

Viaductos del tramo Adamuz-Villanueva para el Tren de Alta Velocidad Madrid-Sevilla

José Antonio Llombart

INTRODUCCION

La nueva línea ferroviaria Madrid-Sevilla, para el Tren de Alta Velocidad, atraviesa Sierra Morena por una zona en que, por su accidentada orografía, ha sido necesario construir varios túneles y ocho Viaductos, algunos de los cuales franquean valles de gran altura. La tipología es idéntica en todos los Viaductos, así como el procedimiento constructivo.

DESCRIPCION GENERAL

La Figura 1 muestra un alzado con las dimensiones generales de cada uno de los viaductos.

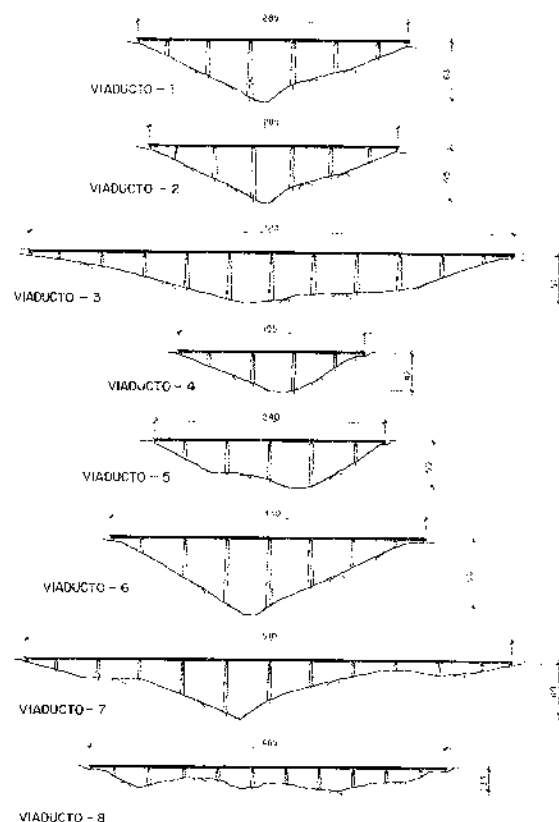


Fig. 1.

El tablero es continuo a lo largo de toda la longitud de cada viaducto y está constituido por una viga-cajón de 3,30 m de canto.

La pendiente longitudinal del tablero, de 12 milésimas, es idéntica para todos los viaductos. En cuanto al trazado en planta, cuatro de los viaductos discurren en curva circular de radio 2.300 m, uno en curva de 4.000 m de radio y los dos restantes se encuentran en alineación recta.

CRITERIOS DE DISEÑO

Dada la magnitud de la obra que se iba a realizar por un solo constructor, con una longitud total de tablero de 2.820 m, se ha llevado a cabo el estudio de la solución, habiéndose considerado globalmente criterios relativos a tipología estructural, rapidez y facilidad de construcción, economía de materiales, tipificación de elementos y optimización de la conservación de la obra a largo plazo.

SISTEMA CONSTRUCTIVO

Las especiales dificultades de acceso y la consideración de la altura de las pilas, que en algunos casos alcanza los 80 metros, han determinado el proceso constructivo de cada uno de los tableros, mediante su empuje desde una ladera (Figura 2), con la ayuda de una "nariz" frontal de lanzamiento (Figura 3).

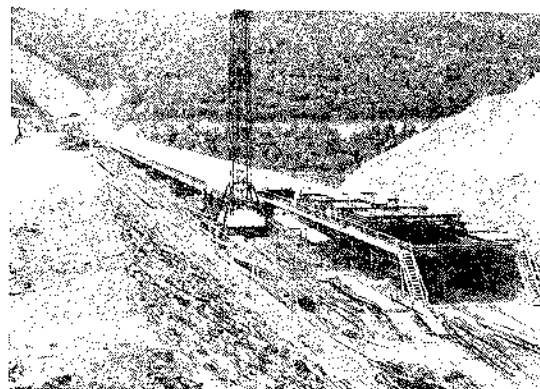


Fig. 2.



Fig. 3.

