

Proyecto y construcción de un puente sobre el río Paraguay^(*)

Por ALVARO FERNANDEZ

Ingeniero de Caminos, C. y P.
Entrecanales y Távora, S. A.

El puente sobre el río Paraguay es una de las más notables realizaciones internacionales de la técnica española en los últimos años. Se trata de una estructura de 1.370 metros de longitud total, de hormigón pretensado y sección en cajón, con un vano central de 170 metros, construido por voladizos sucesivos. En este artículo se exponen los rasgos más importantes de este puente, su proyecto y construcción.

ANTECEDENTES

Desde hace décadas, ha sido un permanente anhelo del Paraguay, el establecer una unión carretera entre las dos regiones naturales del país, cortadas de Norte a Sur por el caudaloso río Paraguay. La construcción de un puente sobre el río podía terminar con el relativo aislamiento del Chaco, facilitando así el

desarrollo de esta región que representa más de la mitad del territorio.

Los primeros estudios de factibilidad señalaron tres posibles emplazamientos del puente, dos de ellos con un extremo en la propia capital, Asunción, y el tercero a unos 15 Km aguas arriba en un estrechamiento del río denominado remanso Castillo.

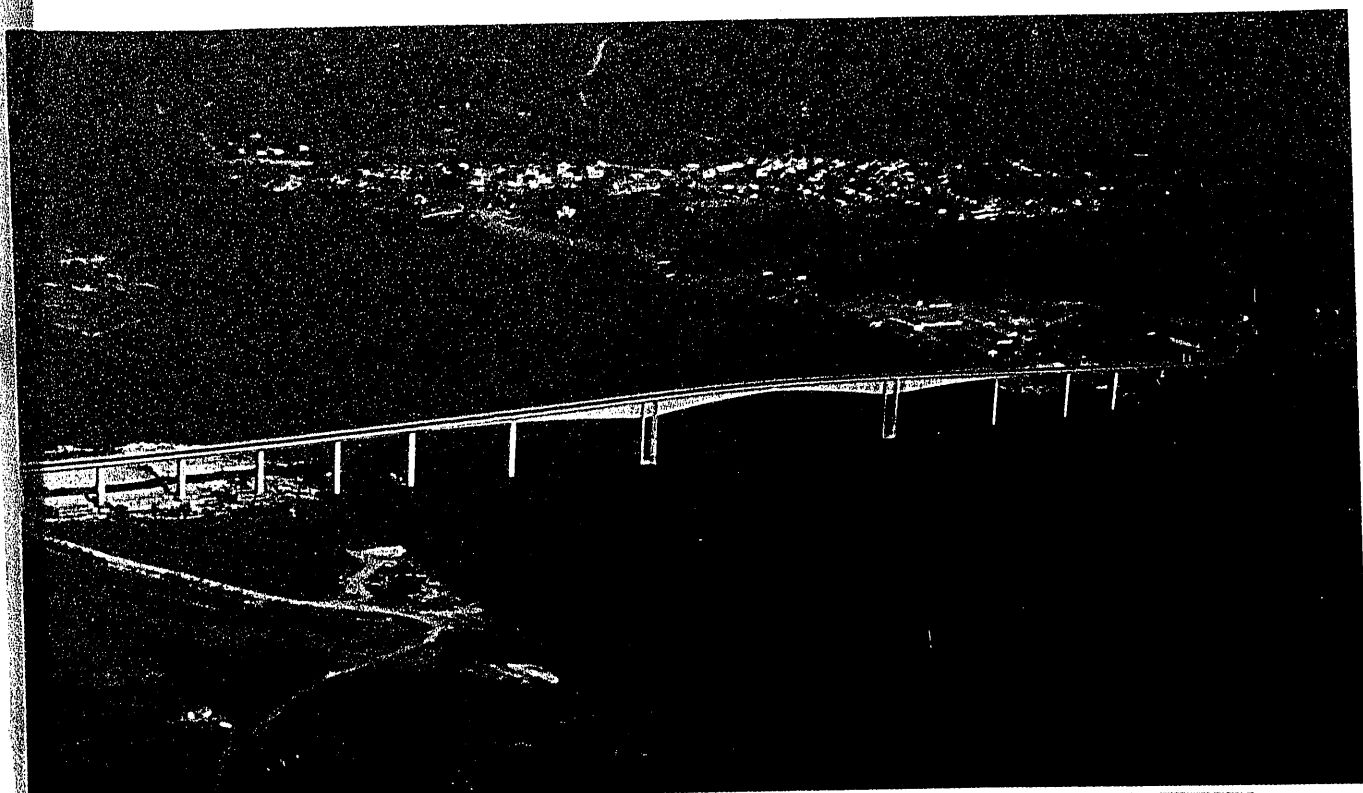
El Gobierno español concedió en su día un crédito especial al Gobierno del Paraguay para la construcción del Puente y, en

