Viaducto de San Bartomeu, perteneciente al eje transversal Lleida-Girona

Sant Bartomeu Viaduct, on the new road Lleida-Girona

José Antonio Llombart
Ingeniero de Caminos

♦

Jordi Revoltós
Ingeniero de Caminos

Estudio de Ingeniería y Proyectos. EIPSA. Madrid

RESUMEN

El presente artículo describe las principales características y sistema constructivo del Viaducto de Sant Bartomeu, situado en las proximidades de Vic (Barcelona).

El viaducto tiene un tablero continuo de siete vanos, de hormigón postesado. La nueva carretera cruza un valle caracterizado por el espeso arbolado y por la belleza natural del paisaje circundante. La construcción del tablero del viaducto, que discurre en curva, a una altura máxima de 48 m sobre el terreno natural, ha precisado el desarrollo de una solución constructiva, mediante empuje, especialmente proyectada para facilitar la ejecución y lograr, al mismo tiempo, una mínima afección al medio ambiente.

SUMMARY

The present article describes the main features and constructive system of the Sant Bartomeu Viaduct on a new road, Lleida-Girona, near Vic (Barcelona).

Viaduct of Saint Bartomeu is a pres-tressed concrete seven-span bridge. The new road crosses a valley characterised by a dense woodland and by the natural beauty of the surrounding landscape. The piers of the viaduct vary in height up to 48 meters. The construction, by incremental launching method of deck, has been developed in order to cause minimum afection to the environment.

1. INTRODUCCIÓN

El viaducto de Sant Bartomeu, situado en las proximidades de Vic (Barcelona), pertenece al nuevo tramo de carretera denominado Eix Transversal Lleida-Girona, que ha sido inaugurado en diciembre de 1997 (Figura 1).

La nueva carretera cruza un valle caracterizado por el espeso arbolado y por la belleza natural del paisaje circundante (Figura 2). La construcción del tablero natural, que discurre en curva, a una altura máxima de 48 m sobre el terreno natural, ha precisado el desarrollo de una solución especialmente proyectada para facilitar la ejecución y lograr, al mismo tiempo, una mínima afección al medio ambiente.

2. CARACTERÍSTICAS GENERALES

El tablero del viaducto, continuo en toda su longitud, ha sido construido por el método del empuje (Figura 3). He aquí las características geométricas fundamentales:

- Longitud total: 337,00 m
- Ancho del tablero: 13,10 m
- Canto del tablero (constante): 2,80 m
- Número de vanos: 7
- Sucesión de luces: 43.50 - 5 x x 50,70 - 40.00 m
- Curvo, en planta. (Radio constante de 650 metros en casi toda la longitud, con un tramo en clotoide en un desarrollo de 40,80 metros.

El proceso constructivo del tablero, empujado desde una ladera, ha resultado ser idóneo para resolver el paso de la nueva carretera sobre el valle de Sant Bartomeu.

En comparación con el método clásico de construcción mediante cimbra, todo sistema de ejecución del tablero

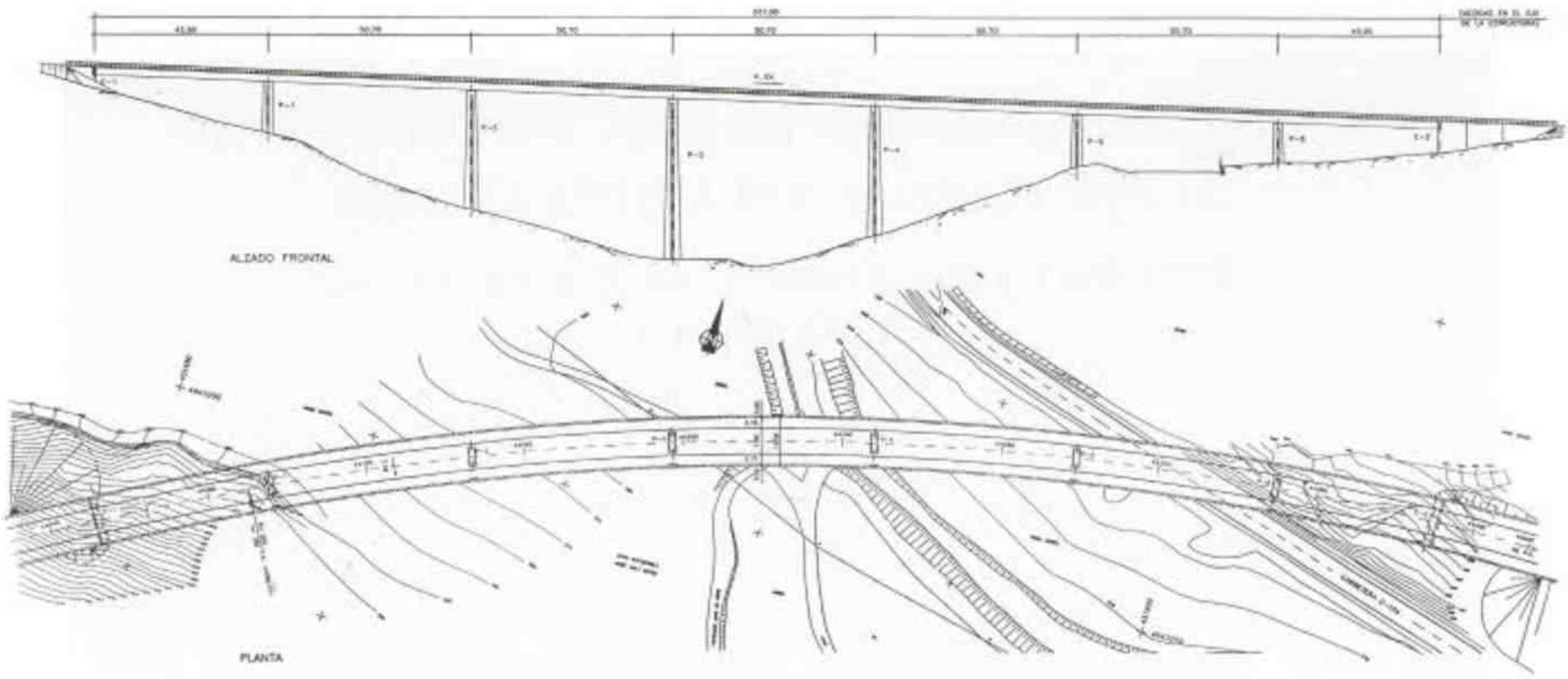

Figura 1. Viaducto de Sant Bartomeu. Alzado y planta general.

