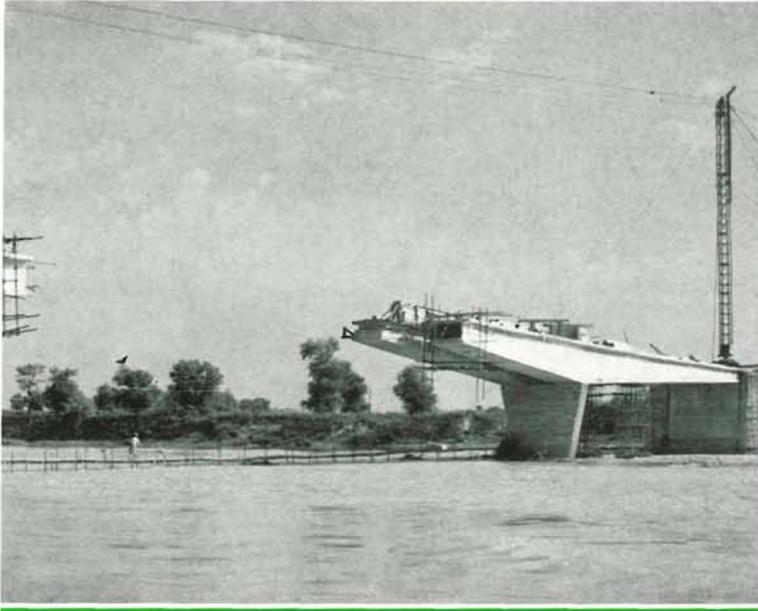
La supraestructura de los tramos principales está organizada en dos vigas de sección cajón con diafragmas longitudinales de espesor 18 cm, una losa superior de 17 cm de grueso constante y una inferior de espesor variable desde 30 a 40 cm. La losa superior completa el tablero enlazando las dos vigas y volando en ménsula 62 cm por ambos lados.

La distancia entre las almas de un mismo cajón es de 2, y 2,36 m la que existe entre las contiguas de ambos.

La altura máxima de las vigas en correspondencia con la sección de apoyo sobre pilas es

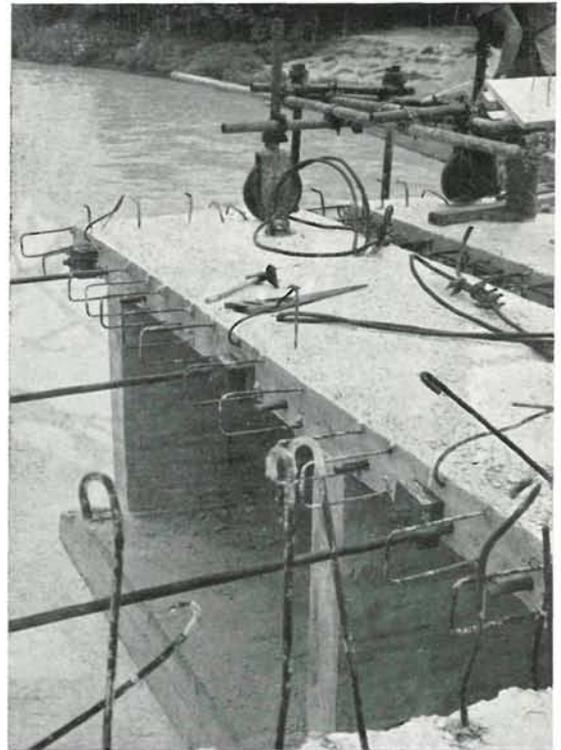


## colocación de dovelas



de 3 m y la mínima 1,30 m en ambos extremos. La variación de altura es lineal a lo largo de las ménsulas y es también lineal en dos tramos distintos en los vanos laterales, correspondiendo un espesor de 1,95 en la mitad del vano.

Los cajones quedan enlazados por la losa superior y por diafragmas transversales situados sobre las pilas, en las extremidades del tramo, a los cuartos de la luz del vano lateral y a los tercios del voladizo. Los intermedios son rectangulares con espesores de 25 ó 30 cm según los casos, y los extremos son de 60 cm y cortados a media altura cuando tienen que sustentar las extremidades de los tramos adyacentes.



Los tramos laterales en la fase final de las ménsulas.

Vista inferior de las ménsulas.

Detalle de la extremidad de una dovela anclada provisionalmente en tres puntos.

Detalle de la junta horizontal entre dovelas para enlace de armaduras.