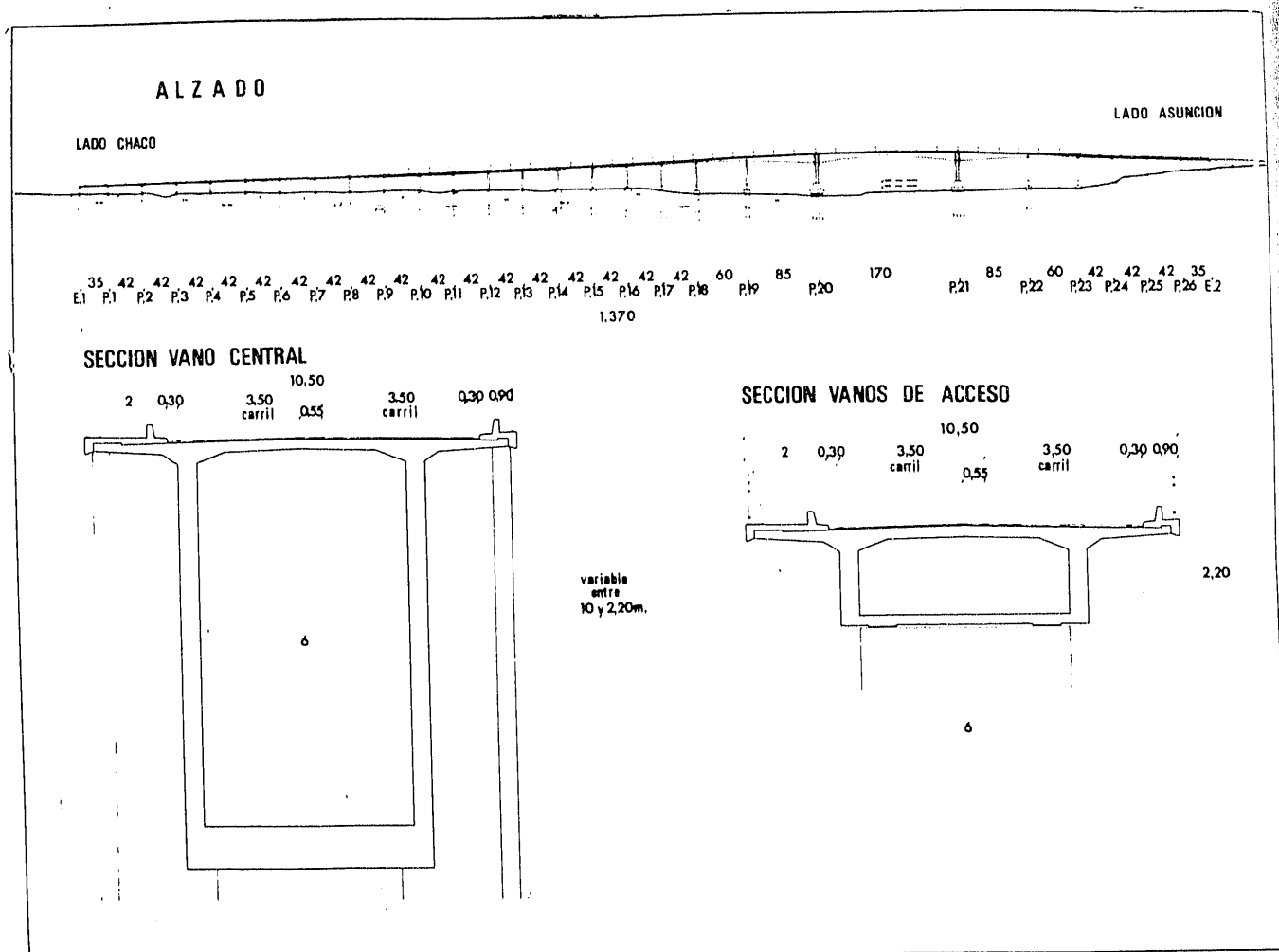
consecuencia, el Ministerio de Obras Públicas español asesoró en todo lo relativo a especificaciones técnicas y de licitación al Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones del Paraguay.

En agosto de 1975, luego de licitación pública para proyecto y construcción, se adjudicaron los trabajos a la empresa Entrecanales y Távora, S. A.

Para el desarrollo de proyecto de ejecución, Entrecanales contó con la colaboración de su filial de estudios Iberinsa.

(*) Se admiten comentarios sobre el presente artículo, que pueden remitirse a la Redacción de esta Revista hasta el 31 de marzo de 1980.





2. ELECCION DE EMPLAZAMIENTO

Del estudio de factibilidad se desprendía una neta preferencia por el emplazamiento de remanso Castillo. Nuestras propias observaciones del lugar, una campaña de sondeos mecánicos y acústicos, ratificaron esa elección, siendo conveniente únicamente el desplazar aguas arriba, el eje del puente, en unos 100 metros. De esta forma se evitaban algunas cavidades e irregularidades del fondo rocoso, así como un islote de arena que podía obligar a aumentar la luz central.

