

CONSTRUCCION DE PUENTES POR VOLADIZOS SUCESIVOS MEDIANTE DOVELAS PREFABRICADAS (*)

Comunicación técnica presentada al Congreso de Praga de la Federación Internacional del Hormigón Pretensado (FIP), junio 1970.

Por CARLOS FERNANDEZ CASADO,
JAVIER MANTEROLA ARMISEN
LEONARDO FERNANDEZ TROYANO

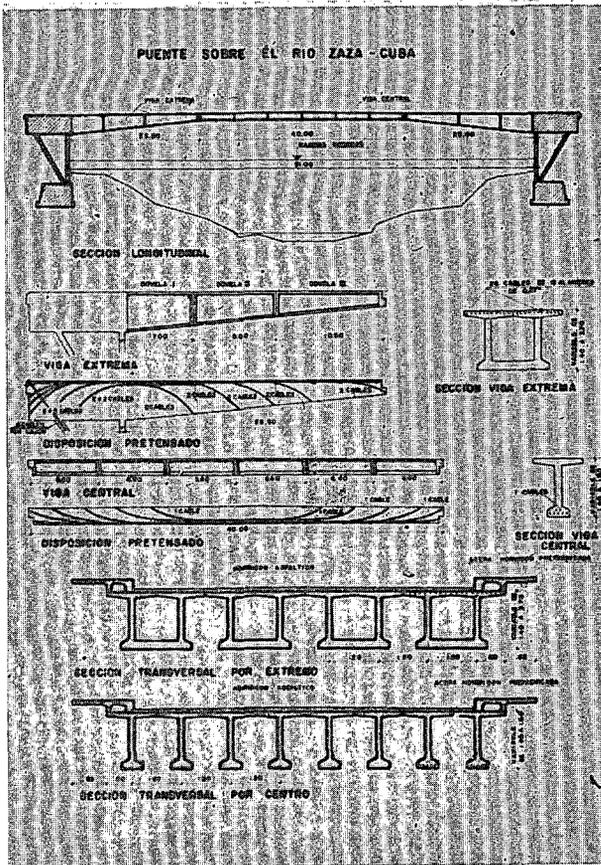
En el presente artículo los autores hacen un resumen de los puentes construidos en España, por voladizos sucesivos mediante dovelas prefabricadas, desde 1958, fecha en la cual fue concebido el primer puente. La primera realización data de 1964, seguida por la construcción del puente de Castejón, que posee actualmente el récord de los puentes de tramo recto en España, y por otros tres que ya han sido puestos en servicio. Los trabajos para la construcción de un quinto puente están muy avanzados y se tiene en estudio la ejecución inmediata de varios puentes más. Según los casos, han sido utilizadas dovelas de 8 a 80 toneladas, que han sido unidas entre sí con epóxidos. Los vanos van desde 56 a 101 metros.

El procedimiento de construcción de puentes por dovelas en voladizo reúne las ventajas del sistema de voladizos sucesivos y las de la prefabricación. El primer puente construido por voladizos sucesivos fue el de Santa Catalina, sobre el río Peixe, cerca de Herval, en Brasil, lo cual aconteció en el año 1931, siendo su autor el ingeniero Baumgarten. Es un puente de hormigón armado con dintel continuo de tres vanos, que con los 68 metros de luz del central, fue récord del tramo recto durante algunos años y es, además uno de los puentes más bellos de hormigón armado. Tuvo poca resonancia en la

esfera de la construcción, pues sólo se aplicó el procedimiento a tres o cuatro puentes más de pequeña importancia. Fue una anticipación genial y prematura, ya que el hormigón armado se prestaba mal a construir un dintel con numerosas juntas transversales.

El procedimiento se recoge a los veinte años por Finsterwalder, quien en 1951 vuelve a aplicarlo en el puente de Balduinstein, sobre el Lahn, tramo compensado de modo natural con 62,10 metros de luz libre, en el cual quedan fijadas las características del sistema con avance por carro, se aplicaría con éxito creciente, ya que el pretensado abre unas perspectivas clarísimas al permitir cortar por juntas verticales, pues su localización va de acuerdo con la distribución

(*) Se admiten comentarios sobre el presente artículo, que pueden remitirse a la Redacción de esta Revista, hasta el 1 de octubre de 1970.



Puente de Zaza (Cuba). Proyecto 1958

tensional correspondiente al pretensado. La evolución del procedimiento ha llevado hasta el puente de Bendorf, sobre el Rin, con 206 m. de luz teórica, construido en 1962.

La introducción de la prefabricación, es decir, la construcción mediante dovelas en voladizo, aparece en el año 1958 con el puente ruso de Kranoholonski, sobre el Moscowa (1958-61), que consiguió también el récord en tramos rectos con sus 148 m. de vano central. Por las mismas fechas, 1958, nosotros proyectamos dos puentes tipo pórtico de célula triangular para Cuba: Zazá y Tuinicu, con luces de 96 y 75 metros, con motivo del concurso internacional convocado en Cuba para la reconstrucción de los puentes destruidos durante la revolución de Fidel Castro. El primero de ellos ganó el premio reservado al mejor proyecto, aunque no se construyó, pues aun siendo la solución más económica por presupuesto, no lo era al valorar los plazos teóricos de construcción.

A partir de esta fecha hemos proyectado un gran número de puentes en los más importantes ríos españoles, proponiendo este procedimiento, pero no llegamos a utilizar hasta el puente de Almodóvar, proyectado en el año 1960 y construido en 1962 a 1964. Tiene una zona principal de tres vanos: 35 + 70 + 35, cuyo vano central está constituido por dos ménsulas de 20 m., que soportan un tramo apoyado de 30 m. En este puente sólo se construyeron por el procedimiento las dos ménsulas, sirviendo para poner a punto el sistema, el cual se ha modificado después únicamente en lo que se refiere a utilizar el enlace de dovelas por junta seca en lugar de la junta húmeda utilizada en éste.

En la actualidad se han construido otros cuatro puentes más, donde el procedimiento se ha ajustado a las condiciones particulares de cada caso, especialmente en lo que se refiere a las posibilidades del transporte, las cuales han sido determinantes para la adopción del tipo de dovela, cuya característica principal es el paso. Estos cuatro puentes son los siguientes:

Puente de Castejón sobre el Ebro, en Navarra. — Tramos principales: 25 + 101 + 50 m. Se prefabricaron seis voladizos de 50 m. con dovelas de 9 Tn. Se proyectó en 1964, construyéndose en el período 1965-67. Construcción, por Agromán, S. A.

Puente de Sevilla sobre el Guadalquivir. — Tramos principales: 2 × 56. Se construyeron los dos voladizos simétricos desde la pila central con dovelas de 80 Tn. Sirve a seis circulaciones y está dividido en dos longitudinalmente. Terminado en mayo de 1968. Construcción, por Dragados y Construcciones, S. A.

Puente de Iznajar sobre el Genil. — Embalsado por la presa del mismo nombre con vanos centrales máximos de 55 + 85 + 55, que se construyeron a partir de las dos pilas centrales por voladizos simétricos con dovelas de 9 Tn. La altura de estas dos pilas es superior a 70 m. Terminado en marzo de 1969 por Agromán, S. A.

Puente de Los Vados sobre el río Genil, en tramo compensado de tres vanos, 25 + 72 + 25, dividido longitudinalmente en dos independientes dada su gran oblicuidad. Construido todo él por dovelas de 30 Tn. Terminación, julio 1970. Empresa Constructora Hidrocivil.