Todas las vigas longitudinales y transversales se han pretensado por el sistema Dywidag mediante barras de acero 90/110 con diámetros de 26 y 18,6 mm, respectivamente. También se ha introducido una precompresión transversal en la losa superior con redondos de 18,6 mm, a razón de uno cada 75 centímetros.

Al diseñar la distribución de armadura de precompresión en las vigas longitudinales se ha tenido en cuenta la modalidad constructiva de cada elemento y una simplificación máxima para su ejecución. Así tenemos barras rectas que van por cara superior en las ménsulas y por cara inferior en la campana lateral, enlazándose estos dos sistemas mediante barras curvas del tipo cables-sombrero, centrados con ejes de pilas y anclándose en los diafragmas inmediatos. El número de barras por cajón es de 51 en cara superior sobre apoyos principales, 13 en cara inferior de vano lateral, prolongándose las superiores en disminución sucesiva hasta terminar en 5 por ambas extremidades. Los anclajes son del tipo de campana, excepto en las zonas de elementos prefabricados, que son de placa.

El pretensado de los diafragmas transversales es centrado con 4 ó 5 barras, excepto en las vigas extremas, donde tenemos 7 concentradas en zona inferior. Las cuatro pilas del puente principal son tabiques, de hormigón armado, de espesor constante 1 m, y perfil trapecial con la base menor en el cimientado y la mayor en contacto con el dintel recibiendo directamente el apoyo de los cajones.

## **Viaductos laterales**

La estructura de todos los tramos de viaductos laterales está organizada en 5 vigas prefabricadas de hormigón armado, de sección rectangular de  $1,20 \times 0,30$  m, enlazados transversalmente mediante losa de 20 cm y vigas riostras de igual altura. Estas vigas son también de sección rectangular, a excepción de las correspondientes a las pilas intermedias, las cuales están partidas a media altura, apoyándose la de un tramo sobre la del inmediato a fin de eliminar la viga cabezal entre las tres columnas de una pila.

Las vigas longitudinales están a una equidistancia de 1,50 m, prolongándose la losa superior a ambos lados en voladizos que se continúan en las losas de aceras que tienen sólo 10 cm de espesor. Para la precompresión de las vigas se han utilizado cables de  $3 \varnothing 7$  mm del sistema Barredo. Todo el hormigón de estos tramos fue hormigonado in situ y no se hizo pretensado transversal alguno.

Las pilas intermedias están formadas por columnas circulares de diámetro 50 cm, empotradas en la base en una zapata de cimentación que recoge los pilotes premoldeados en el suelo con longitudes de 10-12 m. Los estribos son del tipo muro de gravedad con aletas en voladizo para la contención lateral de las tierras. Todas las columnas se articulan en su enlace con el dintel mediante bielas obtenidas cortando las extremidades superiores a 50 cm del apoyo con junta de 2 cm e intercalando placas de plomo tanto entre los bordes de esta junta como entre la columna y la viga transversal del dintel. Esto en el viaducto de margen derecha; pero en el viaducto de margen izquierda, que se realizó posteriormente, todas las articulaciones entre columnas y dintel son de neopreno, así como la de enlace con estribo.

## **Procedimiento constructivo**

El interés de esta obra está en la realización práctica del sistema constructivo de avance por voladizos sucesivos con dovelas prefabricadas, utilizando medios auxiliares mínimos. Los que se emplearon son: un equipo corriente de blondín con capacidad máxima de 10 t y un andamio sencillísimo de tubo colgado del voladizo en avance han sido los elementos utilizados en la obra.

La primera vez que proyectamos un puente para construir por este sistema fue con motivo del concurso internacional para una serie de puentes en Cuba en el año 1959, aplicándolo al proyecto de puente sobre el río Zaza, con una solución estructural de pórtico sencillo de células triangulares tipo Finsterwalder de 90 m de luz. El proyecto ganó el premio reservado al mejor proyecto,