3. SOLUCION ESTRUCTURAL

Los informes geológicos previos indicaban la existencia de

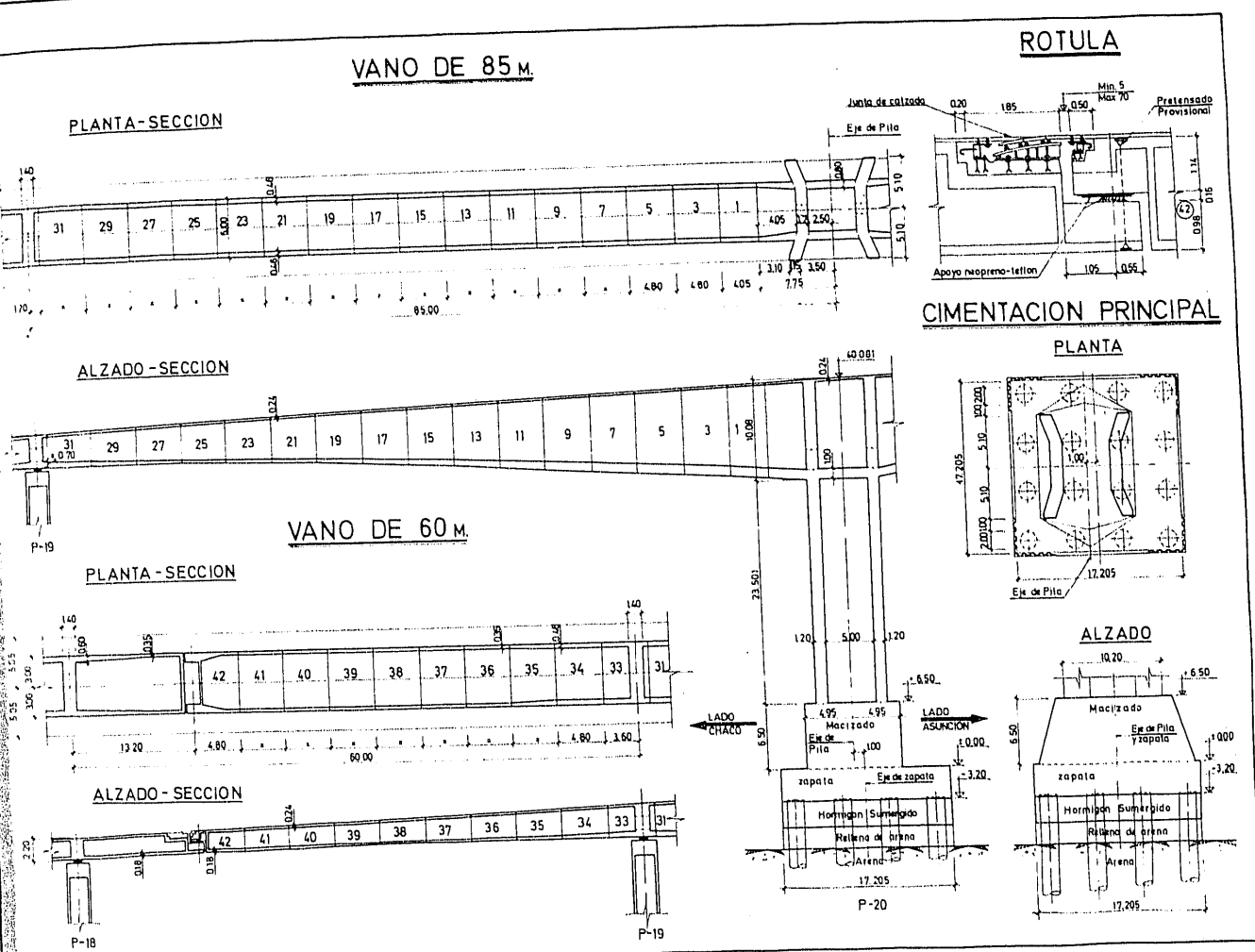
una importante cobertura de arena fina, de unos 15 a 20 metros de potencia, tanto en la margen derecha del lado Chaco, inundable en avenidas extraordinarias, como en la mitad del cauce propiamente dicho. Debajo de esta arena se encontraba una arenisca ferruginosa, muy débilmente cementada, que afloraba en la mitad del cauce. Este afloramiento se extendía también en la margen izquierda, del lado donde se encuentra Asunción.

Los condicionantes hidráulicos imponían, en avenidas, un espejo de agua de 1.250 metros de ancho y un canal de navegación de 150 metros, con niveles probables de agua oscilando entre la cota $\pm 0,0$ y la $+ 6,50$, que corresponden a profundidades aproximadas entre 6,5 y 13 metros.

Se encontraban así tres zonas claramente diferenciadas:

- Una zona en la margen derecha, del lado Chaco, bastante plana y a una cota media aproximada de $+ 5,0$ metros, formada de arenas aluviales, de 15 a 20 metros de potencia, como hemos dicho anteriormente y con posibilidad de inundaciones ocasionales.
- Una zona en la margen izquierda, del lado Asunción, fuera del cauce del río, con la arenisca en superficie, aunque meteorizada en unos tres metros.
- Una zona central dentro del cauce del río. En su mitad de la margen derecha se encuentra una arena fina que puede llegar a seis metros

PROYECTO Y CONSTRUCCION DE UN PUENTE SOBRE EL RIO PARAGUAY



de potencia antes de que aparezca la arenisca. En su mitad de la margen izquierda el fondo del río lo constituye la propia roca.

Las características geológicas mencionadas aconsejaron, en las zonas con arena, la utilización de pilotes de gran diámetro, 1,6 metros, atravesando la capa de arena fina y empotrándose varios diámetros en la roca. En las cimentaciones del cauce donde aparecía la arenisca sin cobertura de arena, fue también considerada necesaria la utilización del mismo tipo de pilotaje debido a la escasa cimentación de la roca. Se pudo comprobar que ésta, aunque de suficiente capacidad de carga estática, podía ofrecer dudas razonables de resistir la intensa socavación que podía originarse

en el emplazamiento de las pilas y sus cimentaciones.

Con el fin de respetar el ancho de navegación de 150 metros, se proyectó la luz central de 170 metros entre ejes de pilas, estricto mínimo necesario.

Para el acceso del lado del Chaco, de unos 700 metros de longitud, se tantearon algunas soluciones estructurales. Entre la solución de vigas prefabricadas y la de viga continua en cajón, no aparecieron diferencias económicas significativas, adoptándose entonces la segunda, más funcional por la reducción de juntas de calzada y de mejor efecto estético.

El acceso del lado de Asunción, aunque mucho más corto, se proyectó con idéntica solución estructural al lado Chaco,

para conseguir unicidad en las formas. El vano central de 170 metros se continúa a cada lado por uno de 85 metros y otro de 60 metros. Este último vano de 60 metros enlaza con el cajón continuo, mediante una rótula.

Con el fin de satisfacer las imposiciones de gálibo de navegación, máxima pendiente longitudinal y espejo de agua para máximas avenidas, el perfil quedó definido en el lado del Chaco con dos pendientes del 3,5 y 2,5 por 100 con acuerdo parabólico entre ellas. En el lado de Asunción, por una rasante con pendiente del 3,5 por 100. En la parte central, entre las pilas principales que encuadran la luz de 170 metros, la rasante es un acuerdo parabólico que enlaza las dos pendientes laterales del 3,5 por 100. Con esta disposi-

ción se obtuvo la menor longitud posible de tablero, 1.370 metros, que cumplía las condiciones impuestas.

El acceso del lado Chaco se resolvió mediante una viga cajón continua en hormigón pretensado, hormigonada tramo a tramo con auxilio de una cimbra autolanzable. Las luces que eran apropiadas para esta solución fueron de 42 metros entre ejes con excepción de la primera, que se fijó en 35 metros. El tablero así constituido, continuo en 762 metros, y con rótula fija únicamente sobre el estribo, tiene una secuencia de luces de $35 + 17 \times 42$.

