

Villalba

562 - 42

puente pretensado sobre el Guadarrama

A. PAEZ, ingeniero de caminos

En este artículo se describe y comenta la solución dada al puente de hormigón pretensado sobre el río Guadarrama, primero de los construídos mediante dovelas prefabricadas y solidarizadas después, mediante el pretensado de la armadura longitudinal.

Torroja, en su libro «Razón y ser», expone, de una forma magistral, la estrecha correspondencia que debe existir entre las condiciones que una obra debe satisfacer y la solución material adoptada por el proyectista.

Los puentes constituyen uno de los ejemplos más representativos de unas finalidades bien definidas. Un puente, es una obra que se construye, para vadear un desnivel, un valle o un río, para salvar, en definitiva, un obstáculo, pasando sobre él.

La estructura que se proyecte tiene así que soportar unas sobrecargas escrupulosamente definidas en los reglamentos; y entre las diversas soluciones posibles, hay que escoger aquella que sea más económica, sin olvido de las cualidades estéticas.

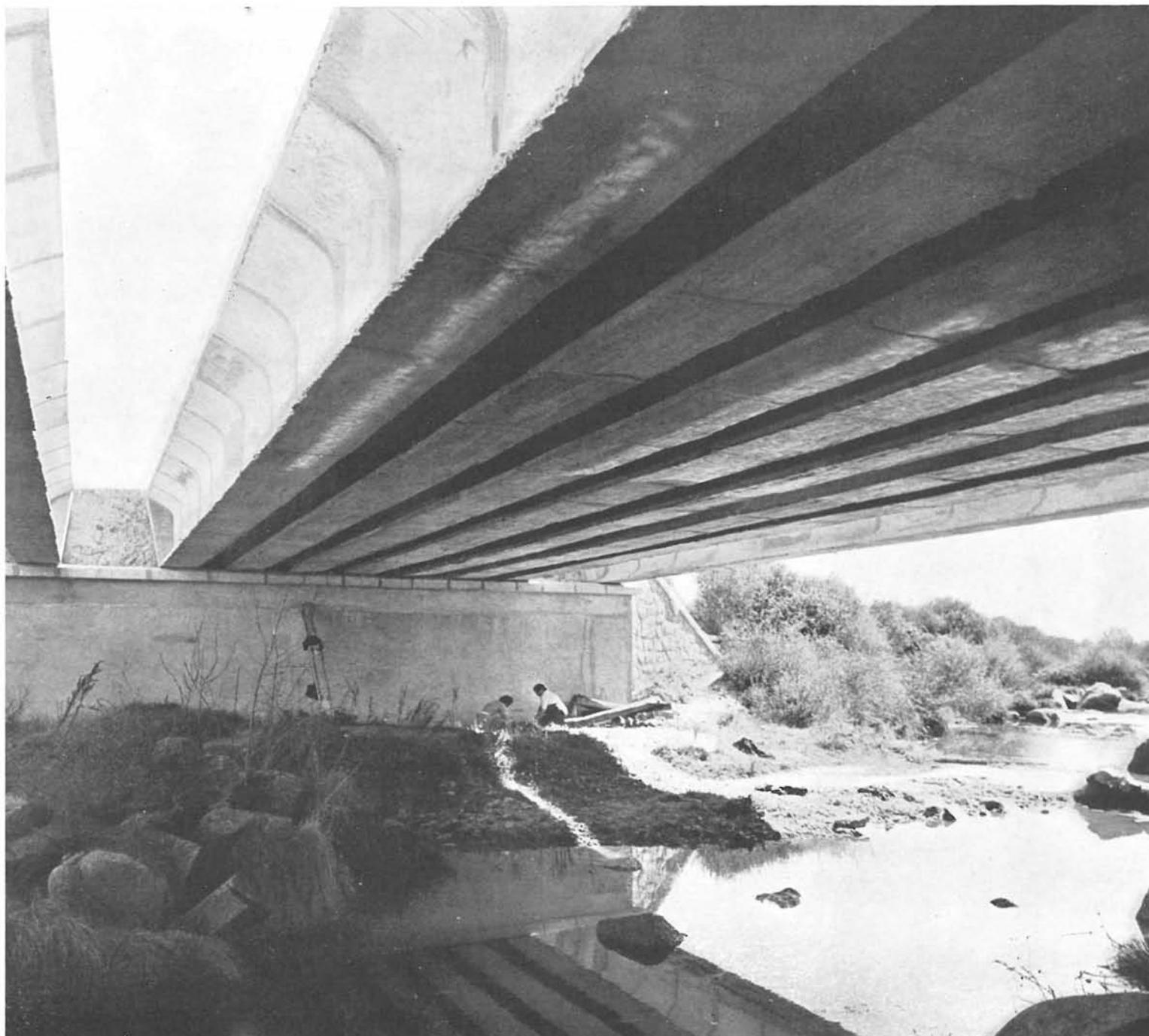
Pocas veces el ingeniero se encuentra con un enunciado más lacónico y preciso.