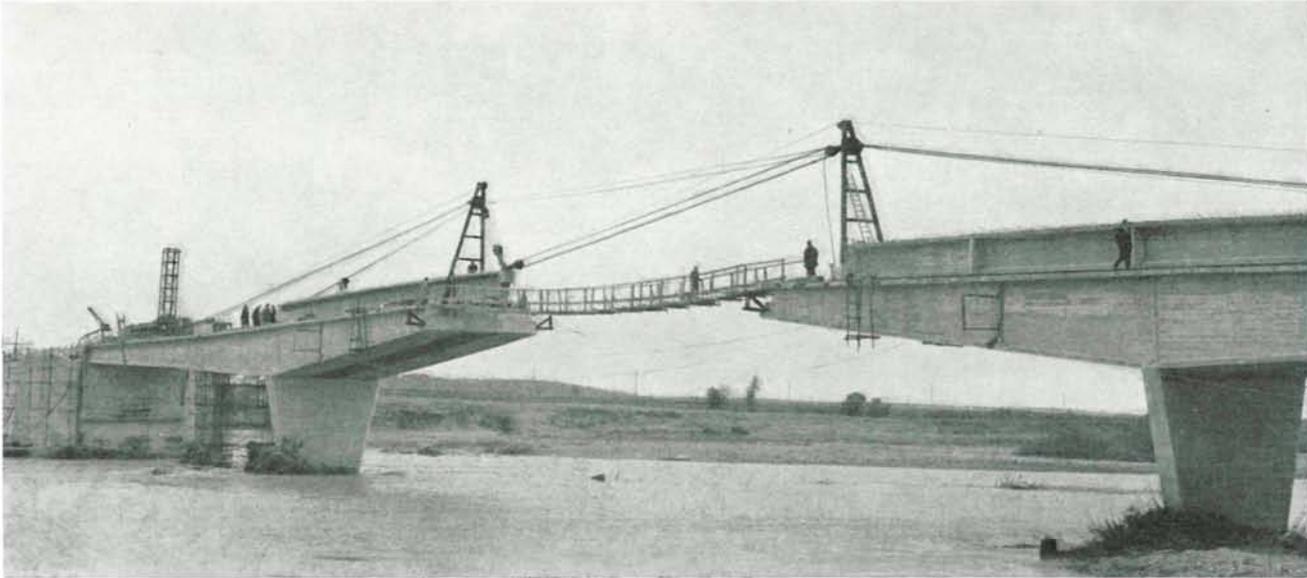
Tramo lateral con el encofrado de una viga central.

pero no el concurso por cuestión de plazo. Desde entonces lo hemos aplicado en otros proyectos españoles no llevados a realización, habiendo sido el de Almodóvar, proyectado en 1960, el que lo ha puesto en práctica. En la actualidad hemos comenzado la construcción de un puente sobre el Ebro en Castejón (Navarra) con 100 m de luz.

En el intermedio se han construido también puentes en otros países, especialmente en Rusia, donde se ha llegado a una luz récord en el puente de Kranoholmsky, con 148 m de luz y dovelas de un peso hasta

Armadura de una viga central.



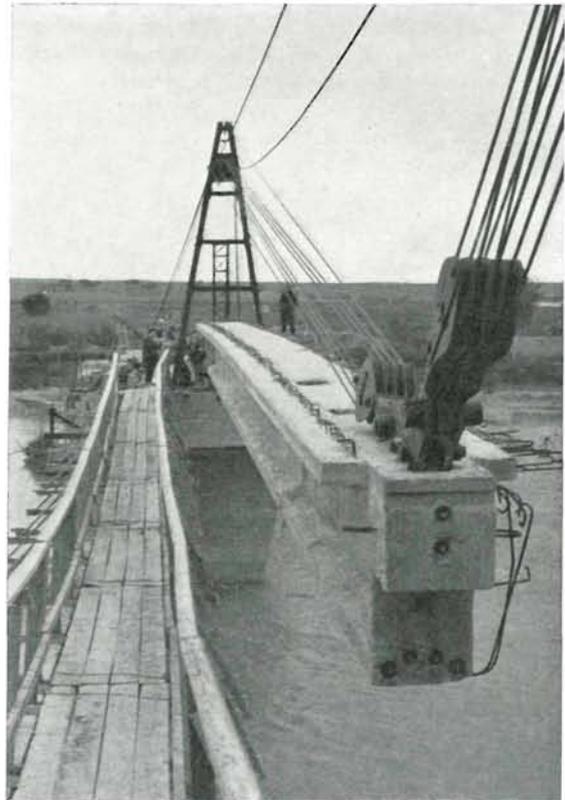


Lanzamiento de la viga del tramo central.

Detalle de la suspensión de la viga durante el lanzamiento.