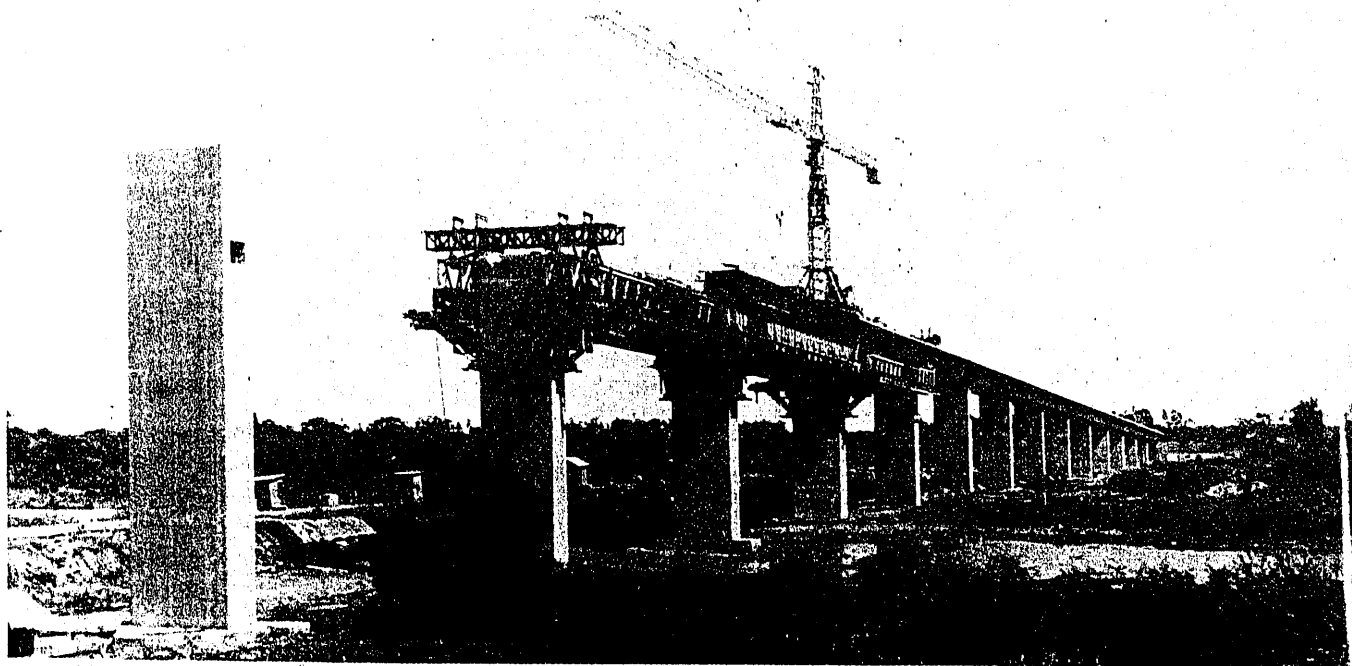
El acceso del lado Asunción es similar, como hemos apuntado, también con rótula fija en el estribo y secuencia de luces de $35 + 3 \times 42$. Dado que el plazo de ejecución de la obra no permitía la reutilización de la cimbra autolanzable en este lado, se previó el hormigonado tramo a tramo sobre cimbra tradicional directamente apoyada contra el terreno. Ha sido posible, sin embargo, la reutilización de

los encofrados empleados en el lado Chaco.

Con una luz principal de 170 metros se consideró conveniente la continuidad de la clave por la ya conocida razón de atenuar las deformaciones diferidas. Esta continuidad, con altura de pilas relativamente pequeña de 30 metros, obligó a la elección entre una solución de apoyo deslizante sobre una de ellas o la adopción de pila-pantallas con suficiente flexibilidad para desplazamientos horizontales de su cabeza. La utilización de costosos aparatos de apoyo deslizantes, que hubiesen sido necesarios dadas las importantes cargas verticales, unido a los problemas de ejecución de los voladizos por la falta de empotramiento total con las pilas, desaconsejaban la elección de la primera solución. Por el contrario, el empotramiento entre pantallas flexibles y el dintel era limpio, permitía el avance en ménsula con los carros sin establecer empotramientos provisionales y podía conducir, además, a una buena solución estética.

Las pantallas de estas pilas principales mencionadas, las números 20 y 21 que encuadran el canal de navegación, si bien flexibles, deben tener la rigidez necesaria para absorber las fuerzas horizontales de viento y frenado. Además deben ser lo suficientemente rígidas para evitar el pandeo de conjunto. Por esta razón se han previsto de una sección ligeramente arqueada en lugar de rectangulares.

Los accesos en viga cajón continua del lado Chaco y del lado Asunción enlazan con los vanos centrales de canto variable por intermedio de sendas articulaciones que transmiten sólo esfuerzos verticales. Estas articulaciones están constituidas por apoyos deslizantes de neopreno teflón. En el plano vertical de las articulaciones se sitúan las dos únicas juntas de calzada de todo el puente. La mayor de las dos, que enlaza con el acceso lado Chaco, debe permitir movimientos de -40 centímetros y $+20$ centímetros por fluencia, retracción y temperatura.