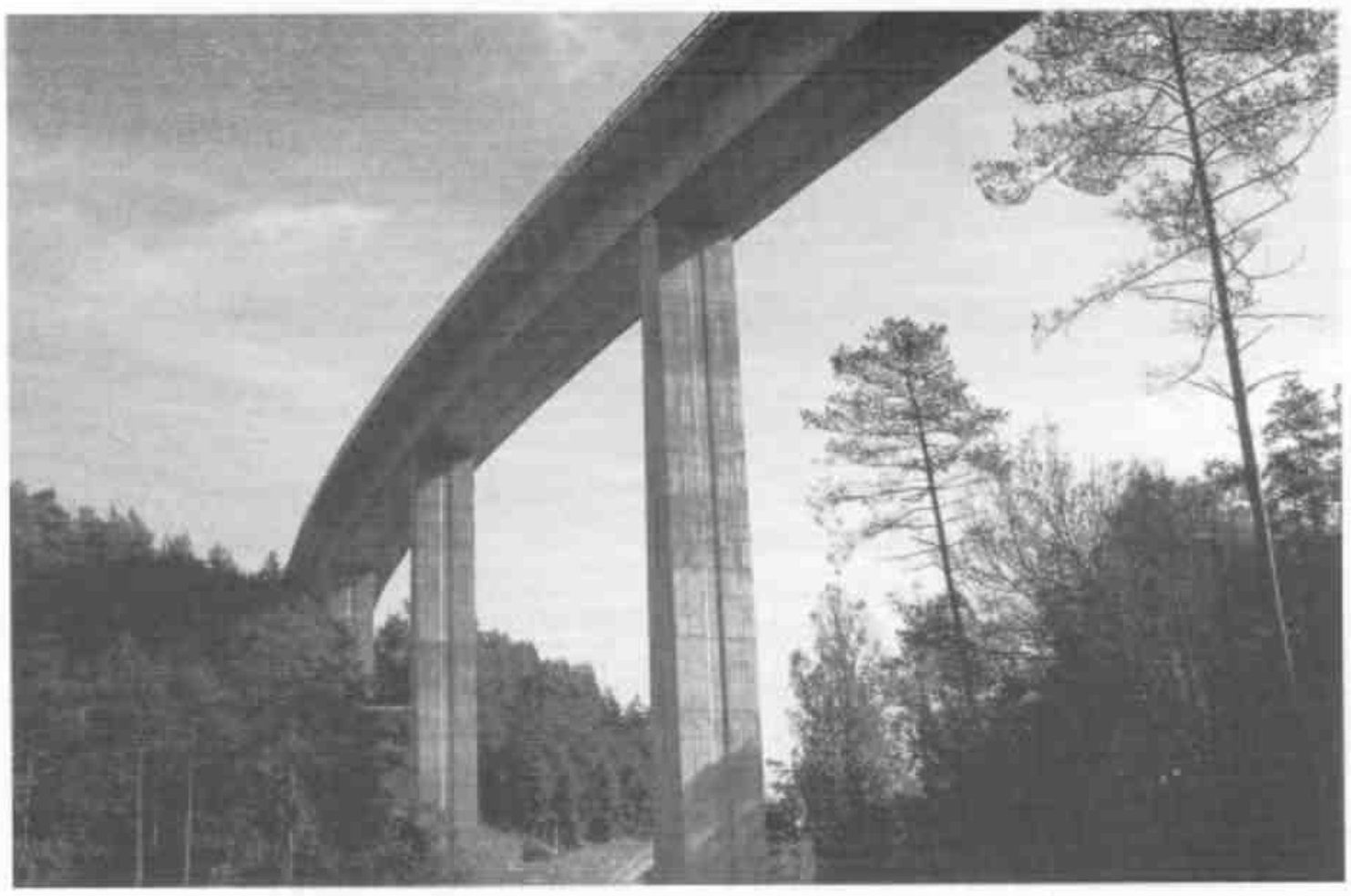

Figura 2. Viaducto de Sant Bartomeu. Vista general.

Figura 3. Viaducto en construcción. Empuje de tablero.

por empuje precisa la consideración del costo correspondiente al montaje de unas instalaciones fijas a situar en el terraplén de acceso, en las proximidades de uno de los estribos, más el empleo de una "nariz" metálica de lanzamiento y la adición de una pequeña cantidad suplementaria de acero activo a disponer en el tablero. Para el caso del Viaducto de Sant Bartomeu, las conclusiones deducidas a partir de un estudio previo al comienzo de la obra indicaron que la solución escogida era ventajosa frente a una construcción del tablero vano a vano, mediante soporte de cimbra apoyada sobre el terreno, dada la altura de las pilas, de 48 m, en el centro del valle. A ello hubo que añadir unas ventajas adicionales. Por una parte, se producía una menor afección al medio ambiente, ya que la solución a disponer no precisaba apoyos provisionales intermedios entre pilas para la construcción del tablero y además, el sistema constructivo ofrecía una mayor garantía de calidad, por el hecho de realizarse todas las fases de hormigonado en tierra firme y en un área especialmente acondicionada, con fácil acceso.

3. SISTEMA DE EMPUJE DEL TABLERO

La geometría del tablero, impuesta por los condicionantes propios del trazo de la carretera, representó una dificultad a resolver durante el proyecto del empuje y el diseño de los elementos auxiliares de la obra.

En la Figura 4 se indican las características geométricas fundamentales de la calzada (curvatura en planta, pendiente longitudinal, y peralte transversal). En uno de los extremos del viaducto, existia una variación de la curvatura en planta, con un tramo en clotoide de 40,80 m de longitud. Para poder realizar el empuje en condiciones adecuadas, se dispuso la directriz geométrica de la parte inferior de la viga-cajón del tablero, coincidiendo estrictamente con una hélice cilíndrica de 650 m de radio a lo largo de todo el desarrollo del tablero. La diferencia existente entre el trazado en planta de la calzada y la directriz de la viga-cajón se compensó, estableciendo una variación gradual en el valor de los voladizos laterales de la losa superior, de tal forma, que la superficie superior del tablero, flanqueada por las barreras de seguridad, situadas en sus extremos, se ajustaba exactamente a los condicionantes derivados del trazado geométrico.

Se utilizó un sistema de empuje formado por gatos de fricción (Figura 5) y una retenida frente al desplazamiento longitudinal, constituida por placa de frenado, consistente en un simple apoyo vertical del tablero, montado inmediatamente detrás del soporte de los gatos de empuje, sobre una plataforma metálica provista de una superficie especialmente tratada para conseguir un alto coeficiente de rozamiento.

El proceso de empuje se realizó en sentido ascendente. A pesar de la existencia de la pendiente longitudinal (4,2%) superior al coeficiente de rozamiento de los apoyos de deslizamiento (4% al iniciarse el arranque del empuje y 2% durante el movimiento longitudinal), no se precisó el empleo de sistemas adicionales de retenida a lo largo de la práctica totalidad del empuje del tablero, debido a la eficacia de la placa de frenado.

Durante la última etapa de construcción del tablero, la reacción de apoyo vertical sobre el estribo es mucho menor que en todo el proceso anterior, por lo que el sistema de empuje por fricción pierde su efectividad, así como el propio frenado. Para llevar a cabo el empuje correspondiente a la última dovela se utilizó un mecanismo complementario de tracción formado por dos tendones de pretensado, accionados por gatos, montados en la parte trasera del tablero, ya hormigonado (Figura 6). Dicho sistema, al mismo tiempo, actuó como elemento de retenida, impidiendo el retroceso del tablero en sentido longitudinal. En la Figura 7 se aprecia el sistema de anclaje de uno de dichos tendones en el estribo, situado debajo del tablero.

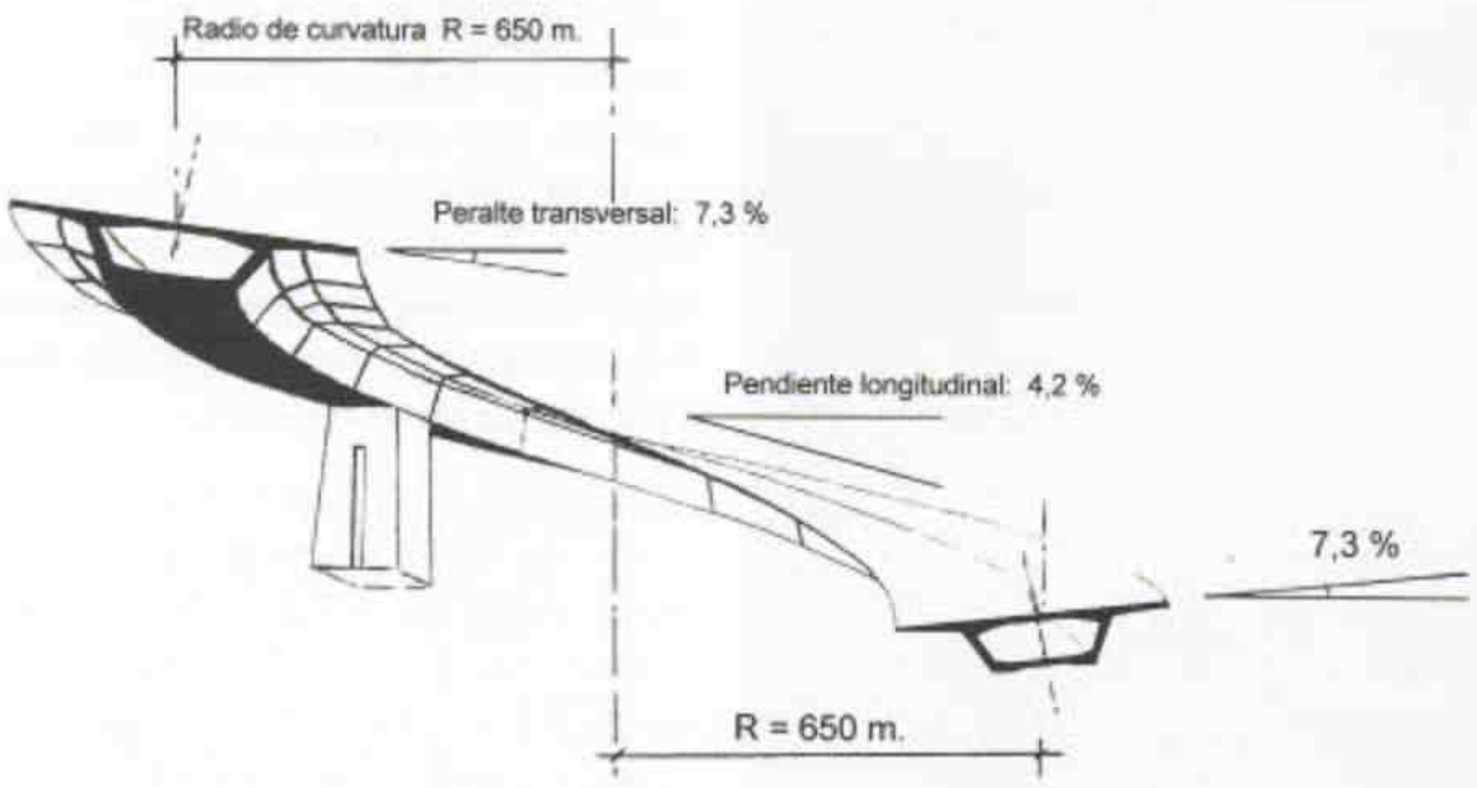

Figura 4. Tablero. Características geométricas.