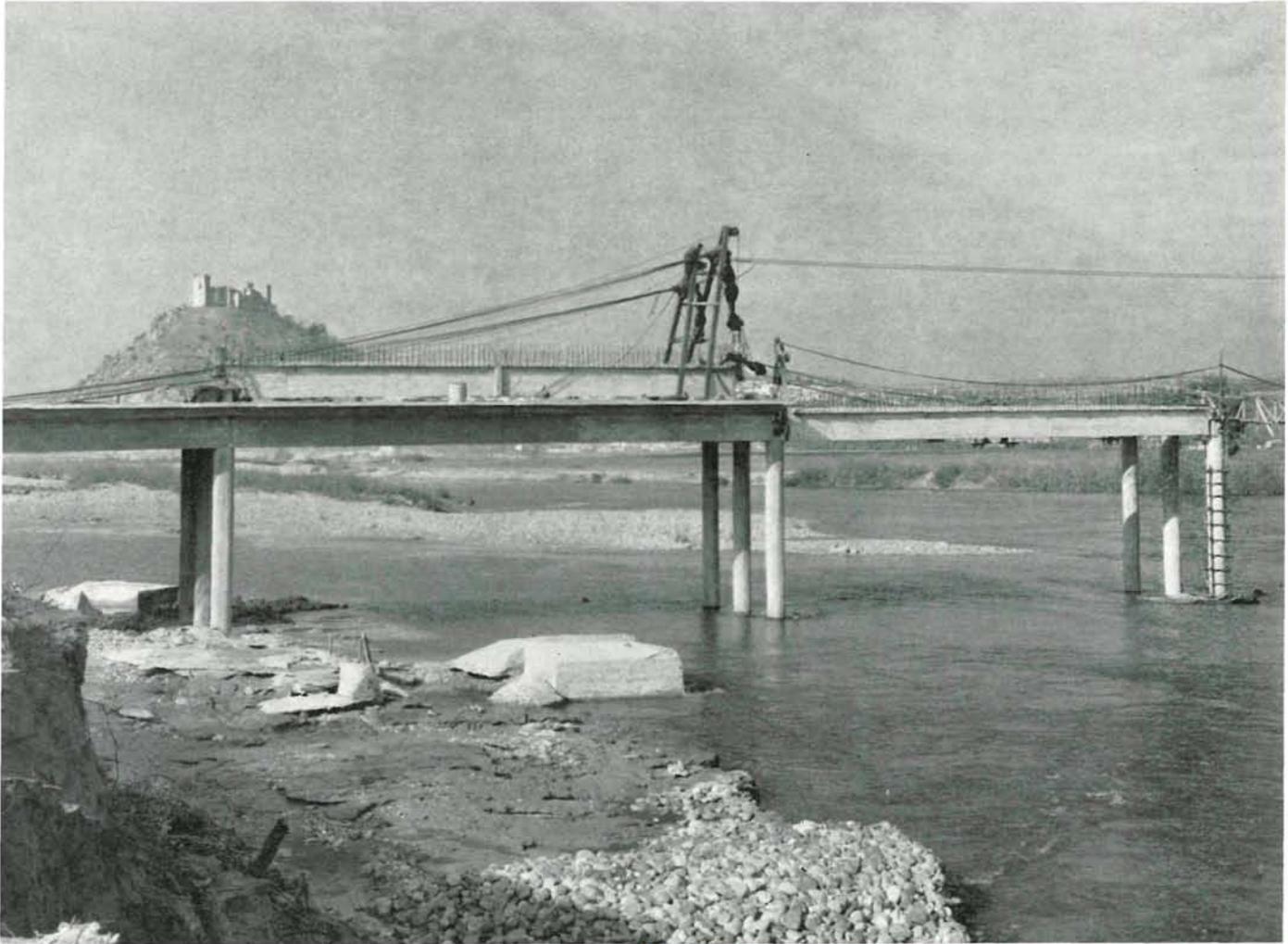
160 t. Recientemente se han construido, en Francia, los puentes de Choisy-Le Roi, Pierre Benite y Saget, y últimamente, en Méjico, el de San Nicolás, con dovelas análogas a las nuestras.

Las ménsulas de los vanos laterales tienen 20 m de voladizo, pero su primera parte de 6,37 m se construyó al mismo tiempo que las luces de 35 m y con andamio apoyado directamente sobre la cimentación de las pilas. La zona excedente se dividió en secciones de 1,50 m de longitud, excepto la última, que lleva la viga para apoyo del tramo intermedio, construyendo dovelas que correspondían a una viga cajón prolongada en su voladizo externo y con un voladizo interno que recorta la losa de enlace de los cajones, con el fin de dejar una faja de 40 cm para hormigonar en el sitio. Las dovelas más pesadas corresponden a las intermedias con diafragma transversal, pero no sobrepasaban las 9 t, lo cual las hacía muy manejables.