En algunos casos, aparecen, además, determinadas condiciones impositivas más o menos eludibles. Para la construcción del puente sobre el río Guadarrama, en la carretera general de Villalba a Avila por El Escorial, el ingeniero de la Administración D. Lamberto de los Santos impuso la condición de que el tramo debería ejecutarse, sin auxilio de cimbras ni apoyos intermedios que obstruyesen, siquiera parcialmente, el vano libre

Sería francamente tendencioso silenciar las razones que motivaron esta decisión: la altura de la rasante es pequeña, y ningún motivo parece aconsejar la limitación impuesta.

En realidad nada se oponía a la construcción de una cimbra. El río Guadarrama, en aquellos parajes, es un modesto arroyo. Su cuenca es tan reducida que no son previsibles grandes avenidas.

Por extraña paradoja, la posibilidad de poder apuntalar la obra, en un momento de apuro, es lo que motivó la decisión de suprimir la cimbra.



Raras veces podía presentarse un caso para poder ensayar una maniobra de lanzamiento de vigas con un menor riesgo técnico y económico.

El puente sobre el río Guadarrama tiene una luz libre de 17 m, luz relativamente pequeña, pero extraordinariamente frecuente en los pasos sobre las líneas férreas. Del mismo modo que para muchos historiadores la Revolución Francesa constituye el hecho más importante de la historia de Inglaterra, el puente sobre el río Guadarrama constituye un prototipo de pasos superiores.

Así, todo el proyecto se desarrolló sobre la hipótesis de una extraordinaria intensidad de tráfico ferroviario; un tráfico que no admitía detenciones ni entorpecimientos.

En estas condiciones, se aceptó, como mejor sistema de ejecución, el lanzamiento de piezas de 18 m de longitud y peso no superior a las 15 toneladas, estimadas como límite para poder ser suspendidas por cabrestantes de menos de 8 toneladas de carga. El puente tenía que estar formado por un conjunto de vigas o largueros longitudinales de dimensiones convenientes para satisfacer la limitación de peso establecida.

El problema, por las razones de ejecución apuntadas, quedó así reducido a la disposición, técnica y económicamente más ventajosa, de un tablero sustentado por una serie de vigas paralelas.

De acuerdo con las prescripciones establecidas en la moderna Instrucción de carreteras, el tren de cargas tipo está constituido por un carro de combate de 60 toneladas de peso, formado por dos orugas, separadas entre sí 3 m, cada una de las cuales transmite tres cargas, de 10 toneladas, separadas 1,50 metros.

Como es natural, el tanque puede ocupar una posición cualquiera en la calzada.

Si las vigas se colocaran unas junto a otras, pero independientes entre sí, el tablero estaría constituido por una serie de bandas longitudinales, de anchura igual al ancho de la cabeza de las vigas.

Esta anchura tiene que ser pequeña: del orden del metro. De otro modo, las vigas pesarían mucho y su colocación sería muy enojosa.

La armadura del tablero sería bastante pequeña: la necesaria para soportar las cargas aisladas en el pequeño voladizo que forman las alas de las vigas a partir del nervio.

Una solución semejante no es económica. Cada viga tendría que soportar, ella sola, toda la carga transmitida por una de las dos orugas del tanque; y como éste puede ocupar una posición cualquiera, todas las vigas tendrían que poder resistir el peso de medio tanque.

Técnicamente la solución tampoco es buena. Bajo el peso de las cargas, la independencia de las vigas hace que, al deformarse y ceder unas más que otras, se produzcan unos desniveles que agrietan longitudinalmente el firme.