Además de estos puentes construidos hemos empleado la solución en diversos proyectos, algunos de los cuales, como el del puente del Rey, en la red arterial de Madrid, con cinco vanos de 70 m., van a comenzarse a construir en este año. También lo hemos adoptado en dos proyectos de concursos internacionales: el puente sobre el Riachuelo, en Buenos Aires, para la autopista de Buenos Aires-La Plata, 150 m. de luz máxima, segundo premio del concurso internacional de 1967, y el del río Uruguay, en Paysandú, entre Argentina y Uruguay, con cinco vanos de 120 m., concurso que todavía no ha sido fallado.

El sistema constructivo se adoptó por los franceses, empresa Campenon-Bernard, que termina en 1964 el puente de Choisy-le-Roi, con luces de: 37,50 + 55 + 37,50, y continúa una serie que culmina en Oleron con 45 vanos de luces hasta 79 m.

Los holandeses lo adoptan para el puente de Oesterchelde, con luces máximas de 95 m. y dovelas del máximo peso: hasta 600 Tn. Recientemente, en el de Brielsche, con 80,50 + 112,50 + 80,50 m.

En Checoslovaquia inician en 1965 una serie de puentes para carretera y para ferrocarril, contándose entre los primeros el de Sirniku, con luces de 30 + 60 + 30 y entre los segundos el de Margecanoch, con 30,5 + 55 + 30.

El procedimiento se ha aplicado, aunque de un modo menos sistemático, en otros países. Así en Inglaterra, con el puente a Taf Fawr, de 64,40 m. de luz, en 1964; en Méjico para el de San Nicolás, con 40 m., y en Alemania con el puente sobre el Lech, 68 m., en 1967. La luz máxima conseguida corresponde al puente de Saratur, en Rusia, con vanos centrales de 106 + 160 + 106 m.

TIPOS ESTRUCTURALES

No existe limitación en los tipos estructurales a que puede aplicarse este procedimiento constructivo. Sirve a tramos compensados, vigas continuas, pórticos, elementos T, siendo solución clásica la de enlazar estos elementos T con articulaciones en los centros del vano, aunque también cabe apoyar cada uno de los elementos en sus dos extremidades.

En Almodóvar tenemos viga continua, aunque isostática mediante tramos laterales con ménsulas de 55 m. y tramo suspendido central de 30 m. En Los Vados la solución es de tramo de tres vanos continuos, aunque la gran descompensación de luces central-laterales, lo acerca a tramo compensado. En Sevilla tenemos una T pura apoyada en extremidades, con la particularidad de que estando articulado el pie del pilar y siendo deslizantes los otros dos, el pilar no toma flexiones por descompensación de carga en dintel y únicamente la correspondiente al frenado.

En Iznajar y Castejón tenemos elementos T con articulación en el centro del vano principal, pero con apoyo en sustentación deslizante en las otras dos extremidades. En Castejón una de las T tuvo vuelos simétricos de 50 m., mientras que la otra es de gran asimetría, pues el vano lateral es de 25 m. y el central de 101, por lo cual la extremidad correspondiente queda anclada para esfuerzos ascendentes.

En cuanto a la organización transversal de la estructura las secciones son de cajón rectangular en número variable, desde uno por carril de tráfico hasta uno por vía de tres carriles en el puente de Sevilla.

En esto, como ya hemos indicado, resulta fundamental el peso máximo de la dovela, en lo cual influyen casi decisivamente las posibilidades de su transporte.

Durante el proceso constructivo el tipo estructural es distinto al definitivo, puesto que los dinteles funcionan como voladizos, mientras que en situación definitiva por lo menos los voladizos totales se enlazan mediante articulación deslizante y sólo volverán a ser voladizos completos para sobrecarga total simétrica en los dos de un vano. La divergencia es mayor cuando se da continuidad al vano central en el caso de tres vanos, puesto que ya nunca volverán a ser voladizos y aparecerán flexiones importantes de tipo dintel en la zona central, para actuación de sobrecarga central. Pero además, en este caso de estructura definitiva en tramo continuo, se altera normalmente el enlace pilar-dintel durante construcción dando rigidez al nudo triple o bien, empotrando los voladizos simétricos evolutivos por rigidización del enlace y refuerzo del pilar mediante introducción provisional de armaduras activas verticales a ambos lados del

pilar que anclan en el pie de éste y en la cabeza del dintel, o bien duplicando el apoyo por introducción de otro provisional muy próximo, que se apoya generalmente en la misma cimentación que el definitivo. Cuando las propias pilas son dobles, como ocurre en el puente de Iznajar, tenemos ya de origen y definitivamente esta disposición.

Otra variación de orden inverso a la anterior puede presentarse como nos ha ocurrido en el puente de Castejón, donde la construcción del voladizo de 50 adyacente al vano final de 25 m., hubiera dado flexiones importantes y definitivas en la pila solidaria durante el proceso constructivo, lo cual se evitó articulando el enlace de ambos en este período, mediante articulación de giro, para lo cual se transmitía la carga vertical a través de placa de plomo en una estrangulación central y con separación entre las barras de la armadura vertical, rellenando de hormigón el vacío y soldando armaduras al final del proceso.

En todos los procesos de voladizos sucesivos lo normal es avanzar hasta la mitad del vano, lo cual obliga a llevar el avance simultáneo o sucesivamente en direcciones contrarias, pero puede también, por tipo estructural o por condiciones particulares de la obra, llevarse el avance en una sola dirección, como en el caso de ejecución de dintel continuo de más de tres vanos o el de un elemento en T apoyado sobre pilas en sus dos extremos, como ha sido el caso del puente de Sevilla. En estas circunstancias resultaría anti-económico avanzar dejando en la última fase todo el vano en voladizo y más tratándose de dinteles de altura constante, como ocurre generalmente en estos casos; para evitar esto existen dos soluciones: o ayudar al voladizo con una armadura externa superior que hace el efecto de las péndolas de un puente colgado, o disponer apoyos intermedios provisionales que van introduciendo reacciones ascendentes para limitar las flexiones de tipo ménsula. En el puente citado se preveían en proyecto ambas soluciones, aunque con preferencia por la primera, pero al constructor le convino utilizar la segunda.

Cuando no se utiliza el proceso puro de avances por voladizos simétricos, sino que se avanza desde una pila teniendo el vano adyacente ya construido, suele ser preciso reforzar el tramo anterior por la falta de compensación

de flexiones que determina el dejarlo provisionalmente aislado. Esto se hace mediante armaduras activas externas que se recuperan al final. Así ocurrió en Almodóvar con los vanos laterales de 35 m. construidos *in situ* sobre la cimbra de tubos y en el tramo extremo de Castejón, en el cual, para su trabajo definitivo, las flexiones son siempre del mismo sentido poniendo armadura en cara superior, mientras que para su peso propio en la primera etapa reclama armadura en cara inferior.

MOLDEO DE DOVELAS

Siempre hemos premoldeado las dovelas junto al tajo en bloques que reproducen la misma agrupación que va a establecerse directamente en su ordenación definitiva. En unos casos las condiciones disponibles junto al puente han permitido llevar estas agrupaciones a la totalidad del voladizo, como en Castejón y en Sevilla, y en otros la falta de espacio ha obligado a subdividirlos en trozos independientes.

Esta idea la hemos aplicado desde el principio aun en el puente de Almodóvar, donde las dovelas que se iban a unir por junta húmeda con relleno de hormigón en espesores del orden de los 5 cm., pero es particularmente importante cuando la unión se hace por "junta seca" con pegamento de epóxido, puesto que conviene reducir el espesor de éste al mínimo por economía y por correcta ejecución.

Esto obliga a una perfección en replanteos de montaje extraordinarios, pero además, como se van acumulando errores de construcción y divergencias con el cálculo, hay que tener la posibilidad de rectificación.

En Sevilla el encofrado fue metálico con los costados inclinados adaptables a las diferentes dovelas, pero en los demás han sido de madera, empleándose el mismo grupo de encofrados en todos los voladizos.

Se dispone el encofrado en continuidad y se ejecutan las dovelas alternadamente, dando un desencofrante para las superficies en contacto.