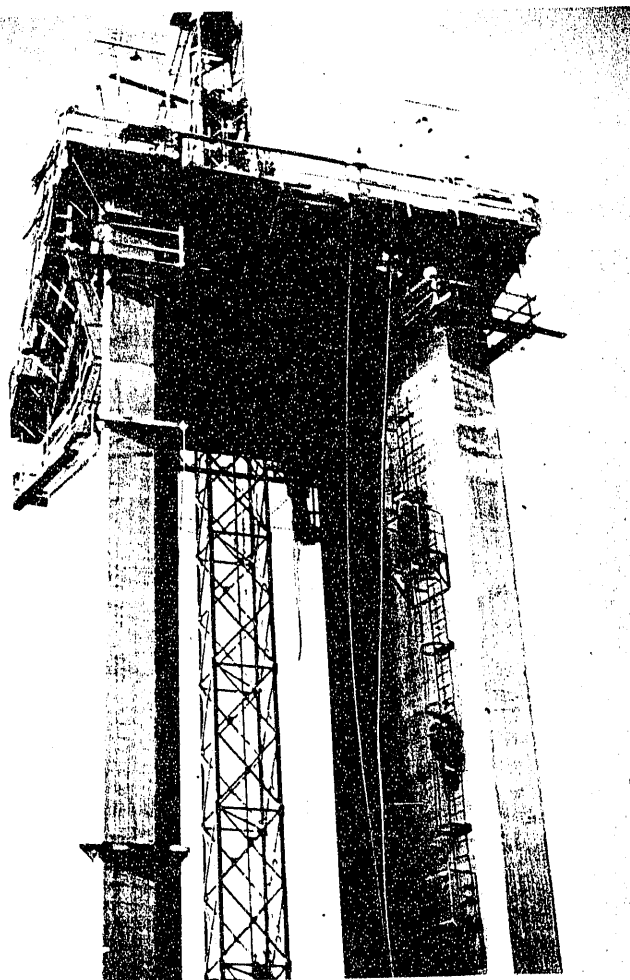
PROYECTO Y CONSTRUCCION DE UN PUEBLO SOBRE EL RIO PARAGUAY

DESCRIPCION DE LA ESTRUCTURA

tablero, previsto para dos de circulación, tiene un o de 7,6 metros, una acera onal de 2,0 metros y un an- de servicio de 0,9 metros, un total de 10,5 metros. s bordillos elevados cum- la función de proteger la ulación de peatones y actuar guías contra los impactos de culos.

a viga continua de los acce- tiene un canto constante de metros con pendiente late- de desagüe. La losa superior de 24 centímetros y la infe- variable desde un mínimo 14 centímetros hasta 28 cen- etros sobre los apoyos. Las as son de 35 centímetros, mentando a 60 centímetros bién sobre apoyos. El pre- sado longitudinal está consti- do por ocho tendones de T 1/2" más dos tendones de T 1/2", tesados tramo a tra- o, con empalmes en las jun- s, a 1/5 de la luz. Todo el pre- sado del puente ha sido rea- do con el sistema "Stron- old". No se ha previsto pre- sado transversal en la losa

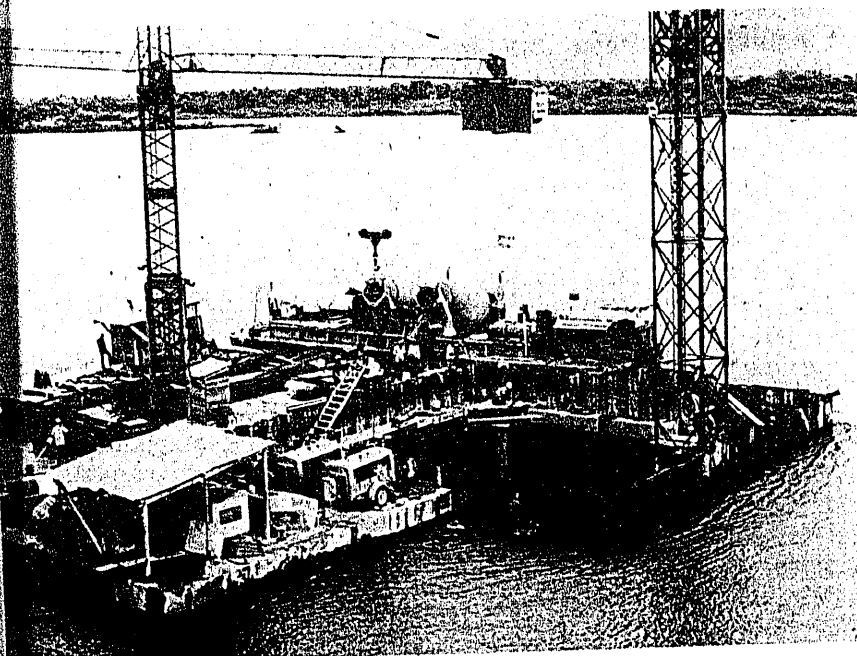
superior ni en las vigas tra- viesas.