Las pilas se han ejecutado mediante encofrados deslizantes (Figura 4).



Fig. 4.

TIPOLOGIA ESTRUCTURAL. APOYOS DEL TABLERO

El tablero de cada uno de los Viaductos está constituido por una viga-cajón, continua en toda su longitud.

Longitudinalmente, el tablero está coaccionado en uno de los extremos situado sobre el correspondiente estribo, habiéndose dispuesto apoyos deslizantes en el resto del tablero, sobre las pilas y el estribo opuesto.

Tal disposición es común para todos los viaductos, cuya longitud total máxima es de 510 m para los V-3 y V-7.

Las cargas correspondientes al frenado se transmiten a través del tablero hasta el apoyo fijo, sobre uno de los estribos, con lo que las pilas no están afectadas por dicha sollicitación en su coronación, debido a la naturaleza de los apoyos deslizantes.

El tablero descansa sobre cada pila mediante dos aparatos de apoyo; uno de ellos con posibilidad de desplazamiento multidireccional y el otro unidireccional, con coacción transversal, tal como es habitual en este tipo de puentes continuos. (Figura 5).

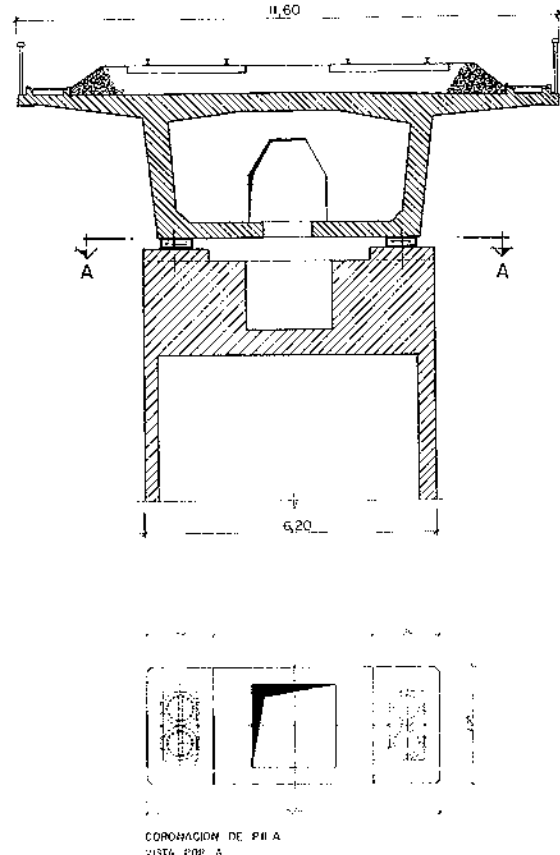


Fig. 5.

Las acciones transversales sobre el tablero (fuerza centrífuga y viento) se transmiten a las pilas a través de los aparatos de apoyo. La determinación de la respuesta estructural de las pilas se ha llevado a cabo mediante un estudio del reparto de dichas cargas, teniendo en cuenta la rigidez global de la estructura. Los resultados del cálculo han mostrado que las pilas de menor altura y por tanto de mayor rigidez, absorben una acción notablemente superior al de las pilas altas y que en algunos casos alcanza un valor del orden de tres veces del que se deduciría de un reparto uniforme. Ello ha motivado la disposición, en las pilas de menor altura de los viaductos curvos, de unos aparatos especiales de gran capacidad de carga frente a las acciones

transversales, debido a que la relación entre las fuerzas horizontales y verticales resulta extremadamente alta.

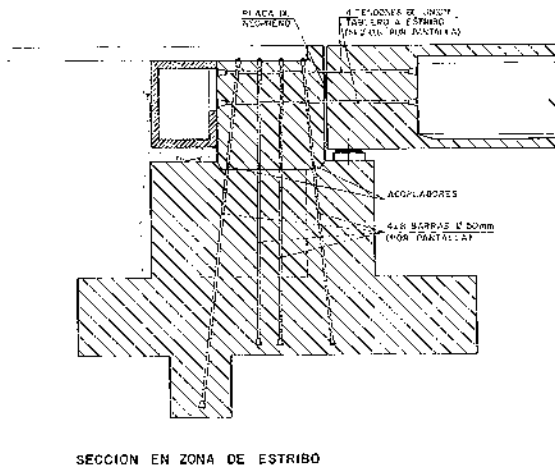


Fig. 6.