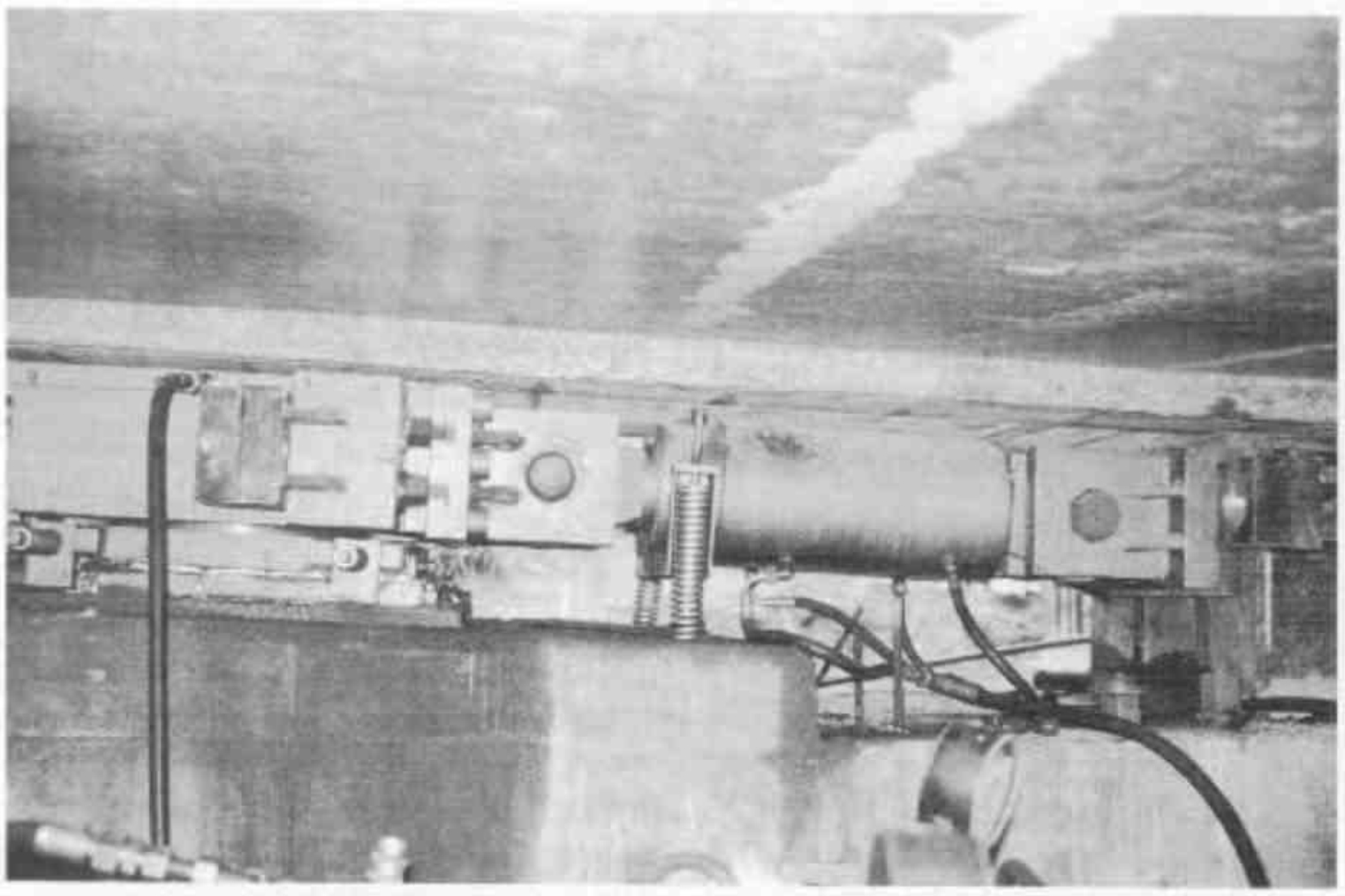

Figura 5. Gato de fricción, en la parte inferior del tablero.

Se dispusieron unos elementos metálicos adicionales de guiado lateral, tanto en pilas como en estribos, así como en la zona comprendida entre la plataforma de hormigonado y el estribo más cercano. La determinación de las fuerzas de reacción del guiado utilizadas para el dimensionamiento de los elementos de coacción lateral, y los consecuentes desplazamientos de las pilas en dirección transversal, se realizó mediante un cálculo en el que se asimiló el conjunto del viaducto a una estructura espacial. Se representó la geometría real del tablero y altura de pilas, teniendo en cuenta las fuerzas longitudinales producidas por la fricción de los apoyos del tablero sobre las pilas, estimadas de acuerdo con las previsiones relativas a los coeficientes de rozamiento.

El cálculo mostró una marcada diferencia existente entre la intensidad de dichas fuerzas para cada una de las pilas. A título de ejemplo, se muestran las fuerzas transversales del guiado, calculadas para una de la fases de empuje:

Estribo	E - 1	57 kN
Pila	P - 1	170 kN
Pila	P - 2	108 kN
Pila	P - 3	112 kN
Pila	P - 4	139 kN
Pila	P - 5	462 kN
Pila	P - 6	285 kN