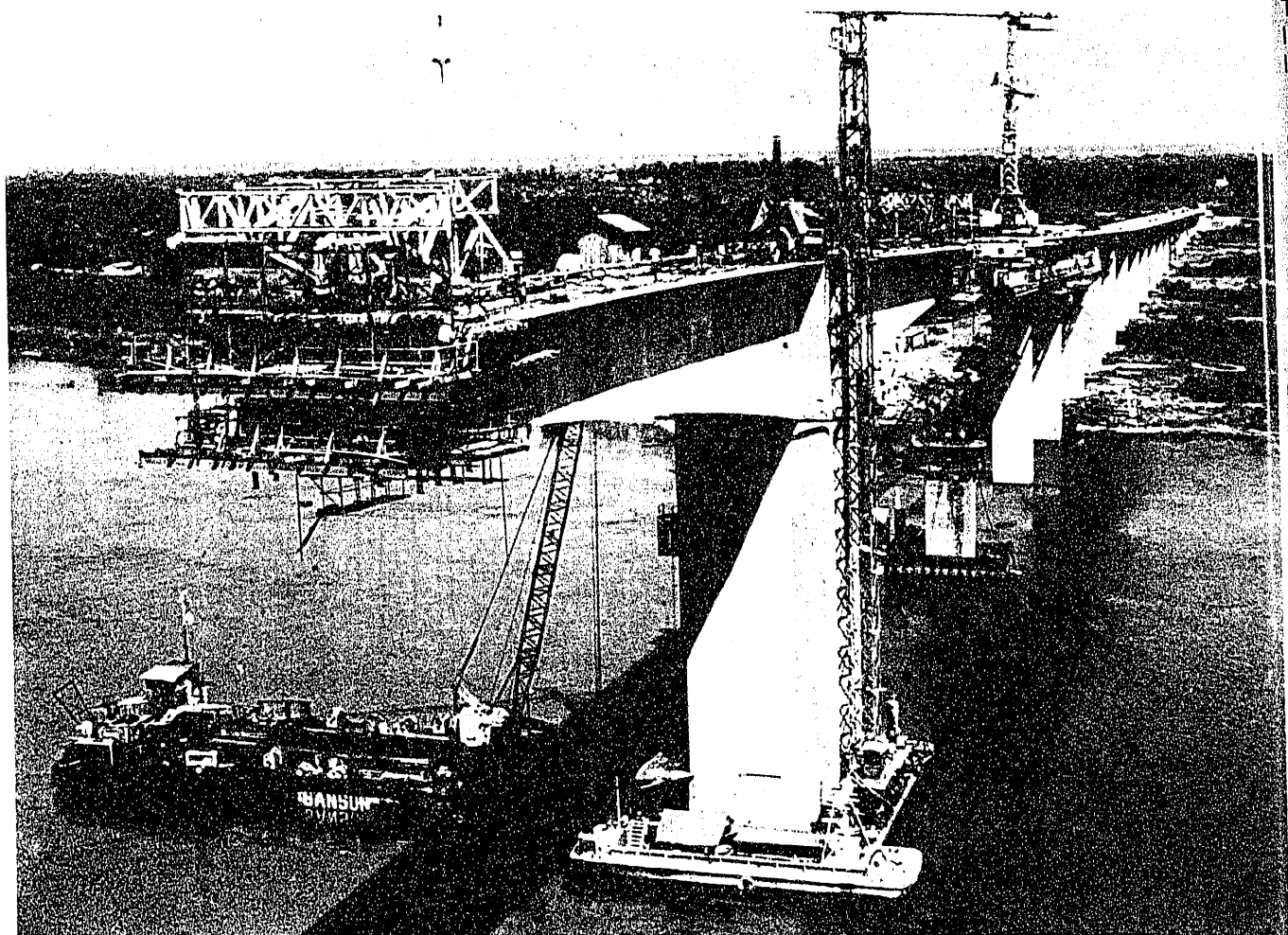


Los apoyos deslizantes son de neopreno-teflón. La rótula, sobre el estribo, es de fundición mecanizada y transmite todas las fuerzas horizontales.

Las pilas son de sección rectangular hueca de 5,10 x 2,5 metros, con paredes de 25 centímetros de espesor. Se construyen con encofrados deslizantes.

Las 13 pilas más cercanas al estribo y, por consiguiente, de menor altura, se cimentan con una pareja de pilotes excavados de 1,6 metros de diámetro. Estos pilotes alcanzan los 25 metros para atravesar la capa de arena y empotrarse convenientemente en la roca. El resto de las pilas, hasta la 17, se cimentan sobre tres pilotes similares a los anteriores y con un encepado triangular de reparto. Las pilas 18, 19, 22 y 23, en el cau-





ce, se cimentan sobre seis pilotes cada una.

Las cimentaciones de las pilas de la viga continua del lado de Asunción son zapatas apoyadas directamente en la arenisca, una vez retirada la capa meteorizada.

Los vanos centrales, sobre el río, de luces $60 + 85 + 170 + 85 + 60$ son de sección cajón y canto variable. Se construyen todos por voladizos sucesivos.

El canto del dintel varía desde un máximo de 10 metros sobre las dos pilas centrales números 20 y 21, hasta 2,28 metros en la clave del vano mayor en el centro del río. El canto disminuye también de forma continua en los vanos laterales de 85 y 60 hasta 2,28 metros al

enlazar con la viga cajón continua del mismo canto, en la vertical de la articulación. Esta articulación, al mismo tiempo que la junta de calzada, está en el extremo de un voladizo de 13,4 metros de la viga continua.

Las formas externas de los vanos de canto variable coinciden con las homólogas de la viga continua. La losa superior es también de 24 centímetros de espesor y la inferior varía entre un mínimo de 18 centímetros y un máximo de 100 centímetros en el empotramiento con las pilas centrales.

Las almas son de un ancho constante de 46 centímetros, reduciéndose a 35 centímetros en el vano de 60 metros. No se ha previsto ningún pretensado vertical o inclinado en las almas.

El pretensado longitudinal está constituido por 80 tendones de $16 \text{ T } 1/2''$ en la sección más solicitada. Se han previsto anclajes activos a ambos extremos de cada tendón para mayores garantías. Sobre las pilas 19 y 22, contiguas a las dos centrales 20 y 21 que enmarcan la luz mayor, se ha colocado un pretensado adicional para compensar el momento flector negativo que allí aparece. El cierre de la clave se realiza mediante un pretensado en la losa inferior con 20 tendones de $16 \text{ T } 1/2''$, estableciéndose así la continuidad de los cuatro vanos centrales de canto variable.

Estos vanos de canto variable se hormigonan por voladizos sucesivos con ayuda de dos parejas de carros, avanzando a ambos lados de las pilas 20 y 21.

PROYECTO Y CONSTRUCCION DE UN PUENTE SOBRE EL RIO PARAGUAY

Las dovelas tienen una longitud de 4,8 metros, siendo mayor de 180 Ton de peso.

La dovela de clave del vano de 170 metros tiene 2,4 metros de longitud.

Las pilas 19 y 22 se dejan sin hormigonar en su parte superior en una primera fase con el fin de permitir el paso de los camiones y sus encofrados. Una vez sobrepasadas, se completa la segunda fase de la cabeza de la pila, colocándose apoyos deslizantes de neopreno-teflón y apoyándose el extremo de la ménsula sobre ellos, después de introducir un levantamiento del mismo mediante gatos especiales que mejoran, además, el estado tensional del dintel.

Una vez apoyado el extremo de la ménsula sobre la pila, el carro continúa el avance con hormigonados de 4,8 metros hasta alcanzar la junta con el dintel continuo de canto constante. Con el fin de reducir las tensiones, que serían prohibitivas durante este nuevo avance en ménsula, se introduce un pretensado provisional, externo, inmediatamente encima de la losa superior, anclado en las almas mediante silletas metálicas atornilladas a presión.