Retención de la viga en la fase final del lanzamiento.





Lanzamiento de una viga de 20,00 m en los tramos laterales.

Las dovelas de cada ménsula se construyeron dentro de un mismo encofrado, apoyándose directamente sobre el dintel del viaducto (orilla derecha) convenientemente apuntalado para recibir la carga extraordinaria que le correspondía. Al hormigonar se materializó entre dovela y dovela, la junta que había de rellenarse en obra. De este modo teníamos la seguridad de un perfecto ajuste en obra, ajuste que se podía rectificar variando el espesor de la junta e incluso dándole un espesor variable para obtener cambio de inclinación.

Cada dovela se moldeaba con los alvéolos correspondientes a las barras de pretensar que la habían de atravesar.

La unión entre dovelas quedaba perfectamente resuelta mediante la armadura de pretensado de la ménsula que se localiza en cabeza superior, facilitando mucho esta

Fotos: C. JIMENEZ



operación el sistema Dywidag adoptado, pues las unidades de pretensado son barras de 26 mm que tienen las extremidades fileteadas de modo que una cualquiera puede prolongarse mediante manguito de empalme o bien anclarse contra una placa cuadrada por presión de la tuerca.

El transporte de cada dovela se realizaba con toda sencillez—como puede verse en las fotografías—y se colocaba en obra apoyándola en el retallo inferior de la dovela anterior y ajustando con su tuerca y placa de anclaje dos cualesquiera de las barras de pretensar que se habían enhebrado a través de los agujeros correspondientes. Hay que tener en cuenta que utilizábamos trozos de 3 m, es decir, de longitud doble que la de la dovela y defasados de tal manera que en cada junta se empalmaban como máximo la mitad del número total. Por consiguiente, al colocar cada dovela tenemos sólo que enhebrar la mitad del número de barras y, como además todas van roscadas en extremidades, cualquiera de las de esta mitad sirve para anclar provisionalmente la dovela antes de rellenar la junta vertical y el espacio reservado en losa superior para realizar la prolongación de las barras de la otra mitad mediante el roscado de los manguitos de empalme, operación que viene inmediatamente a continuación de la fijación provisional de la dovela. La fase inmediata es la de hormigonado de juntas horizontal y vertical, y la última es la de tesado de las barras que definitivamente terminan en la sección correspondiente.

Se colocaban dos dovelas al día, una en cada ménsula opuesta, pero era preciso esperar otros 2 días para endurecimiento del mortero de la junta vertical y el del hormigón de junta horizontal, antes de proceder al tesado de las barras, que eran 2 ó 3, excepto en la dovela terminal, donde se reunían 5. De este modo se podía avanzar en la construcción de las ménsulas a razón de 1,50 m diarios.

El montaje por lanzamiento longitudinal de las vigas del tramo central apoyado, con longitud de 31 m y peso de 32 t, era operación que ya habíamos realizado en otras ocasiones y se desarrolló con toda normalidad, las cinco veces que hubo necesidad de repetirla. Las torretas metálicas quedaban fijas, y las vigas, después de tomar contacto con las de apoyo en el plano central del tablero, se trasladaban a su posición definitiva por ripado transversal.

Los tramos de 20 m de los viaductos se habían proyectado para construirlos in situ; pero los dos últimos del viaducto—orilla izquierda—hubo necesidad de prefabricarlos y lanzarlos longitudinalmente, pues íbamos a entrar en época de avenidas y no era prudente tener andamio en el río. Para esto último se utilizaron los mismos medios auxiliares que en las vigas de 30 m. Los pilotes utilizados en todas las cimentaciones son de 56 mm de diámetro construidos in situ.

## Cálculo

El cálculo de los elementos estructurales ha sido muy claro, ya que se trata de estructuras isostáticas. Las acciones son únicamente la carga permanente y la sobrecarga de tráfico. Esta segunda ha consistido en dos trenes de camiones, hasta cinco en cada tren, y sobrecarga uniforme de 400 kg/m<sup>2</sup> tanto en calzada como en aceras. El tren de camiones se ha sustituido por sobrecarga uniforme, también de 400 kg/m<sup>2</sup> (que equivale a repartir los ejes delanteros de los mismos), y cargas puntuales de 12 t (ejes posteriores) a 10 m de separación.