El taller ocasional se ha dispuesto o bien sobre el propio terreno de las márgenes moldeando la forma del intradós en una bancada continua de hormigón, como en Castejón o Los Va-

dos, sobre la propia superficie del tablero del puente en los tramos de acceso; o también sobre la explanación del camino, Iznajar y Almodóvar, o bien en un muelle con pavimento disponible durante la construcción, como en Sevilla, donde el puente está inmediato a una de las dársenas del puerto fluvial. Con dovelas pequeñas si tenemos una superficie plana resistente conviene moldearlas, ya que la cabeza superior es plana, y como pesan poco es fácil invertir las al efectuar el traslado.

MONTAJE DE DOVELAS

El sistema de montaje que hemos empleado en tres de los puentes ha sido el más simple y universal, transporte mediante blondín, que nos ha conducido a las dovelas de 9 Tn., por ser ésta la capacidad del mismo. En estos casos, como la organización estructural impone un cajón por carril y el número de éstos es dos, tenemos desdoblado el voladizo, pudiendo continuarse en duplicado colocando el blondín en el plano axil y a suficiente altura, para ladearlo hasta los planos de cada uno de los voladizos.

En el puente de Los Vados el transporte se ha realizado por grúa sobre ruedas que recoge la dovela del parque de espera y la transporta al tajo, dejándola colocada en su situación definitiva. Es preciso preparar el fondo del cauce, que está casi seco en toda época, disponiendo una plataforma de rodadura con material obtenido del mismo cauce. En caso de avenida, la grúa sale rápidamente del cauce y se pone a salvo.

En el puente de Sevilla se han utilizado todas las ventajas del transporte por flotación y manejo con grúa flotante de 80 Tn., que lo lleva del muelle a la pontona primero y de la pontona al tajo después, dejándola definitivamente colocada. Estas facilidades, debidas a encontrarse en las proximidades del puerto, han permitido elevar el peso de la dovela a 80 Tn., que corresponde a medio puente, salvo extremidades de aceras y reducir al mínimo el número de ellas.

El enlace de dovelas se ha hecho mediante interposición de un recubrimiento de epóxido, con adición de fibras en proporciones diversas, según los casos, en espesores mínimos gracias a la adopción del sistema de moldeo por blo-

ques completos. En cada caso, teniendo en cuenta las condiciones locales de temperatura y humedad, se estudiaron experimentalmente en colaboración con la casa Ciba las proporciones del epóxido y de los aditivos para conseguir un tiempo de endurecimiento que permitiera realizar las operaciones de empalme y poder colocar dos dovelas seguidas el mismo día. Para la buena adherencia entre el epóxido y el hormigón, se sometían previamente las superficies a la acción ligera del chorro de arena que limpiaba el desencofrante y la suciedad que pudiera haberse adherido.

La coincidencia de superficies se ha corregido disponiendo un retallo horizontal en la cara inferior o a media altura en las almas para conseguirlo en cuanto al nivel y entalladuras en cuña en las cabezas para tener lo mismo en dirección transversal. Una vez corregido esto se apretaba la nueva dovela contra la anterior por sencillos dispositivos de tiro, y en el caso de pretensado Dywidag por aprieto de tuercas en alguna de las barras que tienen rosca en la sección extrema.

Corregida la coincidencia de superficies se procede al pretensado introduciendo o más bien prolongando los cables ya enhebrados para colocar los anclajes correspondientes, o bien colocar placa y tuerca si se trata del sistema Dywidag. En este segundo caso la dovela debe enhebrarse por las propias barras que luego se prolongan mediante el empalme de manguito a excepción de los que terminan en esa etapa que se anclan. En el puente de Almodóvar utilizamos este sistema de pretensado, y en los otros cuatro, CCL o Freysinnet.

En el montaje de dovelas hay que realizar con gran cuidado la superficie de trasdós, previamente estudiada con toda exactitud, para que la directriz del dintel llegue a ser después de todas las deformaciones permanentes la que se ha proyectado. Para esto hay que tener en cuenta la evolución de las flechas en un estudio que tenga en cuenta flechas elásticas y por fluencia a lo largo del tiempo y especialmente en la fase de cargas parciales sucesivas del proceso constructivo, debiendo partir de los valores de los módulos de elasticidad y de deformación del hormigón determinados experimentalmente y tener en cuenta el verdadero proceso constructivo que ha de reajustarse en cuanto existe va-

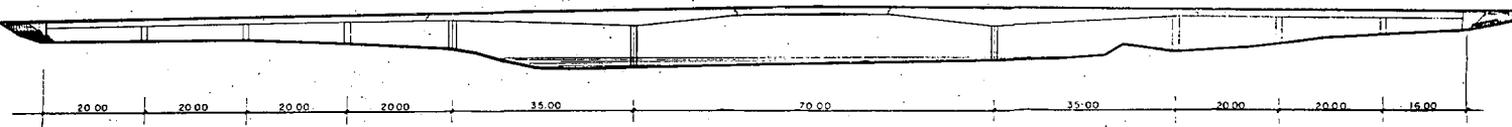
riación por incidencias constructivas. Únicamente con un programa de ordenador electrónico puede cumplirse eficazmente este cometido y se puede acudir a tiempo para tomar en consideración las variaciones que acontezcan durante la construcción. Las comprobaciones en obra deben tenerse cada vez que se coloca una dovela, haciéndose los reajustes de inclinación cada un cierto número, para lo cual conviene tener previstas un cierto número de juntas húmedas donde variando espesores en extremidades superior o inferior corregimos el giro angular necesario para la corrección. Si ésta es pequeña puede también obtenerse en junta seca, aumentando la proporción del aditivo para dar más consistencia inicial al pegamento.

Con este sistema constructivo se puede alcanzar una gran velocidad de colocación, ya que en cada tajo puede llegarse fácilmente a dos dovelas diarias, que se convierten en cuatro si avanzamos por voladizos simétricos. La longitud mínima de dovelas ha sido de 1,50 m., por tanto, tendremos seis metros diarios en voladizos dobles, que da 40 m. aproximadamente por semana. La corrección de juntas disminuye un poco esta velocidad, por lo cual debe pro-

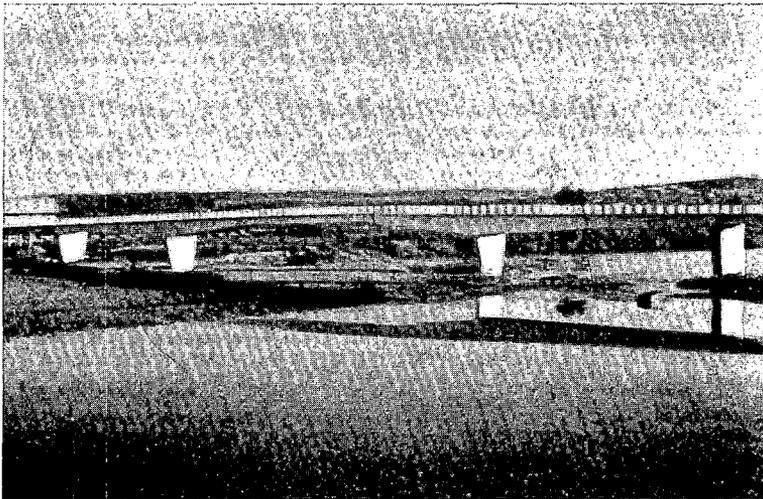
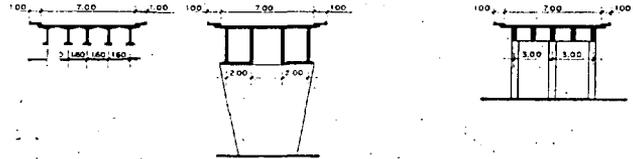
gramarse su ejecución para que se alternen en los diferentes tajos. En los puentes construidos la velocidad no fue factor importante a excepción del puente de Sevilla, donde fue decisiva para terminar la construcción en un plazo muy corto exigido de antemano. El montaje de dovelas, cuyo número era de once en cada voladizo, o sea cuarenta y cuatro en el total del puente, se realizó a razón de dos diarias, durando en total treinta días.