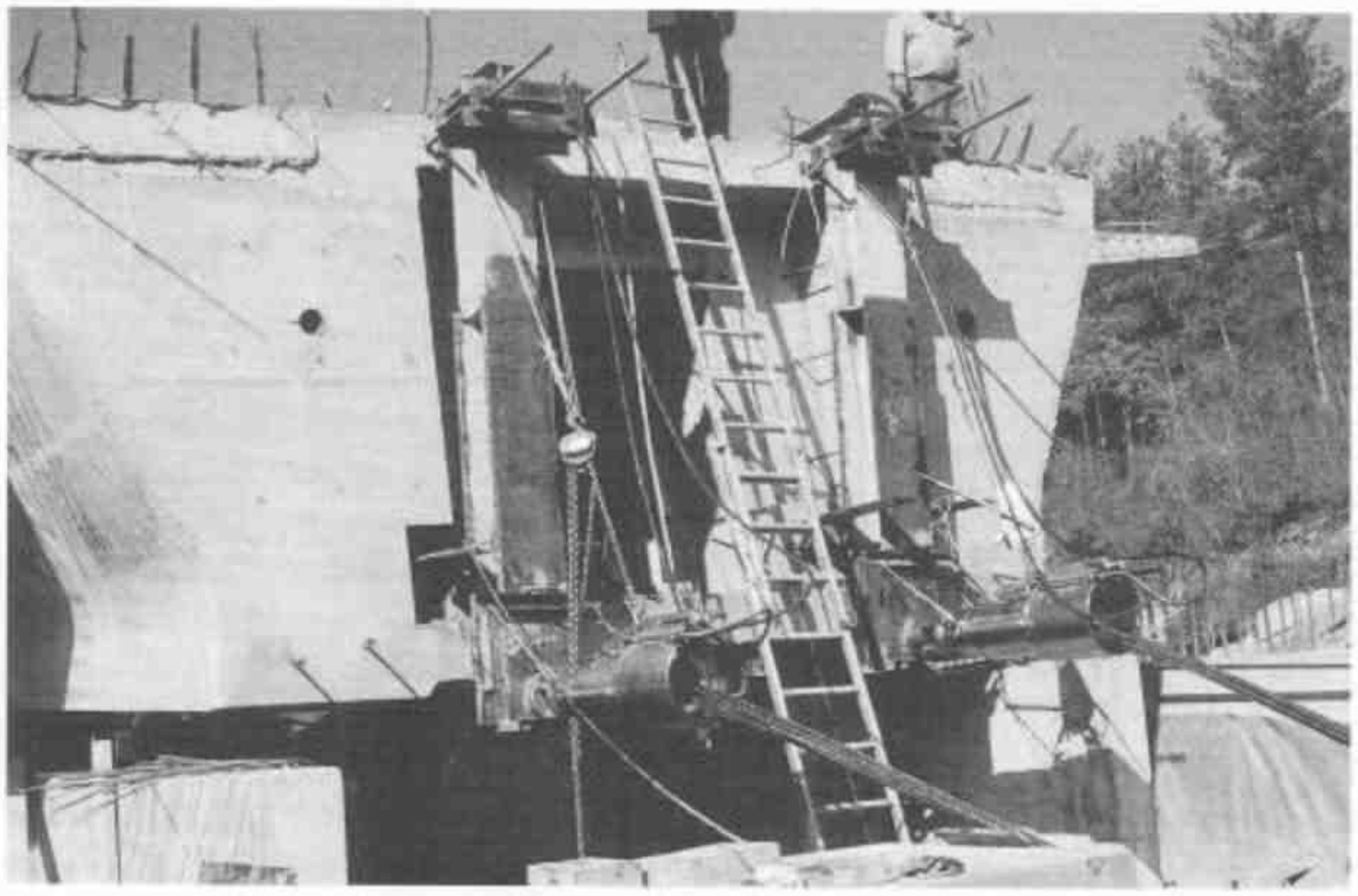

Figura 6. Mecanismo de retenida y empuje de tablero en la última fase, mediante tendones de pretensado.

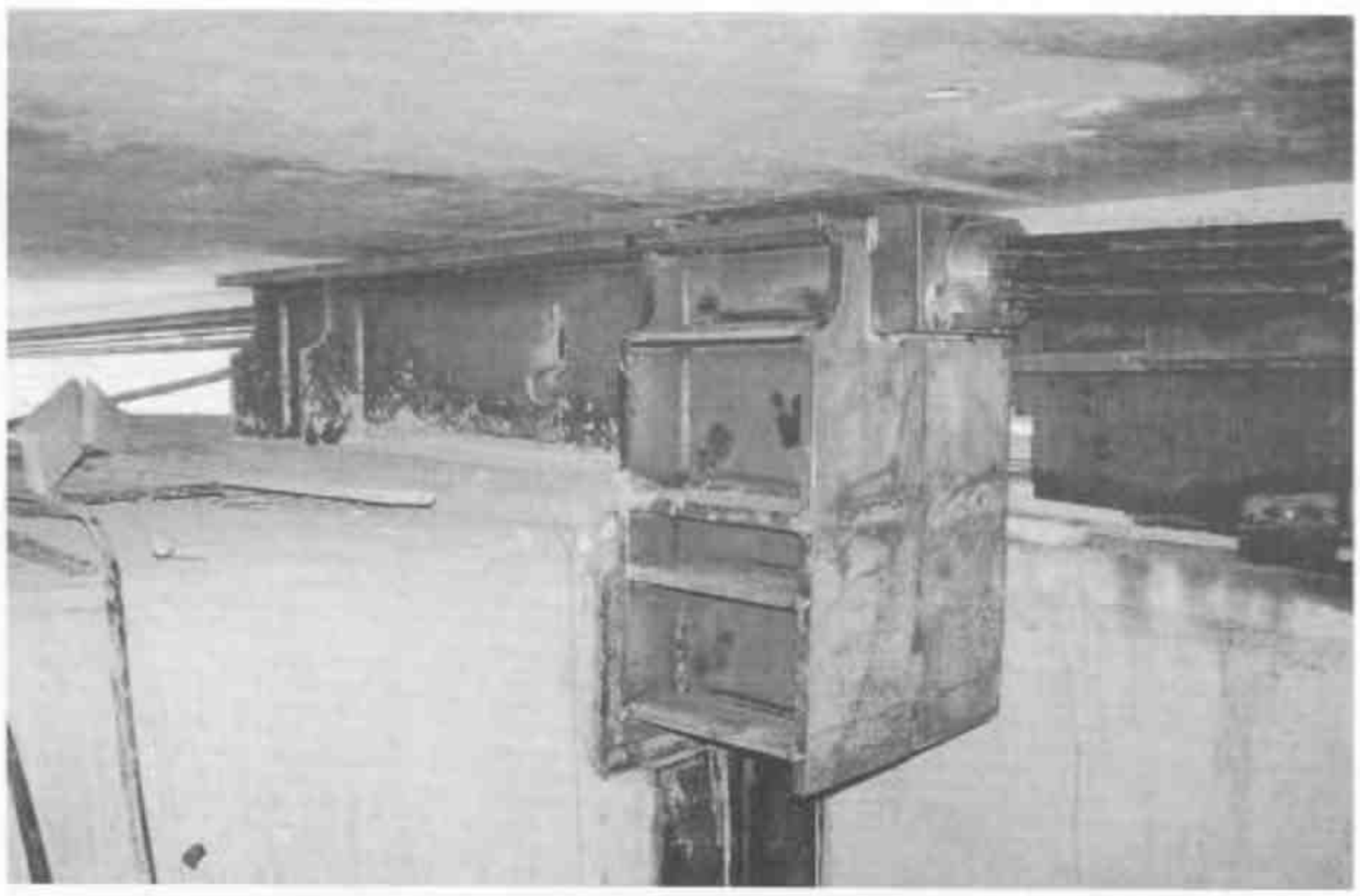

Figura 7. Sistema de anclaje de tendones de retenida, montado en el estribo.

Figura 8. Parque de construcción del tablero, antes del montaje de los encofrados.

Los valores de los desplazamientos correspondientes a la cota de coronación de las pilas, deducidos del cálculo teórico, se correspondieron con los registrados en la realidad, según los resultados de las mediciones sistemáticas, realizadas durante el proceso de ejecución.

El hormigonado del tablero se realizó en un área situada en las proximidades del estribo de empuje, constituyéndose dovelas de 16,90 m de longitud, equivalente a 1/3 de la magnitud de los vanos de mayor luz. En el parque de hormigonado se construyeron dos muretes de hormigón, dispuestos longitudinalmente según una curva en planta, trazada en prolongación de la directriz del tablero y a distinta altura entre sí, de acuerdo con el peralte transversal (Figura 8).

En la cara superior de los muretes se montaron unos carriles destinados a permitir el deslizamiento de cada dovela, una vez construida. En el espacio intermedio, comprendido entre ambos muretes se situó una plataforma móvil que sirvió de soporte del encofrado de fondo de la losa inferior del tablero. En los dos lados exteriores de montaron los encofrados metálicos correspondientes a la parte exterior de la viga-cajón (hastiales y voladizos laterales).

El hormigonado de cada dovela se realizó en dos fases, si bien el empuje no se iniciaba hasta que se había completado la sección entera y se había efectuado el tesado del conjunto. En la primera fase de hormigonado se alcanzaba la coronación de los hastiales, desmontándose a continuación el encofrado interior que era extraído mediante una grúa. A continuación se iniciaba el posicionado del encofrado de la losa superior, colocación de armaduras, para culminar el hormigonado al día siguiente.

El proceso de empuje de tablero se realizó normalmente, de acuerdo con las previsiones iniciales, a un ritmo de una dovela por semana, sin la existencia de incidencias a mencionar.

4. NARIZ DE LANZAMIENTO

La nariz de lanzamiento estaba formada por dos vigas metálicas de alma llena, enlazadas por una serie de arriostramientos en celosía (Figura 9). Dada la curvatura del tablero, con un radio de 650 m, cada una de las vigas metálicas

se adaptó a la geometría impuesta por el trazado, mediante una forma poligonal, dividiéndose la longitud total (30,75 m) en tres segmentos (Figura 10).

La unión de las vigas metálicas al tablero se hizo mediante un conjunto de barras pretensadas. Con el objeto de proporcionar la máxima eficacia al pretensado, en el centro de la sección de contacto se dispuso una separación entre el acero estructural y el hormigón, constituida por una capa de poliestireno expandido, a fin de que las tensiones de compresión se produjesen únicamente en las zonas adecuadas donde estaban alojadas las barras pretensadas de unión.

Mediante el pretensado introducido se alcanzó el adecuado grado de seguridad frente al cortante vertical producido en la sección de contacto, sin embargo se estimó oportuno disponer un resalto metálico que penetraba en el interior del tablero de hormigón, destinado a proporcionar una seguridad adicional.