La transmisión de las acciones longitudinales del tablero al estribo fijo se efectúa a través de un sistema de topes de neopreno zunchado y la adición de unos anclajes pretensados mediante tendones dispuestos horizontalmente, con una longitud suficiente, para que no exista coacción frente al libre giro del tablero (Figura 6). Todos los sistemas mencionados han sido diseñados previniéndose la posibilidad de ser sustituidos.

ACCIONES DE CALCULO CONSIDERADAS

En el desarrollo del Proyecto se han tenido en cuenta, conjuntamente, las Normas Internacionales U.I.C. y la Instrucción Española vigente relativa a las Acciones que hay que considerar en el Proyecto de Puentes de Ferrocarril.

La consideración de esta última Norma en el desarrollo de este Proyecto ha exigido abordar y resolver una serie de problemas técnicos, poco habituales, derivados de la magnitud de las cargas horizontales que tenían que resistir las estructuras.

Los Viaductos V-3 y V-7 tienen una longitud de 510 metros. En cada uno de estos Viaductos, la fuerza horizontal debida al frenado y arranque, deducida de la Norma, alcanza un valor de **1.300 toneladas**, que deben ser transmitidas y resistidas por el estribo en que queda fijo el tablero.

La información disponible acerca de los pesos reales de los actuales trenes y el contraste con otras normas extranjeras, hace pensar que las acciones horizontales tenidas en cuenta son excesivamente conservadoras y que se precisa una revisión de nuestra normativa vigente.

A título de referencia, cabe indicar que la Norma Alemana DS899/59 limita la fuerza de frenado que se debe considerar, a 740 toneladas, como máximo, sea cual fuere la longitud de un Viaducto. El Viaducto de Enz, de 1.044 m de longitud, recientemente construido en Alemania para la línea de Alta Velocidad Mannheim-Stuttgart, ha sido verificado para soportar la citada acción horizontal de 740 toneladas. El sistema de transmisión de cargas horizontales del tablero al estribo incluye la disposición de unos amortiguadores hidráulicos.

Otro ejemplo internacional: El Viaducto Olifants River, en Africa del Sur, de 1.035 metros de longitud, fue en su momento el puente con tablero empujado más largo del mundo. Fue construido expresamente para una nueva vía destinada a trenes especiales para el transporte de mineral, cuyos vagones tienen una carga real, por eje, de 30 toneladas. La acción horizontal de frenado considerada en el proyecto fue de 1.100 toneladas. En la Figura 7 puede verse una impresionante fotografía del Viaducto Olifants River, en la que aparece un larguísimo convoy del que no se divisa su extremo trasero, arrastrado por cinco locomotoras Diesel.



Fig. 7.

En cuanto a la fuerza centrífuga, cabe asimismo establecer una análoga observación. Dicha acción horizontal, que considera trenes tipo B, cuyo peso es de 12 t/ml y 10 t/ml, circulando a 200 km/h, no parece adecuada para el caso real de ferrocarriles de alta velocidad.

En los Viaductos del tramo Adamuz-Villanueva, se ha calculado la fuerza centrífuga de acuerdo con la Norma. La situación de los Viaductos, en zona montañosa, ha precisado la disposición de pilas de distintas alturas, comprendidas entre 13 y 80 metros, dentro de un mismo Viaducto. Tal como se ha mencionado anteriormente, se ha realizado un estudio encaminado a determinar el reparto de cargas horizontales debidas a la fuerza centrífuga y viento. Para ello se ha tenido en cuenta la geometría real de cada viaducto, número y altura de pilas y rigidez de los elementos estructurales (pilas y estribos).

Para el caso más desfavorable, existen apoyos

cuya carga horizontal que hay que transmitir, deducida del cálculo, alcanza las 300 toneladas.