La ventaja más importante del sistema constructivo de avance por voladizos sucesivos, sea mediante carro o por dovelas prefabricadas, es la de trabajar en completa independencia del tráfico inferior, sea vial o hidráulico, y la de reducir a un mínimo la obra auxiliar de andamios y encofrados. Las ventajas particulares de uno u otro de estos sistemas dependen del equipo del constructor y de su experiencia constructiva. En ciertos casos, además el plazo de construcción puede dar preferencia a nuestro sistema. Otra condición favorable reside en que las pérdidas de pretensado y las deformaciones por fluencia son más reducidas, ya que el hormigón no comienza a soportar cargas a una edad tan prematura como en el caso de construcción mediante carro.

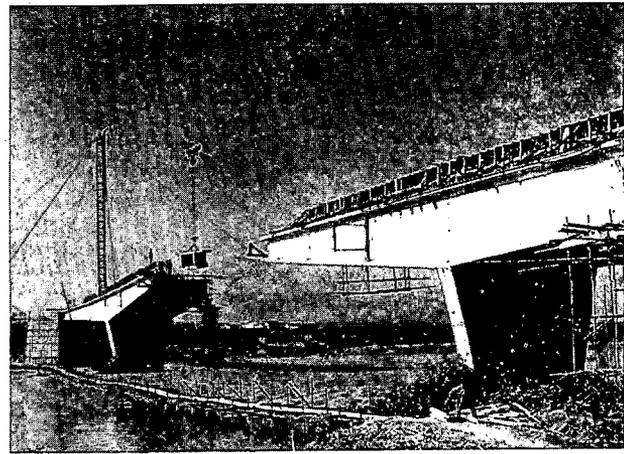
PUENTE DE ALMODOVAR SOBRE EL GUADALQUIVIR, 1960-64



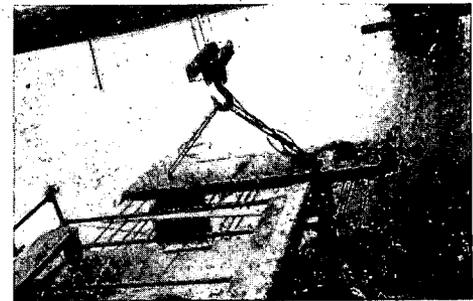
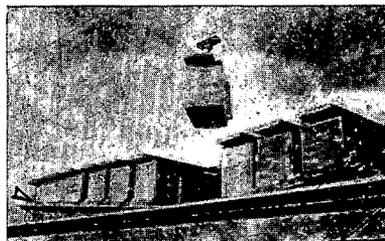
PLANOS GENERALES



Vista del puente terminado.

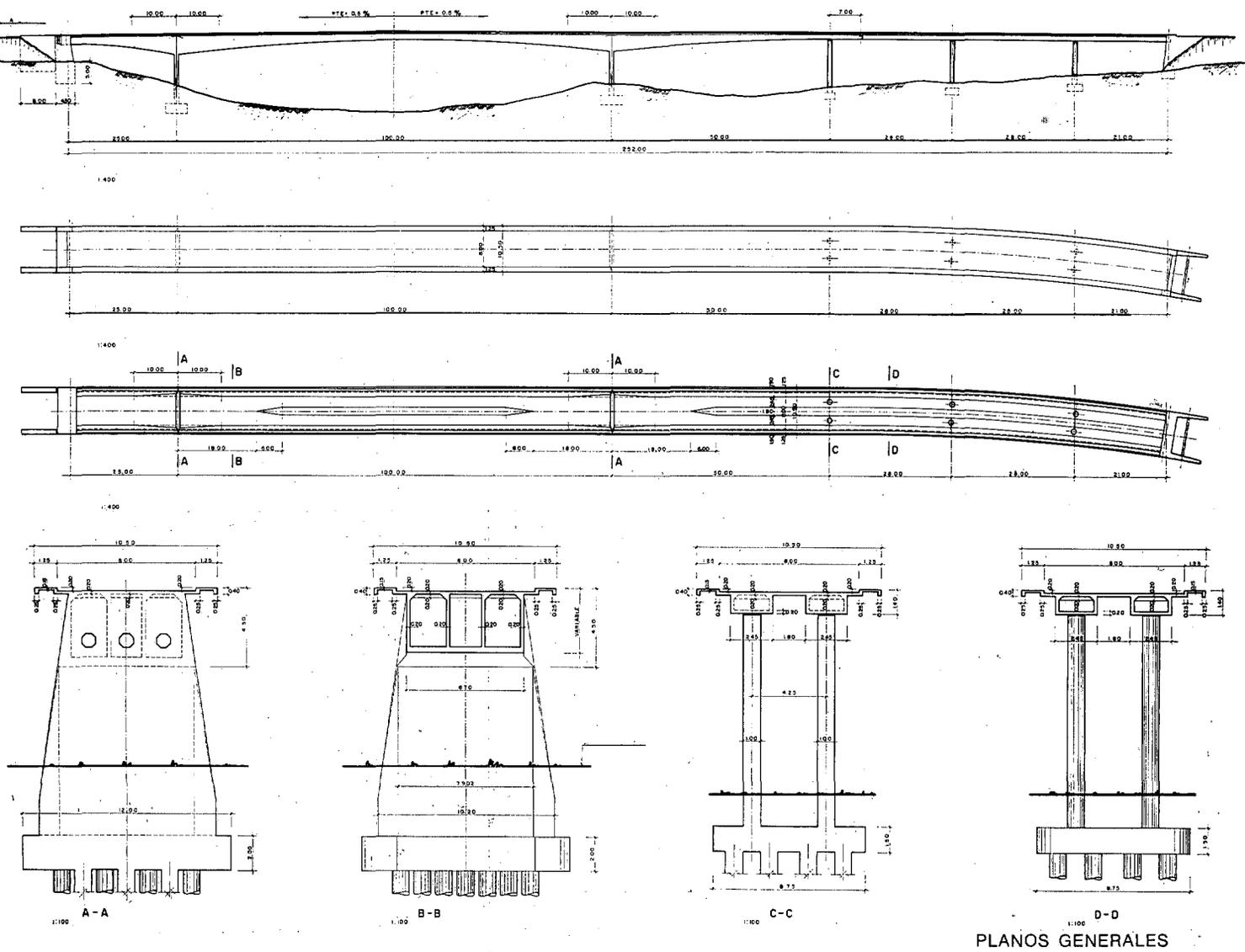


Vista de la obra en marcha.



Fabricación y colocación de las dovelas.

PUENTE DE CASTEJON SOBRE EL EBRO, EN NAVARRA (I), 1964-67

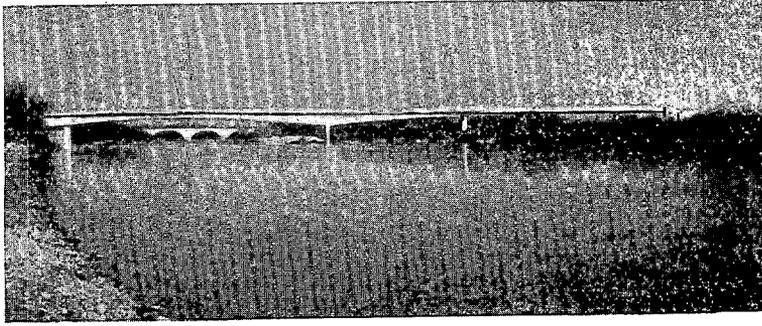


PLANOS GENERALES

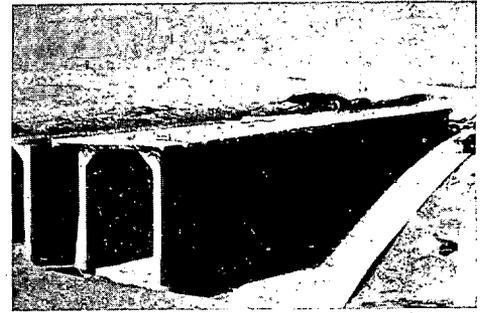


Vista aérea del puente terminado.