Los esfuerzos se han calculado utilizando las líneas de influencia de las secciones representativas para obtener los máximos de la sobrecarga. Para el reparto transversal de los esfuerzos correspondientes a los ejes posteriores se utilizó el método de Guyon-Massonet-Rowe, tanto en el tramo central como en los tramos de los viaductos de acceso, que se organizan en 6 vigas longitudinales. En cambio, para los tramos laterales de la obra principal, la gran rigidez de los cajones hace que haya un reparto por igual entre los dos, cualquiera que sea la posición transversal de los trenes.

El dimensionamiento de secciones y armaduras se ha hecho para cargas de servicio, es decir, en fase elástica, efectuando después la comprobación en rotura para resistir una acción combinada de 1,2 CP + 2,4 SC, que es la fórmula propuesta por la Jefatura de Puentes y Estructuras. Esta amplificación de esfuerzos resulta correcta en nuestro caso, pues se trata de elementos con independencia total en sus hipótesis de rotura, ya que, aunque los tramos laterales tienen continuidad con sus ménsulas, las condiciones de rotura de la zona entre pilas son independientes de las de la ménsula.

En el primero de los gráficos adjuntos indicamos las condiciones de trabajo para las cargas de servicio, teniendo en cuenta compresión longitudinal y momento flector en un diagrama de momentos nucleares como en el caso de los puentes de arco (ver L. Fernández Troyano, «Cálculo del pretensado en puentes». Monografía número 24 del Instituto Eduardo Torroja, Madrid, 1964). En el segundo gráfico se representan las condiciones de trabajo en servicio y rotura, comparando directamente momentos flectores y momentos resistentes.

### **Le pont d'Almodóvar sur le Guadalquivir, près de Cordoue**

C. Fernández Casado, Dr. ingénieur

Le pont d'Almodovar est le premier de divers ouvrages d'art situés sur la nouvelle autoroute Cordoue-Séville. La technique de construction adoptée—méthode en encorbellement au moyen de voussoirs préfabriqués—est d'intérêt remarquable et susceptible d'être employée aussi pour l'exécution d'autres ouvrages similaires.

La structure du pont, qui comprend deux viaducs d'accès, comporte une travée Gerber en béton précontraint reposant sur deux piles avec une travée centrale de 30 m de portée et deux consoles latérales de 35 m. La travée centrale suspendue de 30 m de longueur et les deux viaducs d'accès sont constitués par des poutres précontraintes et préfabriquées. Les bras en porte-à-faux de la travée Gerber sont réalisés au moyen de voussoirs préfabriqués successivement solidarités entre eux par les barres de précontrainte.

L'article décrit la conception et la structure de l'ouvrage ainsi que les procédés de construction.

---

### **Almodóvar Bridge over the Guadalquivir, near Cordova**

C. Fernández Casado, Dr. engineer

The Almodovar Bridge is the first of several structural works forming part of the new Cordova-Sevilla motorway. The construction procedure adopted—cantilever method by means of precast sections—is very interesting and will be used also for other similar bridges.

The bridge structure, with its two approach viaducts, consists of a Gerber beam of prestressed concrete resting on two piers, including a central span of 70 m and two side cantilevers of 35 m. The suspended span, 30 m long, and the two approach viaducts are constituted by precast prestressed beams. The central cantilever arms of the Gerber beam are constructed by means of precast sections which are subsequently connected together by prestressing bars.

The article describes the design principles, the bridge structure as well as the methods of construction.

---

### **Almodovarbrücke über den Guadalquivir bei Córdoba**

C. Fernández Casado, Dr. Bauingenieur

Die im Zuge einer neuen Strasse zwischen Córdoba und Sevilla gebaute Brücke von 9 m Gesamtbreite besteht aus dem Flussteil und zwei Rampen.

Die Flussbrücke mit Spannweiten von 35 + 70 + 35 m ist eine Gerberkonstruktion mit 30 m langen Einhängeträgern im Mittelfeld. Der Ueberbau der kleinen Felder und der ins Hauptfeld ragenden Kragarme besteht aus zwei Kastenträgern mit 18 cm dicken Stegen, 17 cm dicker Deckplatte und 30 bis 40 cm dicker Bodenplatte. Sie wurden in Längen von 1,50 m vorgefertigt und ohne Rüstung gegen die zuvor montierten Stücke gespannt. Die Einhängeträger haben I—Querschnitt und ruhen auf Konsolen der Kastenträger.

Der Ueberbau der Rampenbrücken (Spannweiten 4 × 20 m bzw. 20 + 20 + 16 m) besteht aus Rechteckträgern 1,30 × 0,30 m.