El cordón inferior de las vigas metálicas ejerce las funciones de patín de deslizamiento durante las fases de empuje. En su parte superior se dispuso una serie de rigidizadores, a fin de disminuir los esfuerzos de flexión local producidos como consecuencia de las fuerzas de reacción vertical transmitidas por los apoyos. Con todo ello, el estado tensional de la estructura metálica que constituye la nariz de lanzamiento, considerada en su globalidad, era moderado durante el proceso de empuje, ya que los criterios utilizados para dimensionamiento respondían fundamentalmente a una exigencias de rigidez y su consideración conjunta con la verificación de la viga-cajón de hormigón del tablero. La capacidad resistente de la nariz de lanzamiento era, por tanto, superior a la que se precisaba, desde un punto de vista resistente.

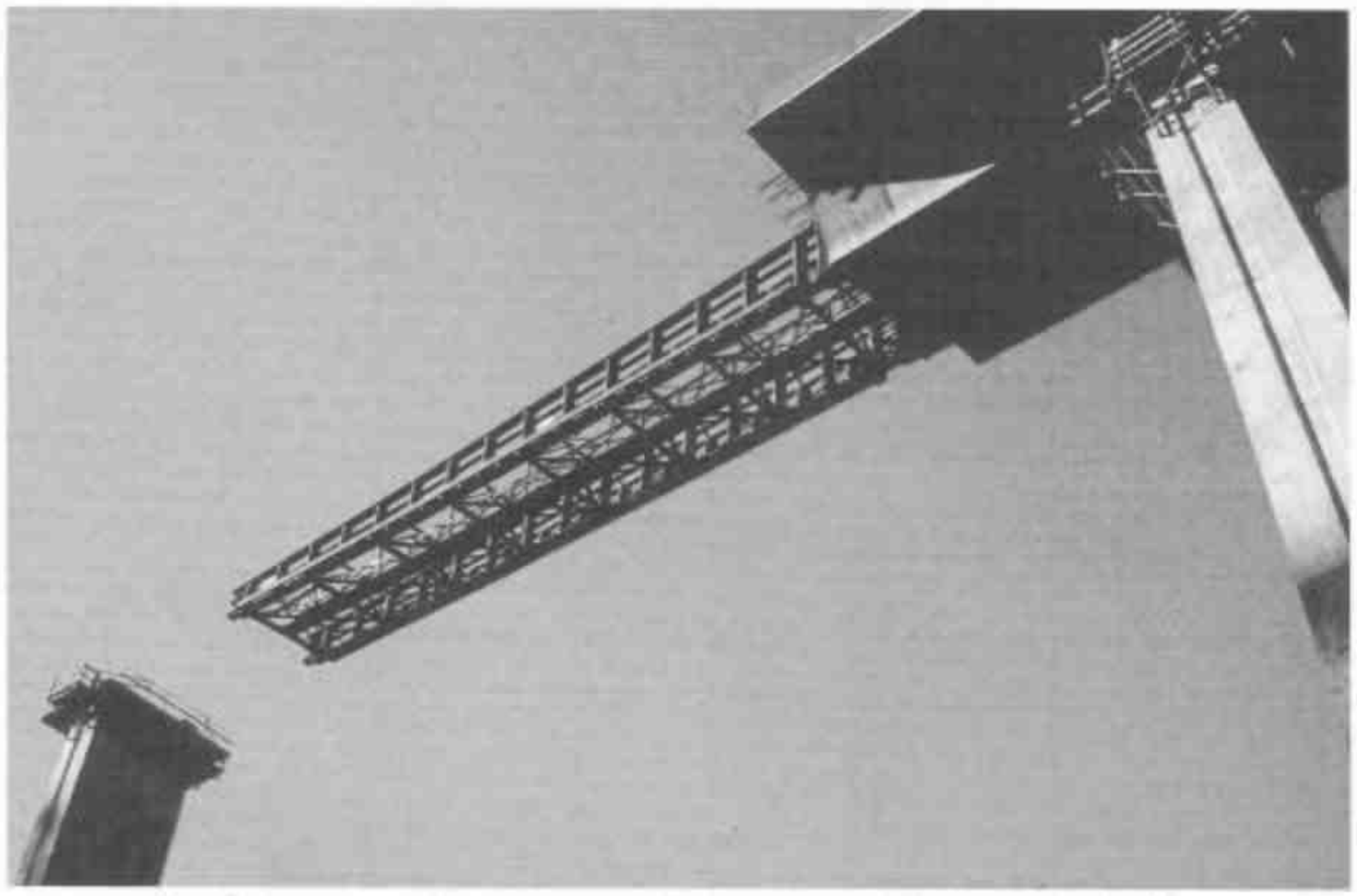

Figura 9. Nariz metálica de lanzamiento, en proceso de empuje del tablero.

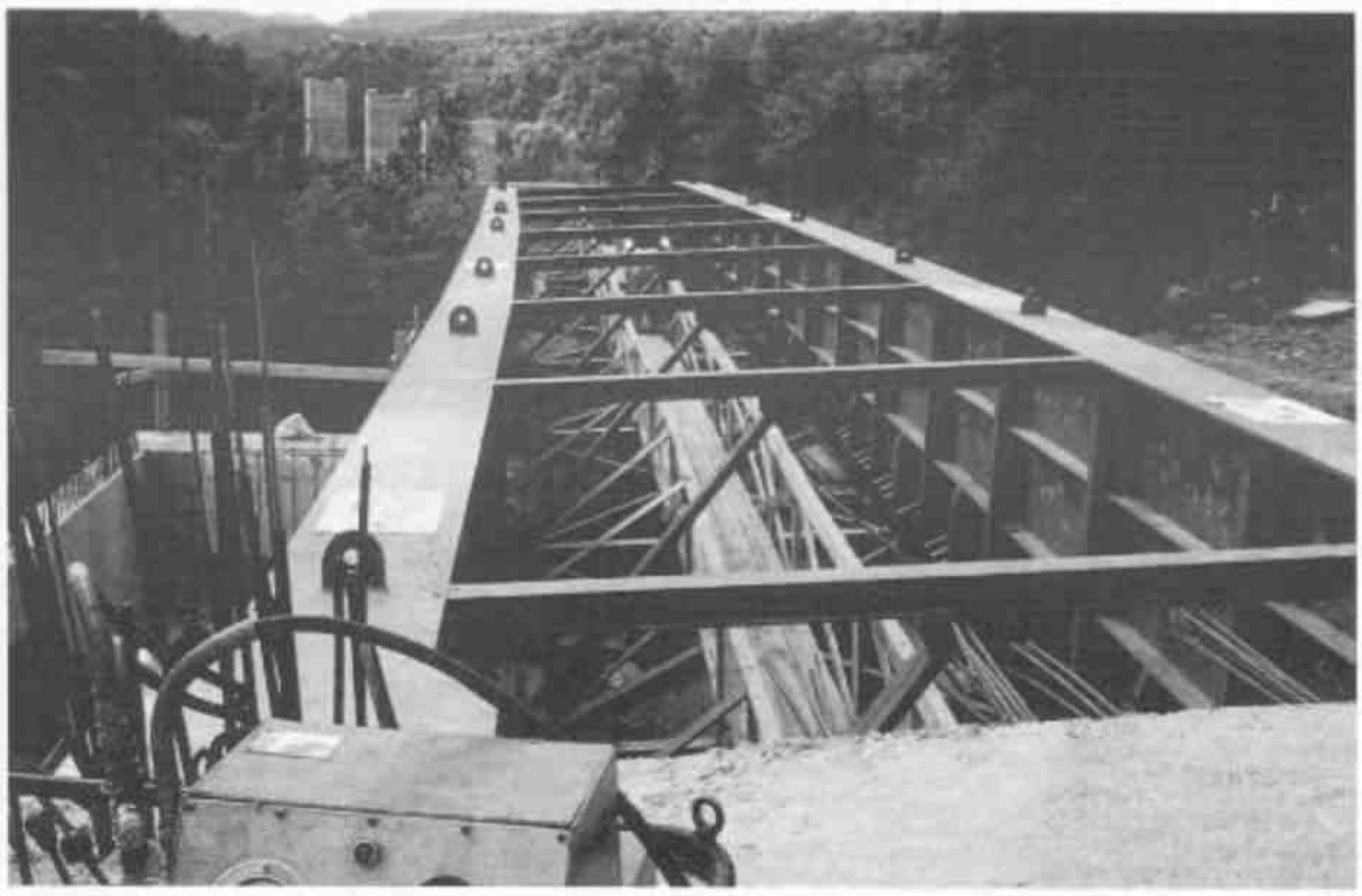

Figura 10. Nariz metálica de lanzamiento.
(Se aprecia la forma adaptada a la curvatura del tablero).