APARATOS DE APOYO

Cada uno de los aparatos de apoyo está constituido por el conjunto de dos elementos tipo "POT", a base de elastómero encerrado en un recipiente metálico.

Todos los aparatos son deslizantes en el sentido longitudinal del Viaducto y uno de ellos, en cada pila, tiene un dispositivo de coacción transversal, que permite la transmisión de las correspondientes acciones a la pila (fuerza centrífuga, viento, efecto lazo, etc).

La disposición de este tipo especial de aparatos ha resultado ser enormemente ventajosa para esta obra. Por un lado, su capacidad de transmisión de cargas horizontales es mucho mayor que la de los aparatos constituidos por simple "POT". Durante la fase de avance en el proceso de empuje del tablero, la disposición en línea de los dos cilindros es tal, que la carga vertical de los tabiques verticales de la viga-cajón es transmitida a la pila sin producir prácticamente flexión en la losa horizontal inferior. Una vez concluido el avance, existe un diafragma transversal, en el interior de la viga-cajón, en la zona de apoyos. La transmisión de las cargas de servicio se realiza favorablemente gracias a la posición de los aparatos de apoyo, situados inmediatamente por debajo de las almas de la viga-cajón, por lo que el diafragma transversal apenas ejerce la función de "puente" de reparto de cargas. Ello ha permitido crear en el diafragma una gran abertura que permitirá, en el futuro, el paso de vehículos ligeros por el interior de la viga-cajón, en toda su longitud.

La función estructural de cada diafragma se ha limitado, prácticamente, a coartar la distorsión transversal del tablero y a transmitir eficazmente las acciones transversales a los apoyos, estando capacitado al mismo tiempo para rigidizar la zona y permitir la colocación, en su

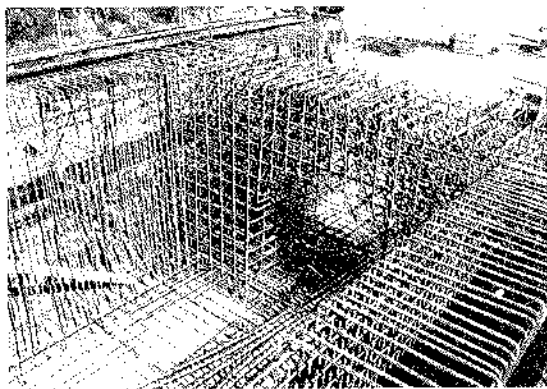


Fig. 8.

parte inferior, de gatos hidráulicos para un ocasional levantamiento del tablero.

La magnitud de las cargas horizontales que tiene que transmitir el diafragma, ha exigido llevar a cabo un detallado estudio local, habiendo sido preciso disponer fuertes cuantías de armadura pasiva para resistir adecuadamente los esfuerzos deducidos. (Figura 8).

CONSERVACION

La importancia de la Obra Pública que se iba a realizar y el hecho de constituir la infraestructura de una nueva línea de Ferrocarril de Alta Velocidad de gran trascendencia en las comunicaciones del país, han traído consigo la exigencia de plantear el diseño con criterios de futuro en lo referente a la durabilidad y conservación.

La situación de los viaductos, en zona montañosa, y la considerable altura de las pilas, dificultan el acceso desde el fondo de los valles para las operaciones propias de inspección y mantenimiento de los tableros, en especial, los aparatos de apoyo cuyo correcto funcionamiento debe garantizarse de forma permanente.

Por todo ello el diseño de la estructura se ha realizado de forma que se cumplen los siguientes requisitos:

— Acceso al interior de la viga-cajón por una puerta practicada en uno de los estribos de cada viaducto. La entrada se encuentra en una zona accesible y permite la carga y descarga de todos los materiales necesarios para la conservación (Figura 9).

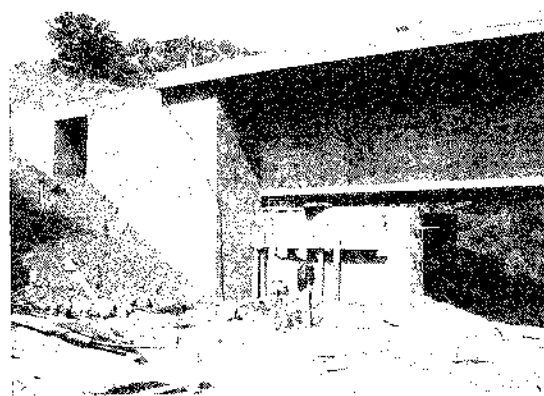


Fig. 9.