Cinco soluciones distintas se ensayaron:

La primera consistió en separar las vigas 3 m. Las vigas, prefabricadas, se lanzaban colocándolas a esta distancia. Colgándose de ellas se disponía un encofrado sobre el cual se hormigonaba un tablero simplemente armado. Una solución frecuente en Italia.

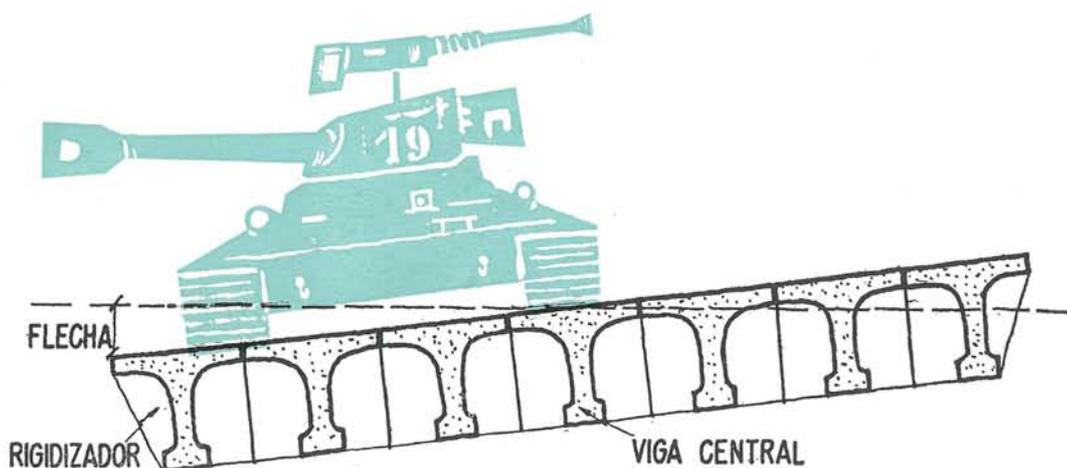
Como variante de esta solución, se tanteó también la ejecución de un tablero prefabricado. La conveniente independencia del tablero con las vigas hace que el canto se aumente innecesariamente y sin beneficio para la economía de las armaduras longitudinales.

Esta solución, con su variante, pronto se abandonó. El hecho de que se haya tratado de este tema en otro artículo aparecido en esta misma revista, hace innecesaria la repetición de las causas que motivaron tal decisión.

La segunda solución que se pensó fué la de colocar las vigas (de sección en T), con sus alas dispuestas prácticamente a tope. Sobre ellas, sin necesidad de encofrados, se hormigona el tablero, dejando previamente las armaduras de acero ordinario necesarias para la continuidad transversal. Las vigas quedan así recrecidas con el espesor del forjado.

La tercera solución es, en cierto modo, una variante de la anterior. El tablero se hormigona sobre las vigas, del mismo modo que en el caso anterior, pero sin disponer, previamente, armadura alguna. La solidarización de las piezas para conseguir el conveniente reparto de las cargas del tanque entre varias vigas, y la resistencia transversal del tablero, se consiguen mediante un pretensado normal a las piezas, que se introduce después de fraguado el hormigón, vertido «in situ».

La cuarta solución que se ensayó fué la de lanzar las vigas con su sección definitiva, empleando el pretensado transversal para solidarizarlas entre sí.





Finalmente se ensayó una quinta solución. Las piezas presentan unos rigidizadores de alma con unos orificios transversales. Las vigas se colocan, unas junto a otras, enfrentándose los rigidizadores.

Por los orificios practicados se pasa una armadura de acero especial que cose todas las piezas a través de los rigidizadores transversales.

Mediante un pretensado de esta armadura, el tablero queda constituido por un emparrillado de vigas longitudinales y transversales (el conjunto de rigidizadores de cada pieza).

Entre la solución quinta y las anteriores hay una diferencia fundamental: el reparto de la carga entre las distintas piezas longitudinales es completamente distinto, debido a la mayor rigidez del tablero.