5. TABLERO. FORMAS

El tablero está constituido por una viga-cajón de hormigón, de 13,50 m de anchura y 2,80 m de canto total, con almas de 0,40 de espesor constante. El espesor mínimo de las losas correspondientes a la parte superior e inferior, es igual a 0,25 m [Figura 11.A)].

El tablero se diseñó teniendo en cuenta las peculiaridades derivadas del proceso constructivo a desarrollar, para lo cual se dispusieron las formas adecuadas para constituir los patines de deslizamiento, de acuerdo con la posición de los apoyos y con la condición de evitar esfuerzos de flexión local en la parte inferior del tablero durante las fases de empuje.

En el interior de la viga-cajón y coincidiendo con la posición de los apoyos sobre las pilas, se dispusieron unos diafragmas provistos de unas grandes aberturas para paso y con unas dimensiones mínimas para alojar únicamente los desviadores del pretensado exterior y transmitir adecuadamente las fuerzas resultantes [Figura 11, B)]. La construcción del tablero mediante empuje implica la conveniencia de diseñar los diafragmas teniendo en cuenta los requisitos derivados del proceso constructivo, ya que en fase de ejecución es necesario facilitar el traslado del encofrado de la losa superior y su paso a través de la abertura del diafragma para proceder nuevamente a su montaje para el hormigonado de sucesivas dovelas.

6. PRETENSADO DEL TABLERO

El pretensado del tablero se descompone en dos familias distintas, una interior, constituida por tendones de trazado recto, para las fases de empuje y otra

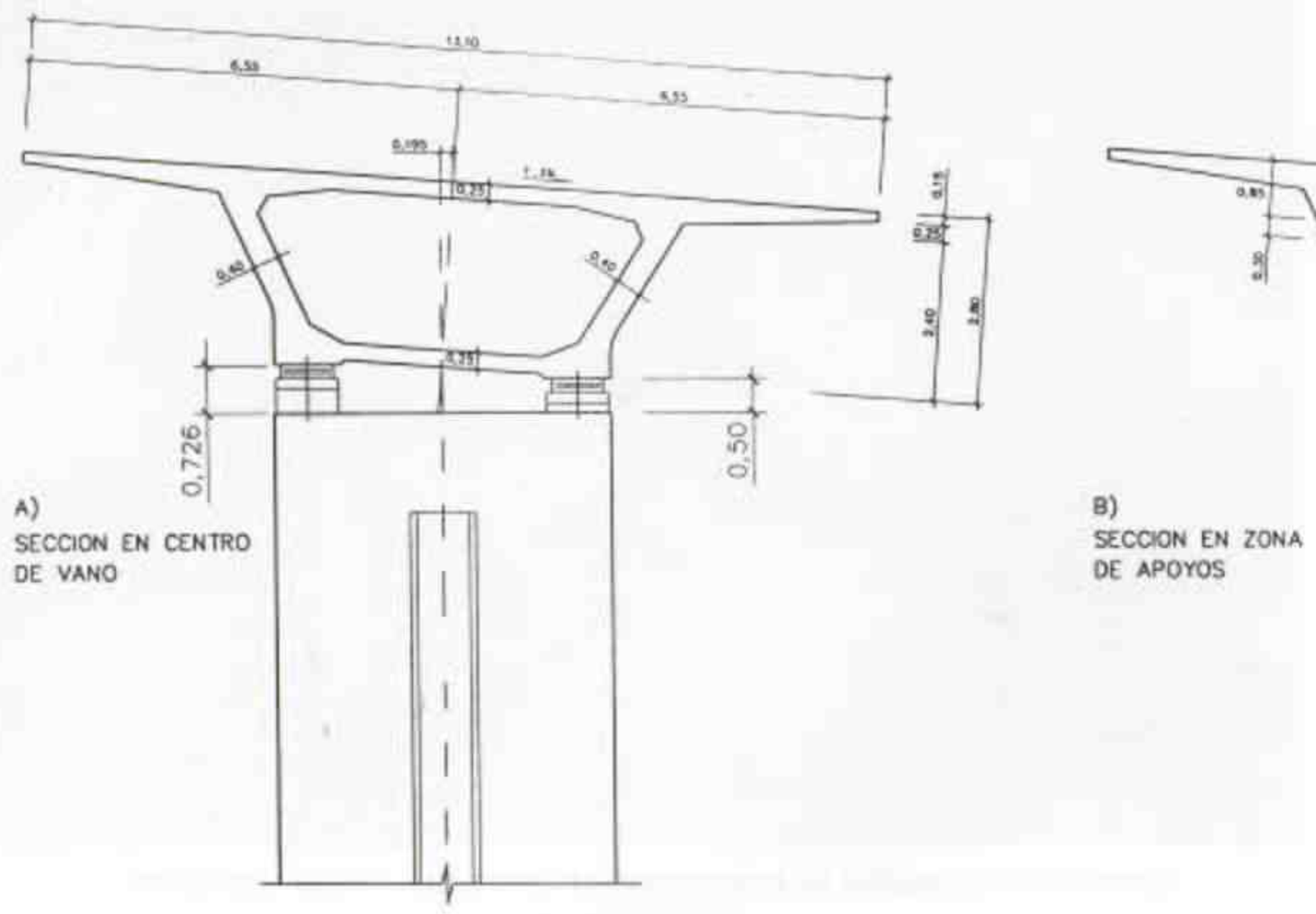

Figura 11. Tablero. Dimensiones.

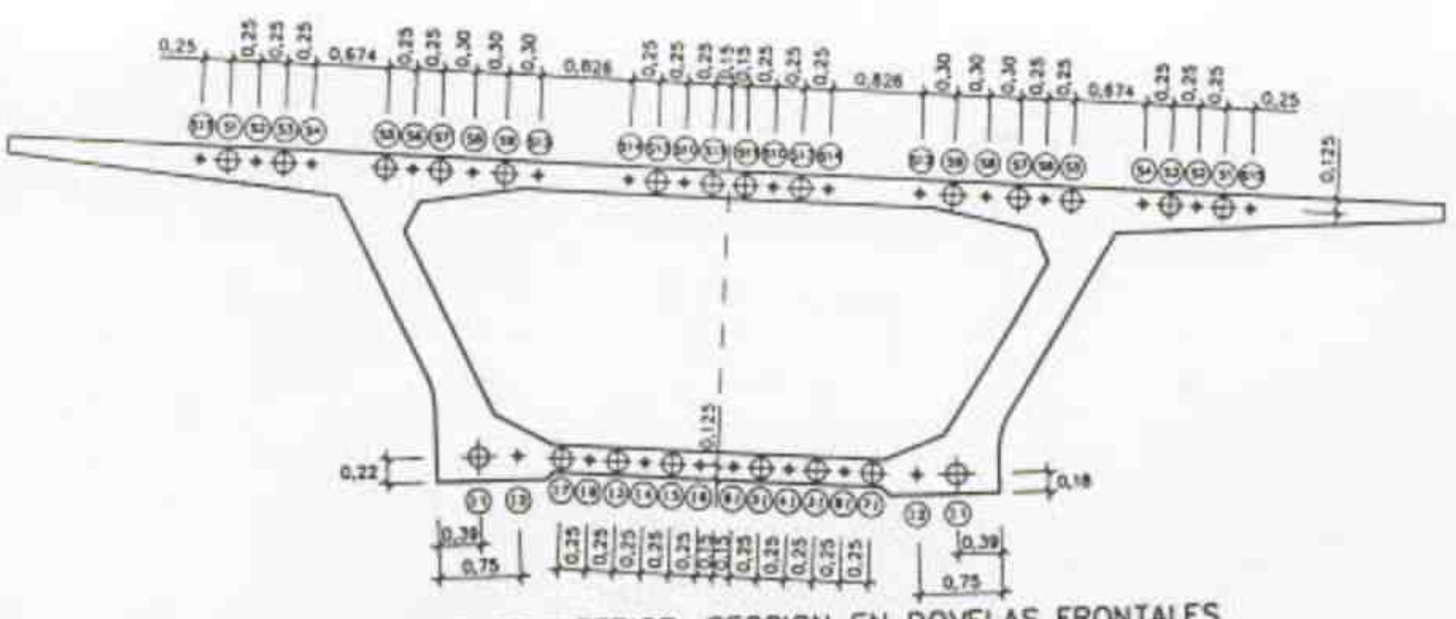

Figura 12. Pretensado interior, constituido por tendones de trazado recto.

exterior al hormigón, como suplemento para el tablero en situación de servicio, frente a la acción de las sobrecargas.

El pretensado interior, para el empuje, está compuesto por 34 tendones de 7 ϕ 0,6", anclados cada 2 dovelas; número que aumenta hasta un total de 44 en las 3 primeras dovelas situadas en el frente de empuje (Figura 12).