— Creación de unas condiciones, en el interior de la viga-cajón, con la suficiente diafanidad como para poder circular vehículos para transporte de personal y cualquier tipo de elementos relacionados con la conservación y la eventual sustitución de los aparatos de apoyo, cuyo peso es del orden de las 2 toneladas (Figura 10).

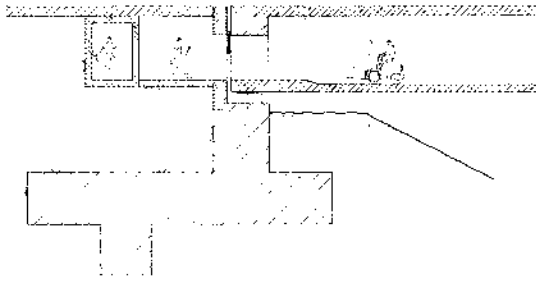


Fig. 10.

—Acceso, a través de unas trampillas situadas en la losa inferior de la viga cajón, a la coronación de cada una de las pilas (Figuras 11 y 12). Las dimensiones de las trampillas son tales, que es posible el paso de personal y de los aparatos de apoyo que se vayan a sustituir. La adición de un pequeño cabrestante colgado del dintel correspondiente al diafragma de la viga cajón situado en zona de apoyos, permitirá ejecutar las operaciones de izado en óptimas condiciones de seguridad y rapidez. (Véase en la figura 13, el orificio en la losa inferior, en una fase constructiva de avance, en que todavía no ha alcanzado su posición definitiva sobre la pila).

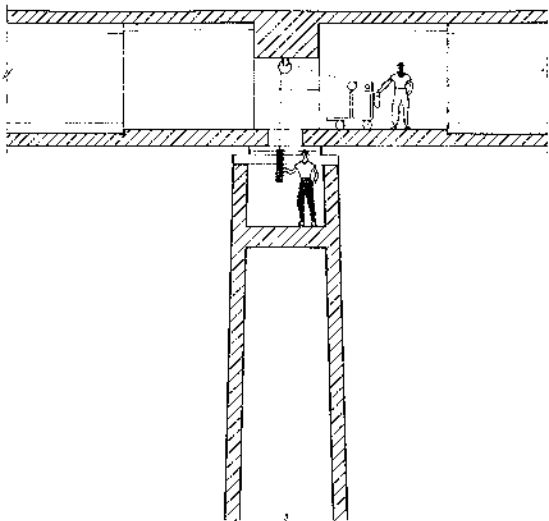


Fig. 11.



Fig. 12.

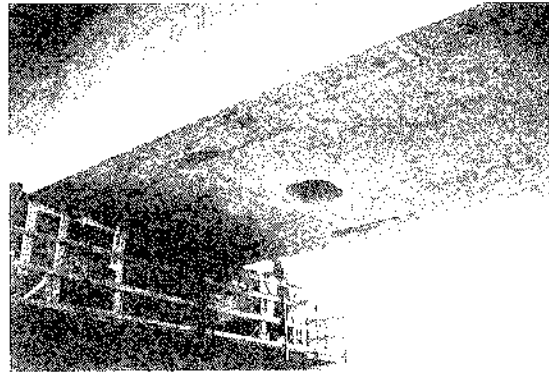


Fig. 13.

—Disposición de un foso, en coronación de pilas, con dimensiones apropiadas para alojar eventualmente personal y el utillaje necesario para la manipulación de los aparatos de apoyo, levantamiento del tablero, etc. (Figura 14).