En principio, la solución parece no presentar más que ventajas. El tablero, cuadriculado entre travesaños y vigas, deja de ser un forjado para constituirse en un conjunto de placas rectangulares, empotradas en su contorno, cuyos lados menores varían entre 1 y 2 m y los mayores entre 2 y 4. Una débil armadura es suficiente para absorber las cargas aisladas que inciden sobre estas placas enmarcadas entre las vigas y los travesaños.

Todo parece indicar que esta solución es la óptima.

Las apariencias engañan. La rigidez transversal del emparrillado no siempre es muy conveniente.

Unas veces por desidia, y otras por estimar que el carro de 60 toneladas es excesivo, con frecuencia se omite la comprobación de los esfuerzos a que da lugar la posición excéntrica del tanque, respecto al eje longitudinal de simetría del puente.

Cuando se tiene en cuenta esta hipótesis, cuando se calculan los esfuerzos originados por el carro de 60 toneladas, situado en el centro del tramo, pero pegado a uno de los bordillos, se deducen unos esfuerzos máximos de flexión en la viga de borde.

Las cargas del tanque, como consecuencia de la rigidez transversal del tablero, se reparten entre todas las vigas, pero de un modo asimétrico, función de la rigidez transversal frente a la longitudinal de las vigas y a la rigidez torsional de estas últimas.

Un método de cálculo muy rápido y suficientemente aproximado, es el de Courbon. Este método consiste en suponer que la rigidez transversal es infinita.

Pese a la barbaridad física de la hipótesis, los resultados que con ella se deducen en el cálculo de las vigas longitudinales sólo difieren en un 10 % de los que resultan de un cálculo más afinado.

Admitiendo esta hipótesis, se comprende que las cargas que cada viga absorbe son (dibujo adjunto) proporcionales a sus flechas y, por tanto, linealmente crecientes hacia el borde.

Cuando el tanque ocupa una posición próxima al bordillo, la viga de borde está muy flectada, llegando a soportar cargas iguales a cuatro veces la carga media. Si las vigas fueran ocho, resultaría que habría que calcularlas para la mitad de la carga del carro.

El problema que se presenta en el caso de las vigas independientes se reproduce ahora cuando, para eliminarlo, se solidarizan las vigas para repartir mejor las cargas.

Es cierto que ahora son sólo las vigas de borde las que deben estar facultadas para resistir el peso de medio tanque. Las demás vigas, a diferencia del caso de vigas independientes, soportan una menor fracción de la sobrecarga.

Todas estas circunstancias motivaron el abandono de la quinta solución.

Más cerrada fué la lucha entre las soluciones segunda, tercera y cuarta. Cada una tiene sus ventajas y sus inconvenientes. La cuarta es la que conduce a un mayor peso de la viga durante el lanzamiento por llevar la sección definitiva.

La segunda y tercera exigen el hormigonado del tablero en la obra.

La solución segunda parece la más económica en puentes estrechos, ya que la economía en acero que se deduce del pretensado transversal se diluye con el sobrecosto de los anclajes.

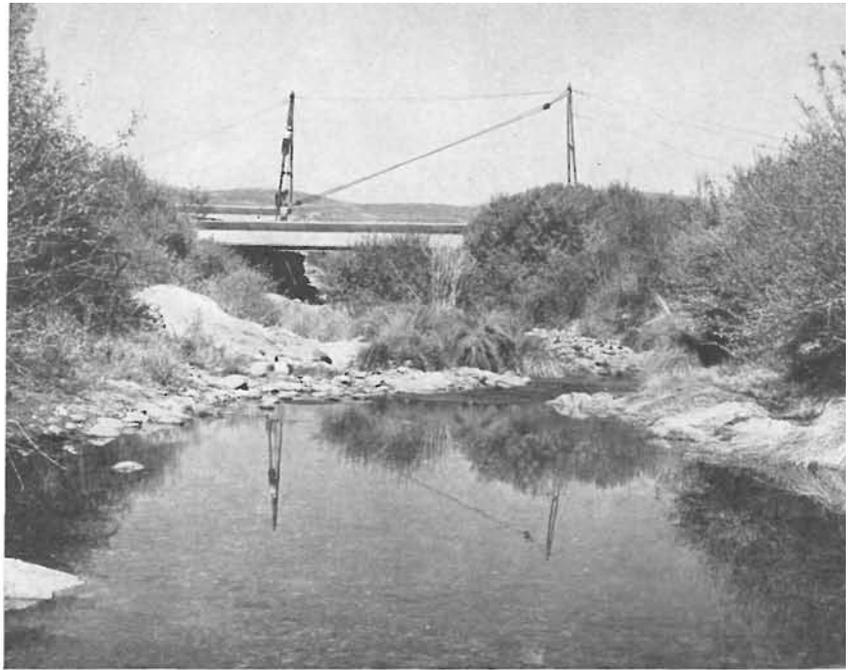
La solución tercera aparece sobrecargada con el coste de los tubos de pretensado. En el puente sobre el río Gundarrama en Villalba, esta partida se ha suprimido dejando unas ranuras transversales en el tablero, mediante la colocación de unos tabloncillos colocados de canto, en cuyo fondo se sitúan las armaduras de pretensado.