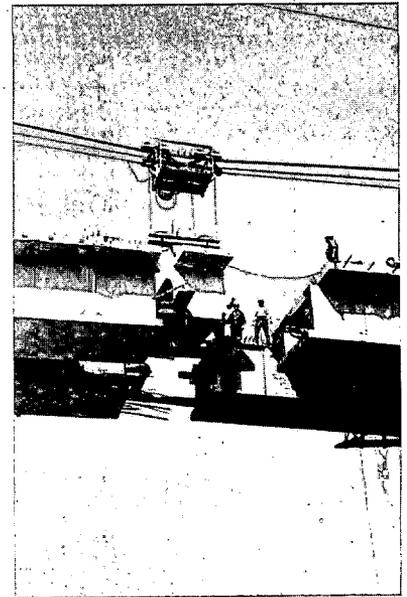
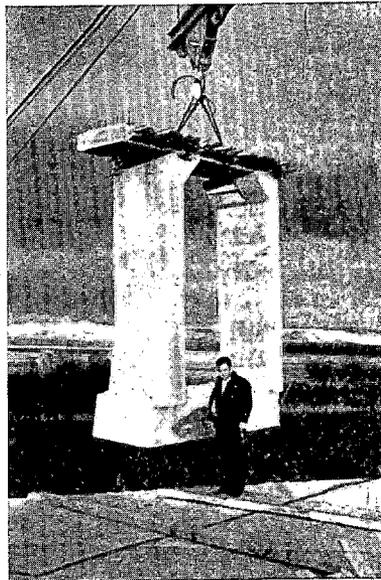
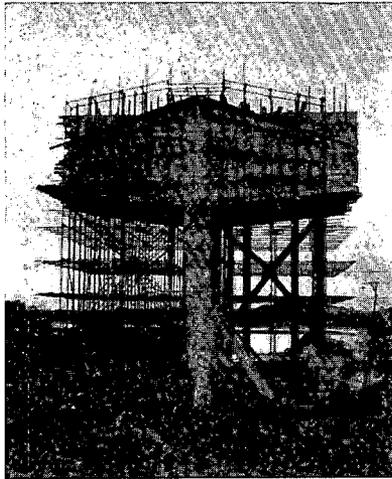
PUENTE DE CASTEJON SOBRE EL EBRO, EN NAVARRA (II)



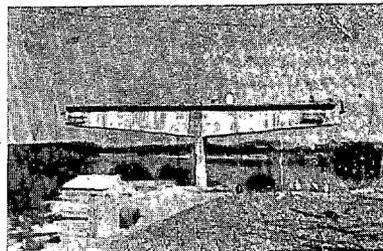
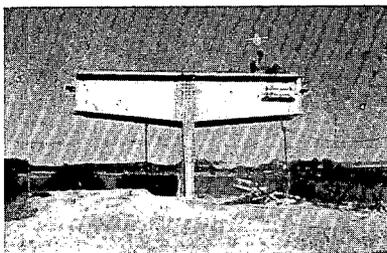
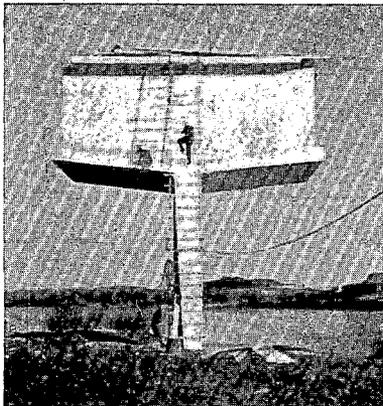
Vista del puente terminado.



Taller de prefabricación de las dovelas.

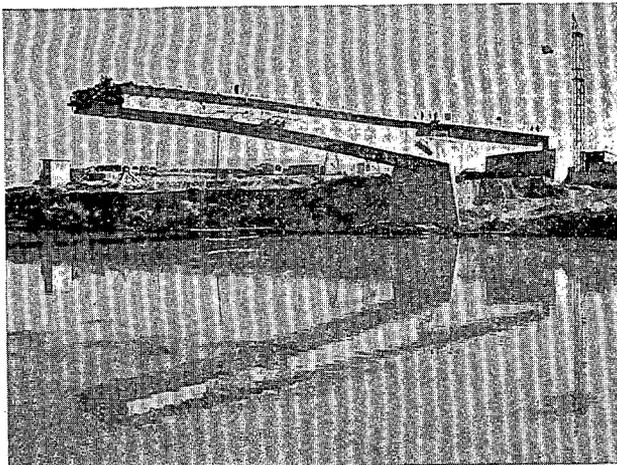


Colocación de las dovelas primera y última.

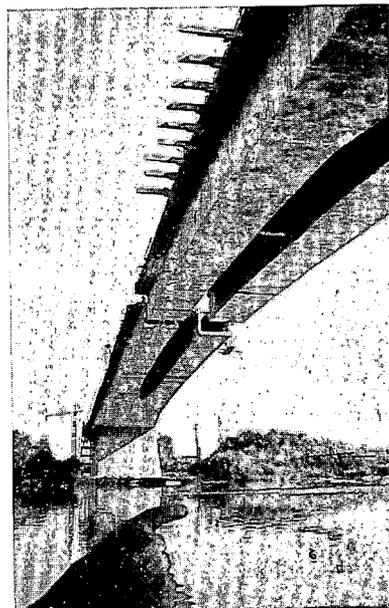


Avance de los voladizos simétricos desde la pilastra central.

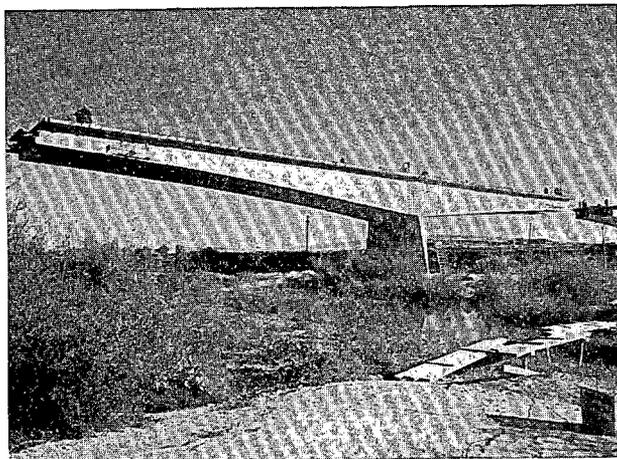
PUENTE DE CASTEJON SOBRE EL EBRO, EN NAVARRA (III)



Vista del voladizo asimétrico.

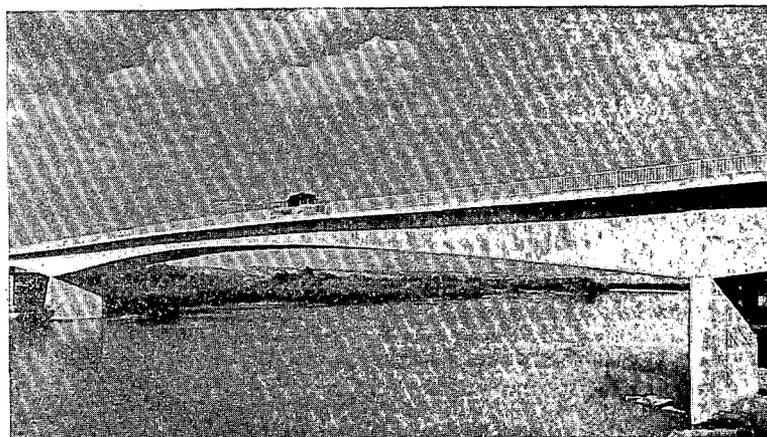


Vista por debajo del tramo central.