El pretensado exterior dispuesto consiste en 4 tendones de 19 ϕ 0,6", anclados cada dos vanos en la riostra de pilas. En cada vano existen 4 bloques desviadores en la tabla inferior, de 1,20 x x 1,20 x 0,45 m, desviándose en cada bloque la mitad de los tendones exteriores (Figura 13).

Gracias a la disposición del pretensado exterior complementario, dimensionado para la situación del viaducto en servicio frente a las sobrecargas, se resolvió el tablero mediante elementos estructurales de gran sencillez. La cantidad de acero activo constituido por tendones rectos para lograr un pretensado centrado, se dimensionó únicamente para resistir la acción del peso propio en fase de empuje. Las asmas laterales de la viga-cajón tienen un espesor constante, igual a 0,40 m, en toda la longitud del tablero, carecen de tendones de pretensado en su interior y la armadura pasiva es moderada. Ello ha constituido una notable ventaja desde el punto de vista constructivo, proporcionando además unas condiciones favorables para la puesta en obra del hormigón y el vibrado correspondiente.

7. PILAS

Las pilas, construidas con encofrado trepante, son de sección rectangular con un ancho transversal constante de 5,10 m, un espesor de paredes de 0,35 m y una dimensión longitudinal variable con la altura de la pila. Dicha dimensión es de 2,20 m en la cabeza de todas las pilas; valor que se consideró adecuado para albergar los aparatos de apoyo y disponer de espacio suficiente, en sentido longitudinal, para situar gatos para las operaciones de levantamiento del tablero, tanto durante el empuje como una vez esté el tablero en posición definitiva y se precise la sustitución de los apoyos en el futuro (Figura 14). Dicha previsión de espacio se considera fundamental para todo puente a construir por el método del empuje, en previsión de eventualidades

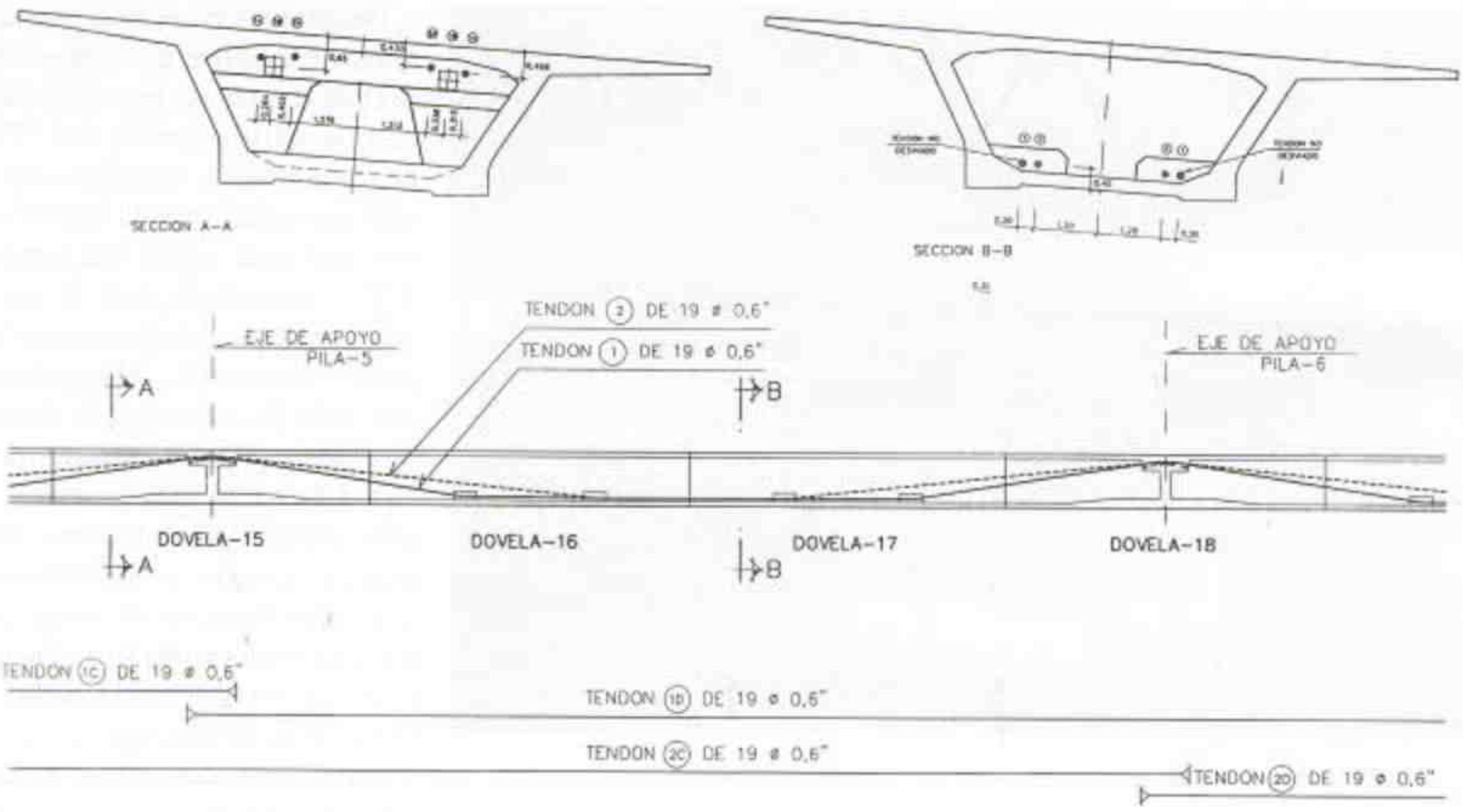

Figura 13. Pretensado exterior.

Figura 14. Coronación de la pila.

Figura 15. Tabiques provisionales para soporte de los aparatos de empuje.

consistentes en la necesidad de levantamiento del tablero para extraer almohadillas de empuje colocadas en posición errónea, así como para facilitar las tareas propias de terminación y montaje de elementos accesorios para los apoyos en situación definitiva.

8. ESTRIBOS

El estribo 2 del viaducto tiene unas especiales características, debido a las funciones que desarrolla:

1) Fija el tablero longitudinalmente, resistiendo los esfuerzos derivados de los fenómenos reológicos del hormigón, temperatura y frenado, mediante un sistema de topes de neopreno y unos tendones de 12 ϕ 0,6", dispuestos horizontalmente.

2) Da acceso al interior de la vigacajón para futuras operaciones de conservación, por medio de una galería.

3) En su momento, sirvió como estribo de empuje, durante el lanzamiento del tablero.

Para las operaciones de empuje del tablero se construyeron dos tabiques provisionales en el frente del estribo, para alojar los gatos de empuje y la placa de frenado (Figura 15).

9. APOYOS

En cada pila existen dos aparatos de apoyo tipo "POT" de 10.000 kN de carga admisible, uno unidireccional y otro multidireccional.