La sencillez de ejecución por este sistema y la economía en acero decidieron la adopción de este método.

Las vigas longitudinales se construyen por dovelas. Bastan dos moldes metálicos para prefabricar todas las vigas. El hormigón seco que se vierte en los moldes se vibra enérgicamente, alcanzándose, de un modo económico, elevadas resistencias.

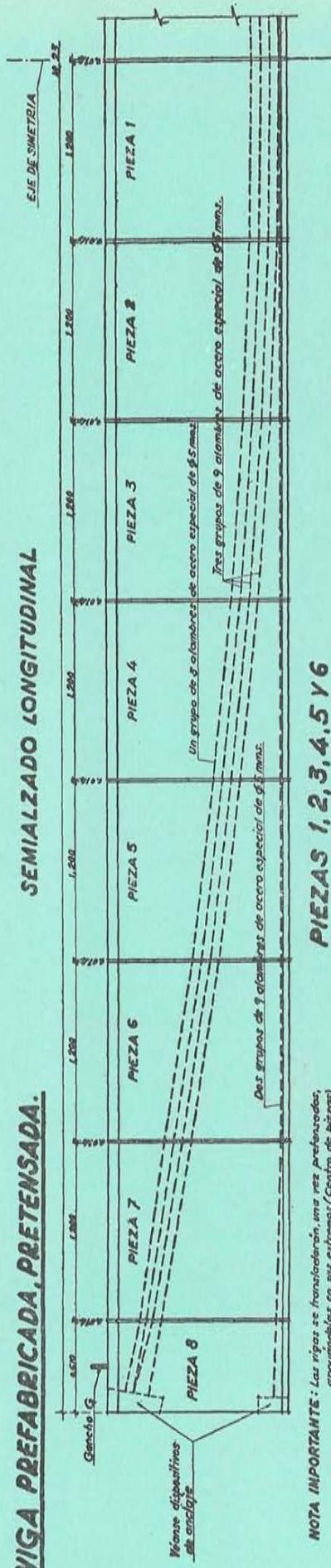
Siendo un poco mayor de un metro la longitud de las dovelas, los conductos para el alojamiento de la armadura longitudinal se realizan dejando unas barras metálicas en el molde, barras que se extraen fácilmente cuando el hormigón inicia su endurecimiento.

Unas piedras, colocadas sobre el paramento superior, y semi-embutidas en la masa del hormigón, mejoran, con sus resacas, la adherencia de la pieza prefabricada con el hormigón del tablero.



VIGA PREFABRICADA, PRETENSADA.

SEMIALZADO LONGITUDINAL



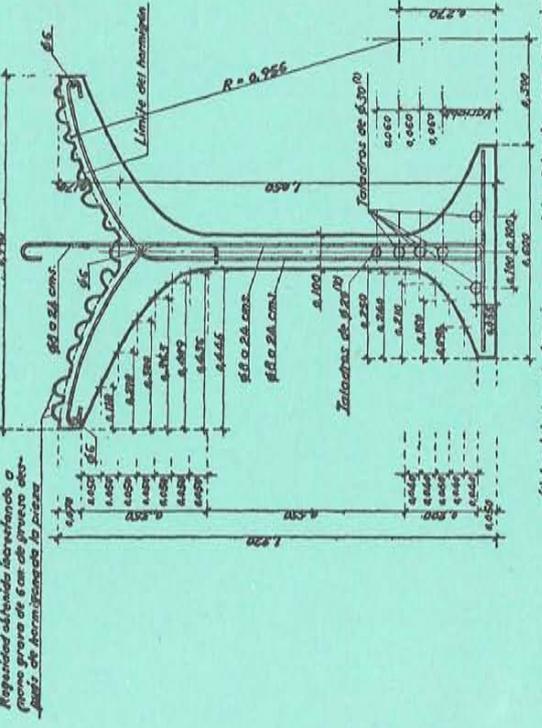
PIEZAS 1, 2, 3, 4, 5 Y 6

Todas estas piezas son iguales excepto en lo que se refiere a los cables A y B que son los siguientes:

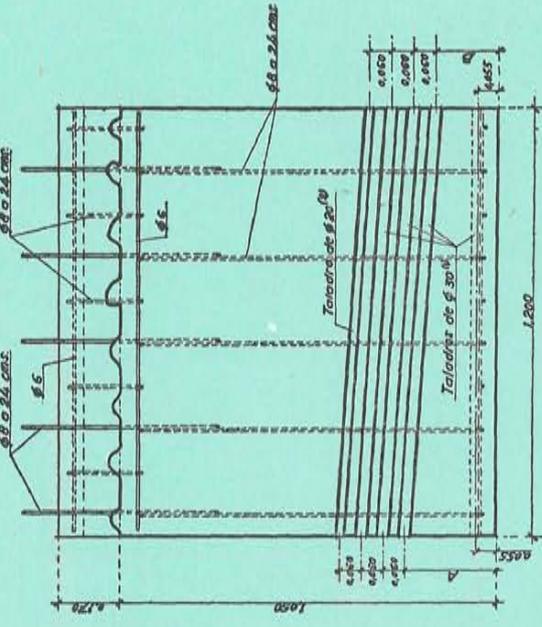
PIEZA	A	B	PIEZA	A	B
1	0,70	0,55	4	0,20	0,20
2	0,20	0,20	5	0,45	0,20
3	0,20	0,20	6	0,45	0,45

NOTA IMPORTANTE: Las vigas se fraccionarán, una vez prefabricadas, apoyándose en sus extremos (Centro de piezas) o cuñados de los ganchos G.

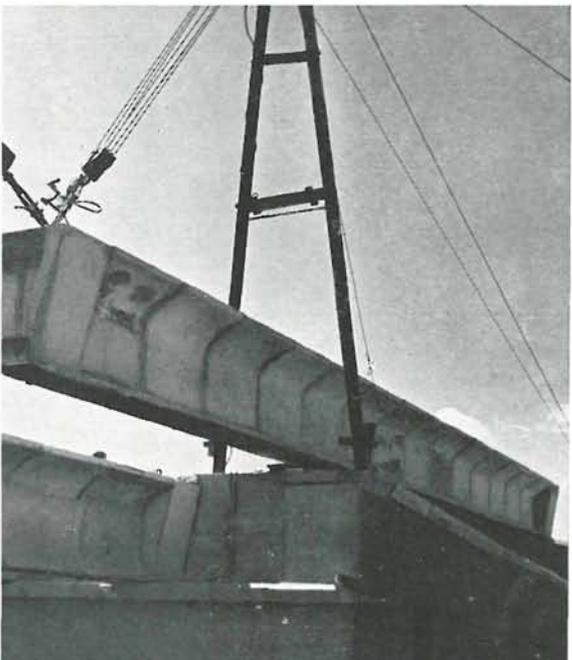
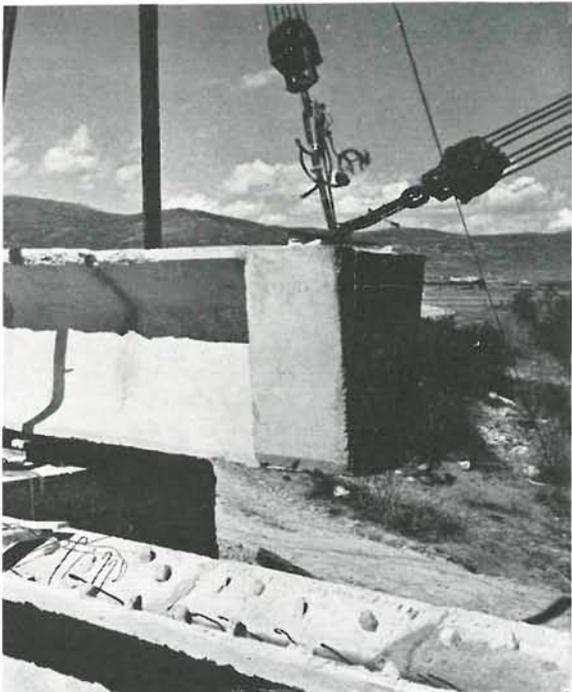
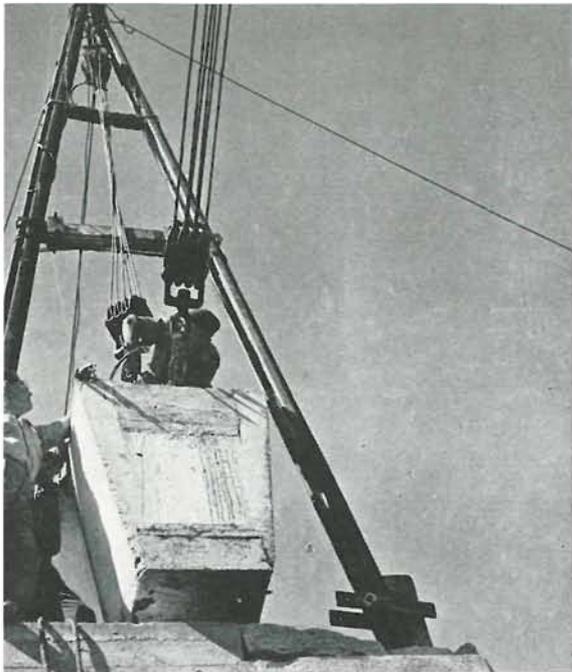
SECCION TRANSVERSAL