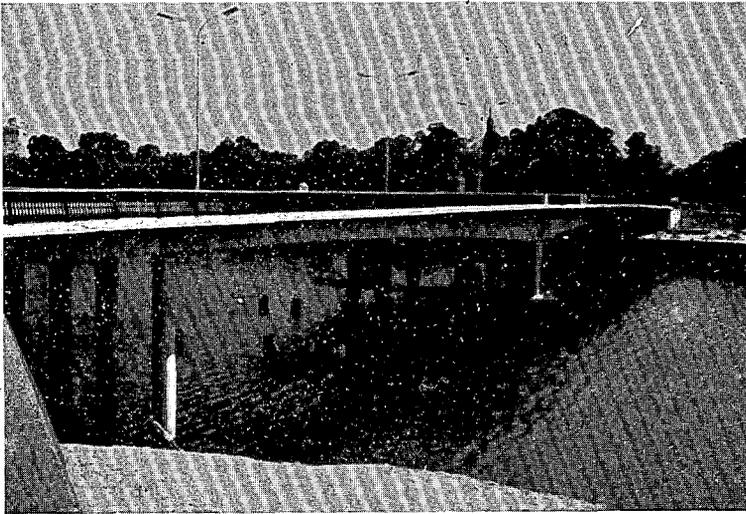


Vista de los voladizos simétricos.

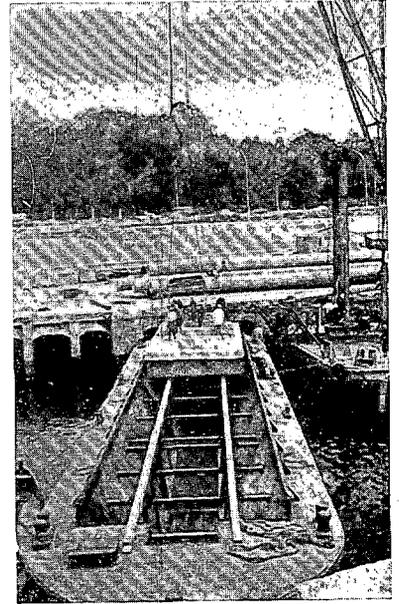
Vista del tramo central.



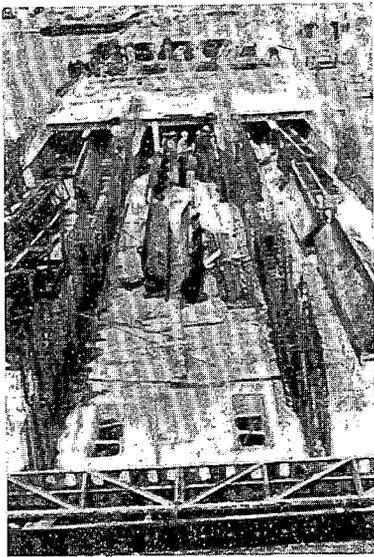
PUENTE DE SEVILLA SOBRE EL GUADALQUIVIR (II)



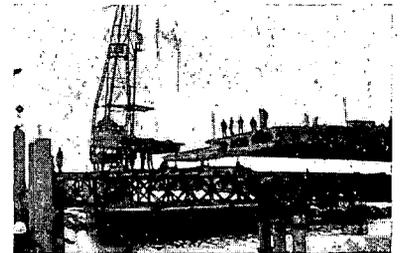
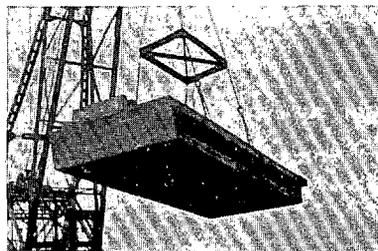
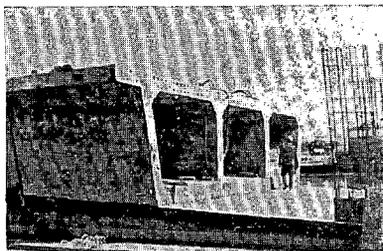
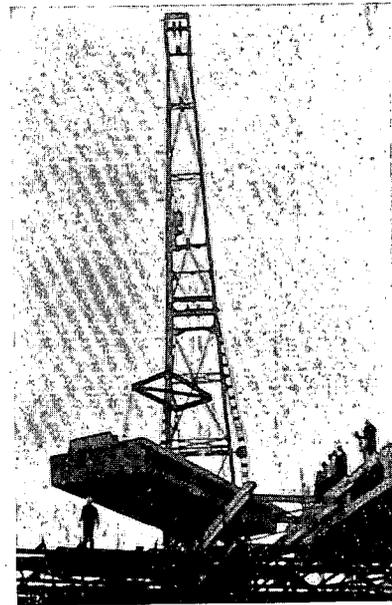
Vista del puente terminado.



Una dovela en la chalana de transporte.



Taller de fabricación de las dovelas.



Fases sucesivas de la colocación de una dovela.

PUENTE DE LOS VADOS SÓBRE EL GENIL, EN GRANADA (EN CONSTRUCCIÓN)

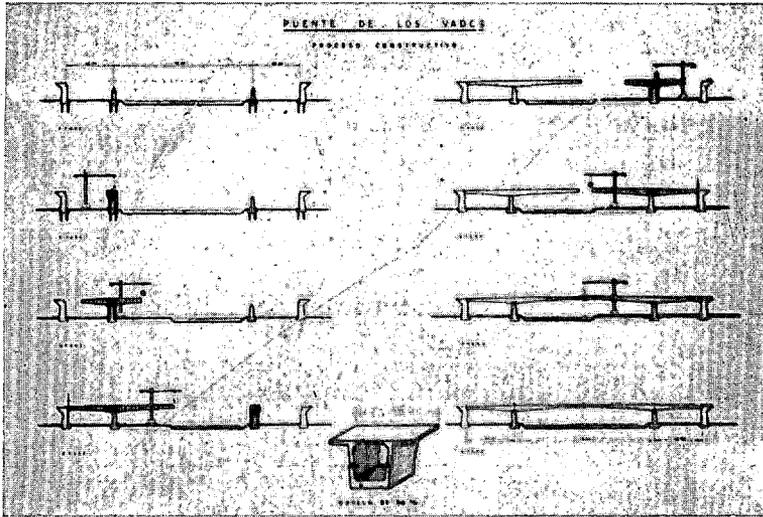
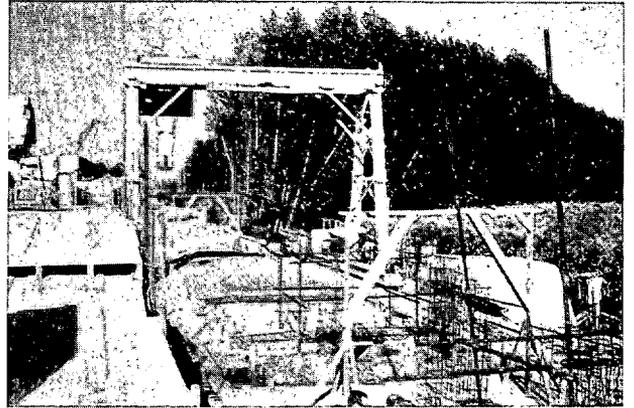
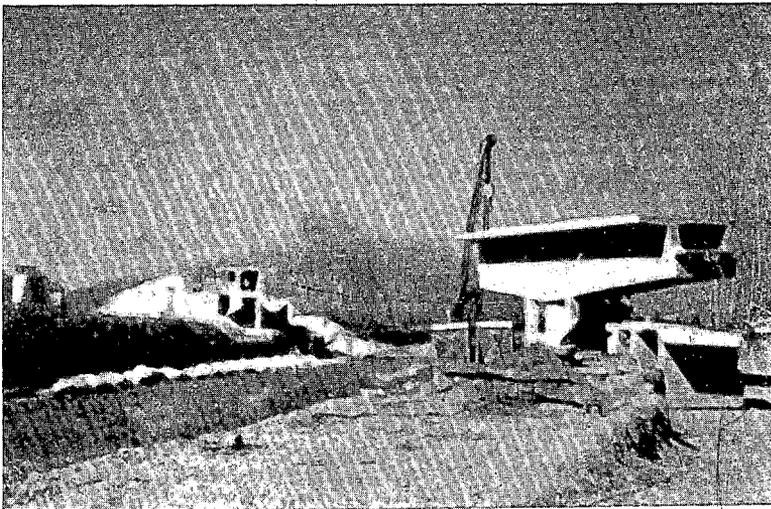