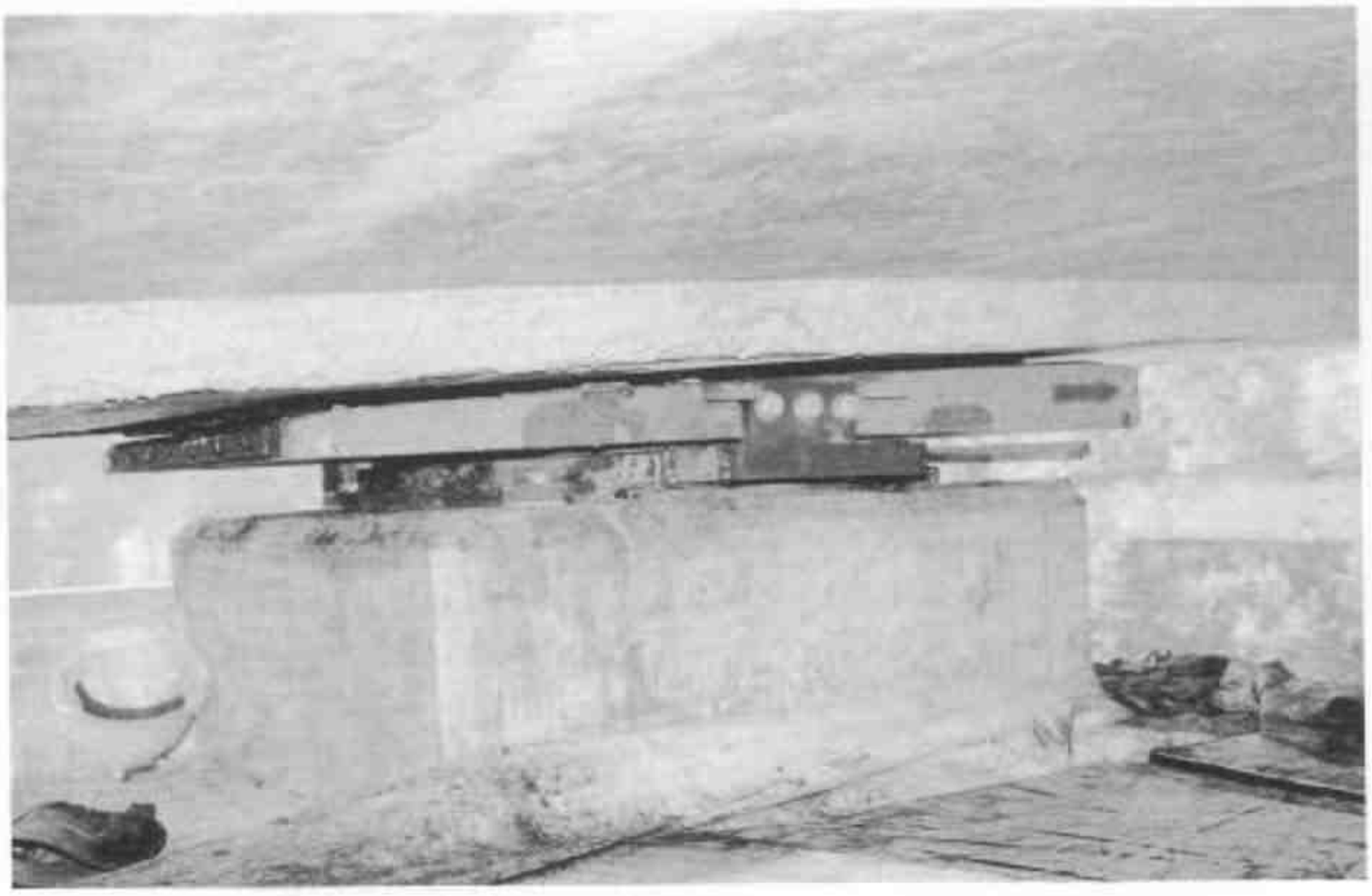

Figura 16. Aparato de apoyo tipo "Pot", en fase de empuje del tablero.

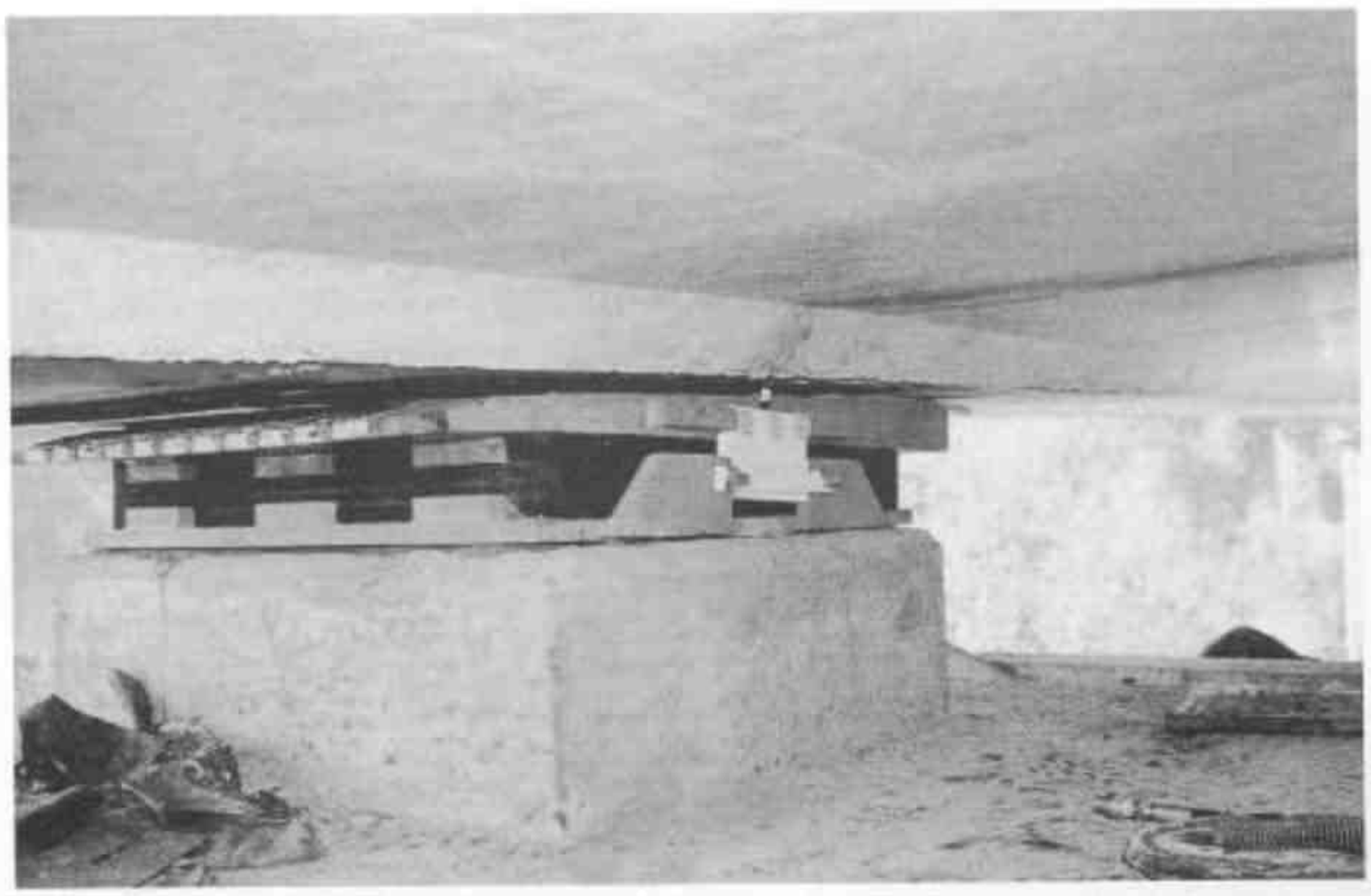

Figura 17. Aparato de apoyo, de neopreno, en fase de empuje del tablero.

Figura 18. Viaducto de Sant Bartomeu. Aspecto de la obra terminada.

Durante las fases de empuje, los aparatos de empuje utilizados fueron los definitivos en su posición final. Para ello, la parte superior del "Pot" tenía una plataforma metálica con disposición en cuñas, con la superficie superior inclinada según una pendiente del 4,2%, coincidente con la del tablero, sobre la cual se dispuso una lámina de acero inoxidable, bloqueándose por otro lado la capacidad de deslizamiento horizontal del aparato de apoyo. Sobre dicha lámina deslizaba, en posición inclinada, el tablero durante el empuje, gracias a la interposición de unas almohadillas de neopreno, cuya parte inferior estaba forrada con teflón. Una vez finalizado el empuje, se procedió al levantamiento del tablero para retirar las almohadillas interpuestas, así como la lámina de acero inoxidable y se efectuó la soldadura de la parte superior del aparato de apoyo a unas chapas de acero embebidas en la parte inferior del tablero, colocadas previamente, en fase de construcción de la dovela correspondiente (Figura 16).

Por último, se liberó el bloqueo del "Pot", con lo cual el tablero quedó situado en posición definitiva y en condiciones de deslizar horizontalmente sobre los apoyos de las pilas.

En la pila más próxima al estribo correspondiente al punto fijo del tablero, se dispusieron apoyos de neopreno, sobre los que, en fase de empuje se colocó el mismo sistema que en el resto de los apoyos tipo "Pot", para permitir el lanzamiento del tablero (Figura 17).

10. EJECUCIÓN DE LA OBRA

El Viaducto Sant Bartomeu pertenece al nuevo tramo de carretera, denominado Eix Transversal Lleida-Girona, realizado por la Generalitat de Catalunya y que ha sido inaugurado en diciembre de 1997, actuando como Administración GISA (Gestió d'Infrastructures, S.A.) (Figura 18). El tramo Fontfreda-Enlace con la C-154, en el que se encuentra el viaducto, ha sido construido por una Unión Temporal de Empresas formada por OSHSA, COMAPA y LAIN. El sistema de pretensado y empuje ha sido aportado por MEKANO4. El Proyecto del Viaducto y asistencia técnica durante la construcción se ha realizado en EIPSA (Estudio de Ingeniería y Proyectos), por los autores del presente articulo.