Todo el acero para pretensa-

do ha sido del tipo estabilizado, con carga de rotura de 188 kilogramos por milímetro cuadrado.

Las cimentaciones de las dos pilas centrales están constituidas por sendos encepados de $17,2 \times 17,2$ metros, apoyados cada uno sobre 16 pilotes de 1,6 metros de diámetro. La longitud de los pilotes se estableció teniendo en consideración la posibilidad de grandes socavaciones.

5. PROYECTO

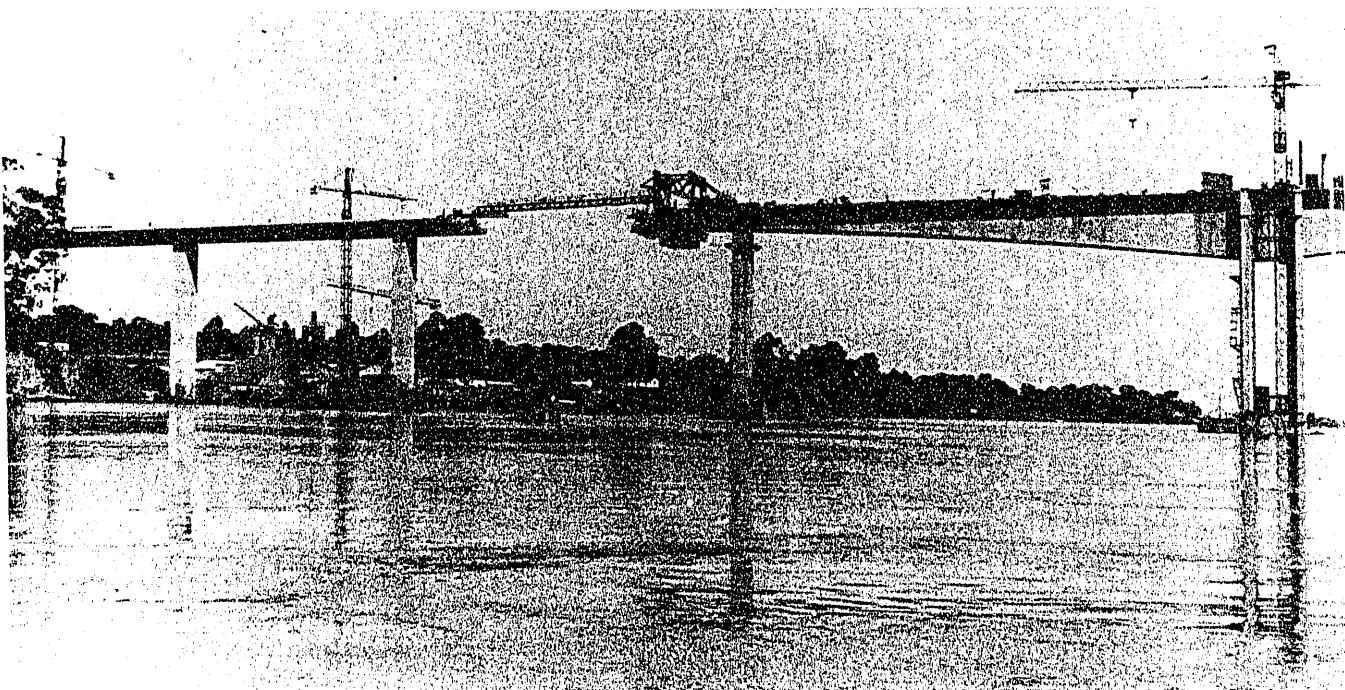
Para el cálculo se han supuesto tres esquemas estructurales diferenciados. Uno, la viga continua de 18 tramos en el acceso Chaco; otro, la viga continua de cuatro tramos en el acceso Asunción, y un tercero formado por los cinco tramos centrales de canto variable.

Las dos primeras estructuras se conectan e interfieren con la tercera a través de las articulaciones. Los tramos de las vigas continuas alejadas de las articulaciones han podido estudiarse considerándolos aisladamente. En estos, además de todos los estados intermedios constructivos al hormigonarse tramo a tramo, se han comprobado también las tensiones en el caso

límite de hormigonado total en una etapa. Esta hipótesis envolvente que nos sitúa del lado de la seguridad, es económicamente aceptable en estos casos de vigas continuas de luces moderadas. No es este el caso cuando estamos en presencia de grandes luces.

En los tramos centrales por voladizos sucesivos, con una alta relación de cargas permanentes a sobrecargas, no pareció aconsejable verificar las tensiones para el caso virtual límite del hormigonado en una sola vez, investigándose por el contrario la redistribución de esfuerzos por deformaciones diferidas. Las ménsulas de 85 metros que se hormigonan por dovelas sucesivas avanzando desde una pila hacia ambos lados, tendrán modificados, en su fase final, sus vínculos estructurales, pasando de una ménsula pura a tener una continuidad en la clave en un lado y un apoyo en el otro. Como es sabido, esta nueva situación restringe las deformaciones de fluencia que tendría la ménsula pura debido a las tensiones producidas durante las etapas constructivas. Estos intentos impedidos de deformación generan una reacción sobre la pila que aumenta con el tiempo desde cero a R_p y un





momento flector en clave que aumenta también desde cero a M_c .

Se puede demostrar, con alguna simplificación en las hipótesis, que los valores de nuestras incógnitas R_c y M_c son:

$$R_c = R_0 (1 - e^{-\varphi})$$

$$M_c = M_0 (1 - e^{-\varphi})$$

donde φ es el coeficiente de fluencia en el intervalo de tiempo que va desde la aparición del nuevo vínculo hasta el infinito.

R_0 y M_0 son la reacción y el momento flector que se obtendrían en el caso que la estructura hubiera sido construida en una sola etapa, con presencia de los vínculos finales y sometida solamente a las cargas que actúan con anterioridad a la modificación de vínculos, es decir, el peso propio y el pretensado en nuestro caso.