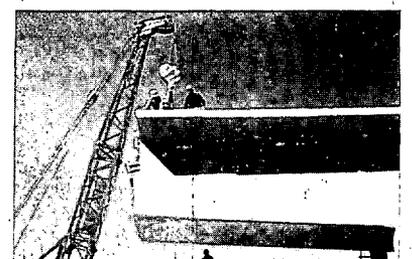
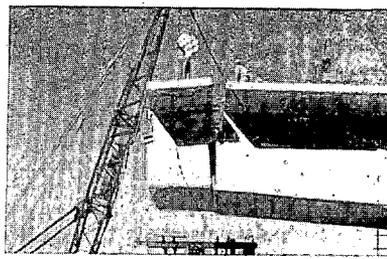
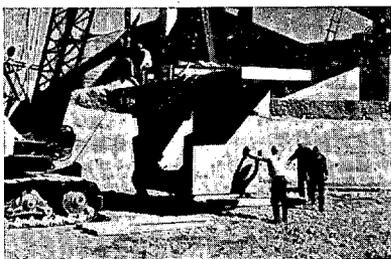
Diagrama de proceso de montaje.



Taller de prefabricación de las dovelas.

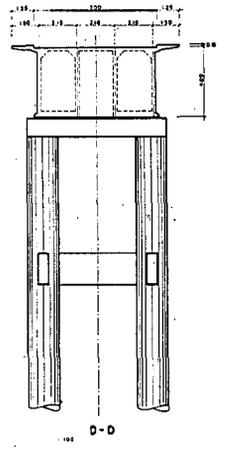
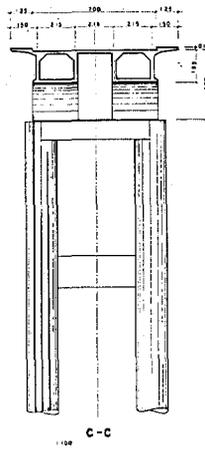
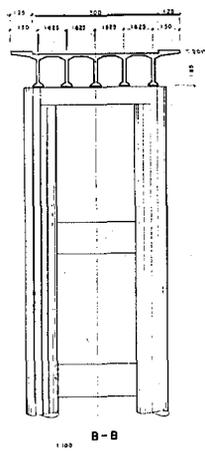
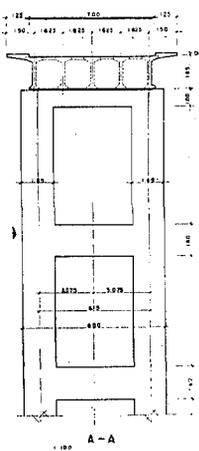
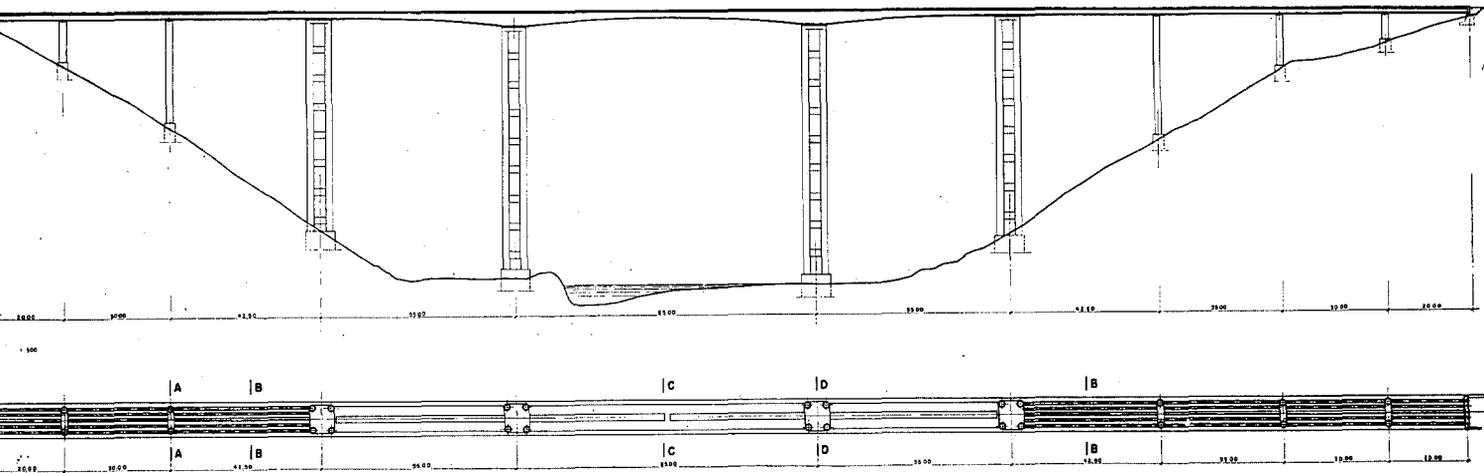


Situación de la obra en abril de 1970.

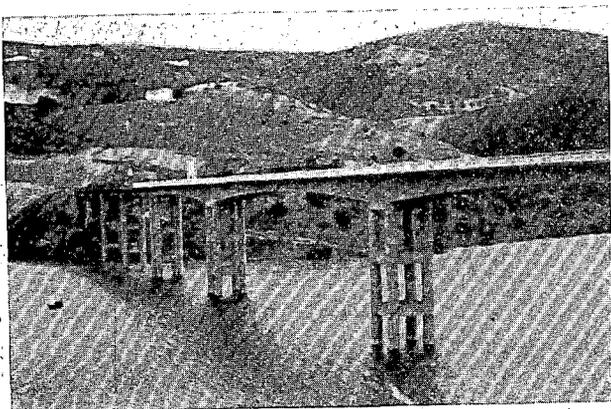


Operaciones diversas para la colocación de una dovela.