SECCION LONGITUDINAL



- (1) Los cables de $\phi 20$ sirven para abajar 9,65 de acero especial
- (2) El cable de $\phi 30$ sirve para abajar 3,65 " "



Fabricadas las dovelas y alineadas dejando entre ellas una separación de 2 cm, se enhebra la armadura de acero de alta resistencia. Una vez colocada la armadura, se rejunten, con mortero, las separaciones entre piezas, aplicándose los gatos para tesar la armadura a las treinta horas del rejuntable.

Solidarizadas las piezas mediante el esfuerzo de compresión introducido, se lanzan colgándolas de dos torretas rudimentarias, ejecutadas con carriles, mediante cables accionados por dos cabrestantes sencillos.

La circunstancia de que las dovelas se solidarizan mediante la compresión ejercida por el pretensado, invalida la posible objeción de que las juntas constituyen una sección débil.

Según se prescribe en casi todas las normas, las piezas pretensadas deben resistir las cargas de servicio sin que, bajo su acción, aparezcan tensiones longitudinales de tracción.

Proyectado el puente mediante el doble cálculo a la fisuración y a la rotura, todas las fibras longitudinales están comprimidas, incluso bajo la acción del tanque de 60 toneladas, después de haberse experimentado las pérdidas habituales de tensión.

En el cálculo en rotura se ha prescindido de la resistencia en tracción del hormigón, hipótesis, por otra parte, usual en todos los casos.

Por otra parte, los ensayos efectuados en el Instituto Técnico de la Construcción y del Cemento, sobre vigas de 10 y 15 m de luz, pretensadas y construidas con análogo criterio, han demostrado la identidad entre las previsiones teóricas y los resultados experimentales.

* * *

Debo expresar mi agradecimiento a D. Lamberto de los Santos, el Ingeniero de la Administración, verdadero promotor de este ensayo, en quien siempre encontré una colaboración sincera y activa, valorada por su indiscutible experiencia en estos problemas.

También debo agradecer la estrecha colaboración prestada por D. Carlos Ruiz Larrea, Ingeniero de A. M. S. A. (la Empresa constructora) y por D. Ricardo Barredo, cuyo sistema de presentado se empleó. Ellos idearon el original sistema de lanzamiento de las vigas, que funcionó a la perfección.

Pocas obras se han desarrollado con la facilidad con que se ha construido este puente. El mérito de esta difícil cualidad corresponde tanto a los constructores como a la labor dinámica y eficaz de la Administración.