Llamando $\alpha = 1 - e^{-\varphi}$ y $\beta = 1 - \alpha$, también se demuestra que cualquier esfuerzo interno E en una sección es igual a:

$$E = \alpha E_0 + \beta E_i$$

donde E_0 es el esfuerzo en dicha sección en la hipótesis virtual de construcción en una etapa y E_i el esfuerzo en la misma sección en la fase constructiva inmediatamente anterior a la aparición de los nuevos vínculos. Esto significa que el estado real al cual tiende la estructura con el tiempo es intermedia entre la última etapa constructiva y un estado virtual equivalente a la ejecución del conjunto en una sola etapa con los vínculos finales. La estructura tiende tanto más a este segundo estado cuando más tiempo pasa, pero sin llegar nunca a él.

Para un valor frecuente de $\varphi = 1,8$ se obtiene:

$$E = 0,84 E_0 + 0,16 E_i$$

valor suficientemente alejado de la hipótesis virtual.

Solamente si hacemos $\varphi = \infty$, lo cual nunca es cierto, obtenemos $E = E_0$. Esta hipótesis, aunque teóricamente incorrecta, se utiliza corrientemente en las vigas continuas de luces moderadas, como fue el caso en los accesos del Puente Paraguay, hipótesis envolvente del fenó-

meno real y que da un error por exceso de poco coste económico. Por el contrario, en los vanos centrales de grandes luces, hubiésemos tenido, de usarla, un error por exceso entre un 10 y un 15 por 100 nada despreciable en este caso.

Las tensiones máximas de compresión en el hormigón se producen en fase constructiva y alcanzan los 140 Kg/cm².

6. CONSTRUCCION

Las instalaciones principales de la obra, talleres de ferralla, pretensado y mecánico, laboratorio y una central de hormigón para 50 m³/hora, se han situado en la margen de Asunción, mejor comunicada. Se construyó un embarcadero apropiado para la descarga de barcos con diferentes suministros, algunos desde Europa y otros, como el cemento, del propio país.

En la margen del Chaco se instaló una segunda central de hormigón, también de 50 m³/h, utilizada en la construcción del largo acceso de ese lado.

PROYECTO Y CONSTRUCCION DE UN PUENTE SOBRE EL RIO PARAGUAY

Para la perforación de los pilotes en tierra se ha utilizado la entubadora Bade, con capacidad de extracción de 150 toneladas y capacidad de giro de 150 m-Ton., un trépano de rotación y bomba mamut. Para los pilotes en el río se montó sobre este equipo una ponona con capacidad de 200 Ton. en la proa para la extracción del tubo. Se completó el equipo para el pilotaje y cimentaciones con una grúa PH de 60 Ton. y un martinete de cinco toneladas para la hinca de tablestacas.

La consistencia en la capa de arena ha sido suficientemente alta para evitar la colocación de camisas perdidas en los pilotes. El hormigonado del pilote se realizó al mismo tiempo que se extraía la entubación con una carga de 15 a 5 metros, según hubiese o no arena en las capas superiores del terreno que pudiesen provocar el sifonamiento.

En el río fue necesaria la colocación de camisas perdidas en chapa de cuatro milímetros, tanto en el agua como incluso en una parte de la arenisca.

Los pilotes están provistos, en su punta, de una cesta de grava que se inyectó con posterioridad al hormigonado del fuste. De esta forma se asegura la entrada en carga inmediata del pilote, se mejoran las condiciones del trabajo de punta y se realiza una prueba de capacidad portante a fricción lateral del pilote.

En el río, una vez terminado

el pilotaje, se construyó un recinto rectangular de tablestacas, hincadas en la arenisca, vertiéndose a continuación un tapón de hormigón sumergido.

Una vez terminado el agotamiento del recinto, se pudieron hormigonar en seco los encepados fuertemente armados con barras $\varnothing$ 32 de acero A-46, soldadas con electrodos especiales.

Se utilizaron dos juegos de encofrados deslizantes para todas las pilas de sección rectangular hueca, y otro juego para las dos pilas principales 20 y 21.

La construcción del arranque del dintel sobre las pilas principales, de 15,50 metros de largo para permitir el montaje, en oposición, de la pareja de carros, se ha realizado suspendiendo los encofrados del fondo de una estructura metálica apoyada a su vez en las cuatro pilastras esquina de las pantallas de la pila que habían sido hormigonadas anteriormente con el deslizamiento. Estas pilastras se encuentran sólo al exterior del cajón del dintel, evitándose así las juntas de hormigonado en los planos fuertemente armados de esta zona. Una vez hormigonada esta primera fase, la losa de fondo, se hormigonó el resto en dos fases más, apoyándose en la anterior ya endurecida.

La cimbra autolanzada utilizada en los accesos del Chaco, se

apoya en dos o tres pilas, según la etapa, y avanza deslizándose sobre teflones apoyados en ménsulas metálicas atornilladas a cada lado de la pila. Los encofrados laterales se ajustaban hidráulicamente. Se ha conseguido un ritmo de avance de doce días por cada tramo de 42 metros.

Las dovelas de los voladizos sucesivos se han hormigonado alternativamente utilizando un solo equipo humano para los dos carros. El tesado ha podido realizarse a las treinta y cinco horas acelerando el fraguado con vapor.

El ritmo ha sido de sólo cuatro días por ciclo para una dovela. En alguna ocasión se han construido tres dovelas por semana.

El transporte del hormigón fresco en el río se realizó con tres gabarras provistas de tambor mezclador de seis metros cúbicos. Todos los vertidos, salvo el de las pilas realizadas con encofrado deslizante, se ha llevado a cabo mediante bombeo.

La dosificación del hormigón se ha realizado utilizando dos tamaños de árido grueso, el máximo de 25 milímetros y dos tipos de arena, una de río, muy fina, y otra de cantera.

Las resistencias características obtenidas en probeta cilíndrica se han situado en los 410 kilogramos por centímetro cuadrado.