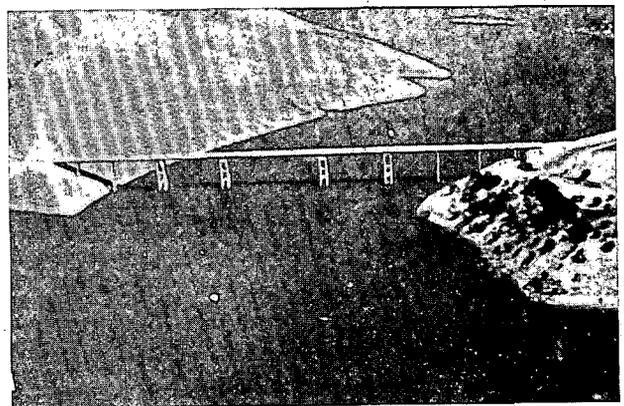
PUENTE DE IZNAJAR SOBRE EL GENIL (I), 1966-69



PLANOS GENERALES

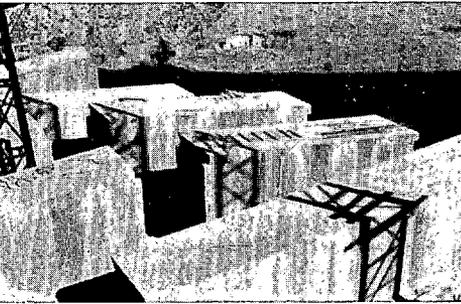
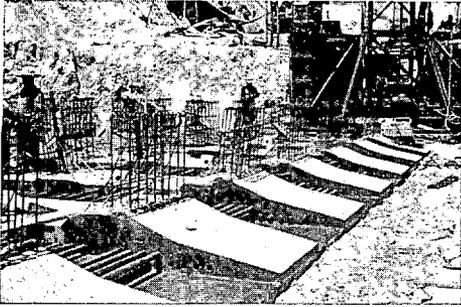


Vista del puente terminado.

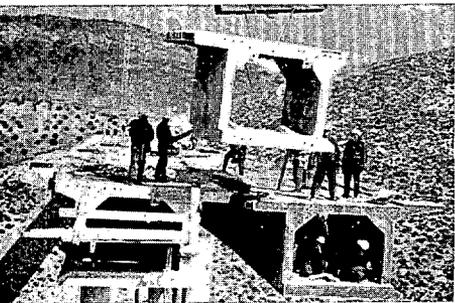
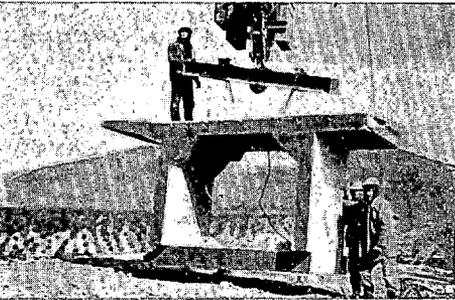


Vista aérea del puente.

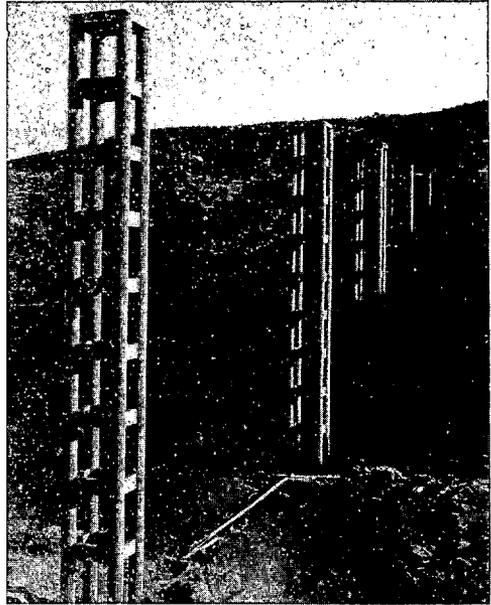
PUENTE DE IZNAJAR SOBRE EL GENIL (II)



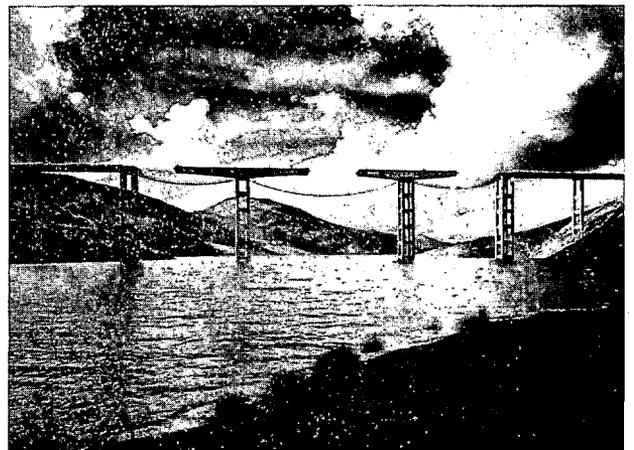
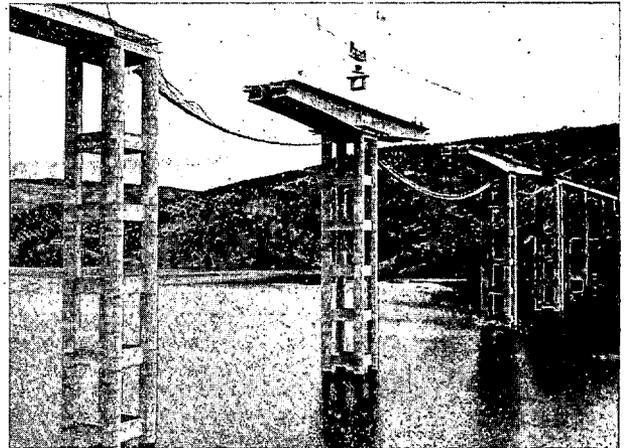
Taller de prefabricación.



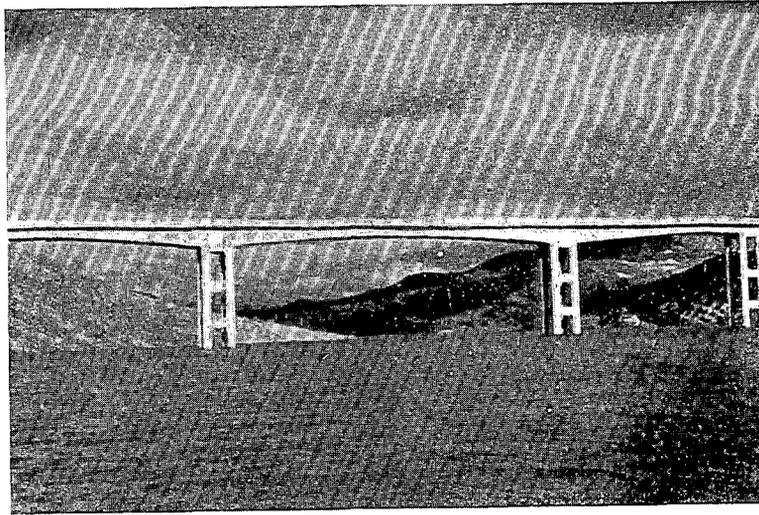
Colocación de una dovela.



Vista parcial de las pilastras.



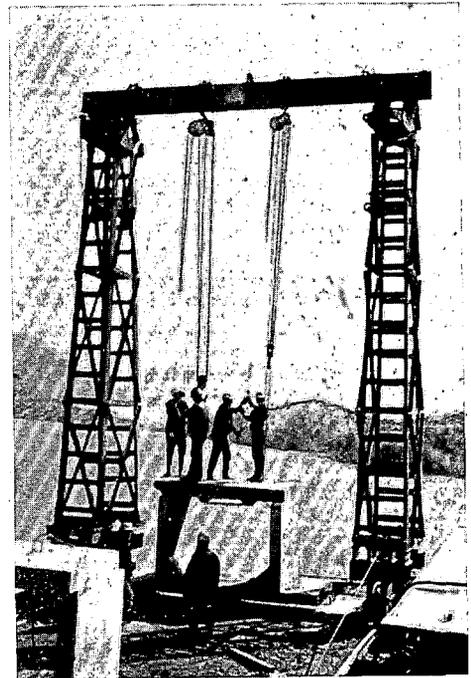
PUENTE DE IZNAJAR SOBRE EL GENIL (III)



Vista parcial del puente terminado.



Dovelas fabricadas en los tramos de acceso.



Maniobra de inversión de una dovela.



Vista aérea del puente terminado.