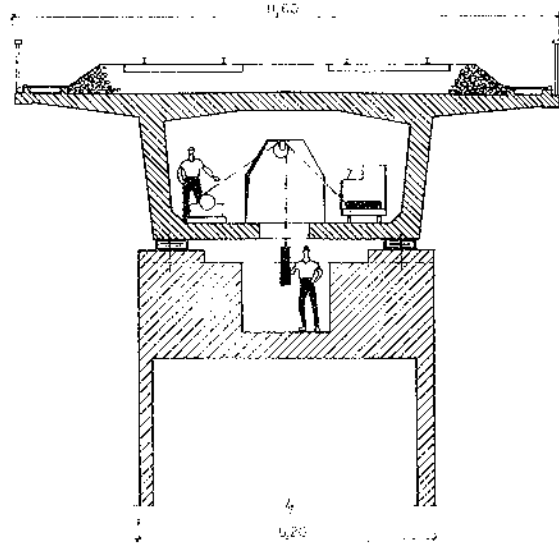


Fig. 14.

—Posibilidad de sustitución de los elementos de anclaje del tablero al estribo, en su extremo fijo (Véase figura 6).

El sistema de anclaje está constituido por tendones de gran potencia, provistos en sus extremos de anclajes con rosca, que comprimen permanentemente unos topes formados por neopreno zunchado. La armadura activa está alojada en conductos inyectados con grasa anticorrosiva.

La magnitud de las cargas de frenado que hay que transmitir, que alcanzan en algunos casos las 1.300 toneladas, deducidas de las bases de cálculo impuestas, ha determinado tal sistema, que garantiza la fijación longitudinal del tablero y la posibilidad de giro. La naturaleza del sistema y las condiciones de trabajo impues-

tas a los materiales, con pretensado permanente, son tales que existe total garantía frente a la fatiga. Existirá en todo momento la posibilidad de sustitución, debido a un posible riesgo de corrosión y para facilitar cualquier operación futura relativa a la conservación.

PRETENSADO DEL TABLERO

El pretensado longitudinal del tablero está formado por dos familias diferentes (Figura 15). La primera de ellas, con cables rectos, está dispuesta en las losas superior e inferior de la viga-cajón y su dimensionamiento es el adecuado para soportar los esfuerzos debidos al lanzamiento.

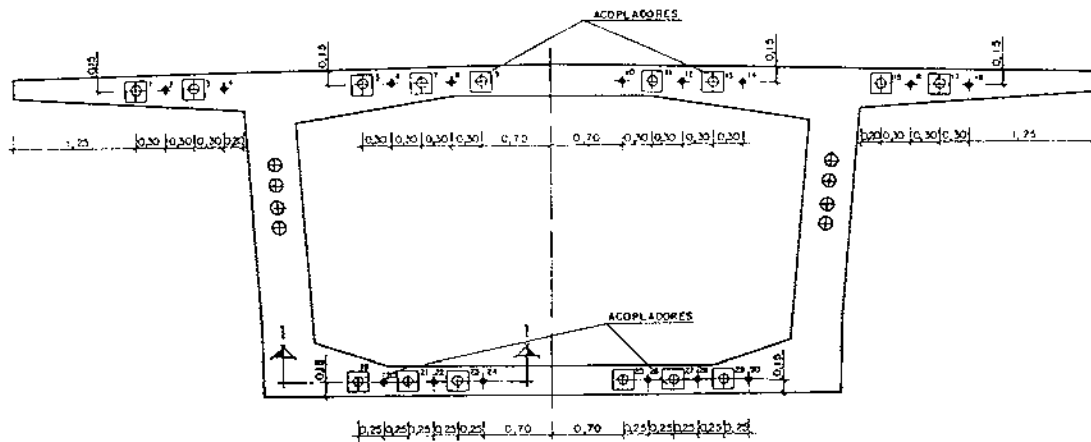
La puesta en tensión de los tendones rectos de cada dovela se ha realizado en dos etapas. La

primera de ellas, inmediatamente después del endurecimiento del hormigón de cada dovela y antes de iniciar el avance. La segunda, después del siguiente ciclo, que coincide con la puesta en tensión de la dovela siguiente, recién hormigonada. La continuidad de dichos tendones se ha llevado a cabo disponiendo aparatos de acoplamiento en los anclajes activos.

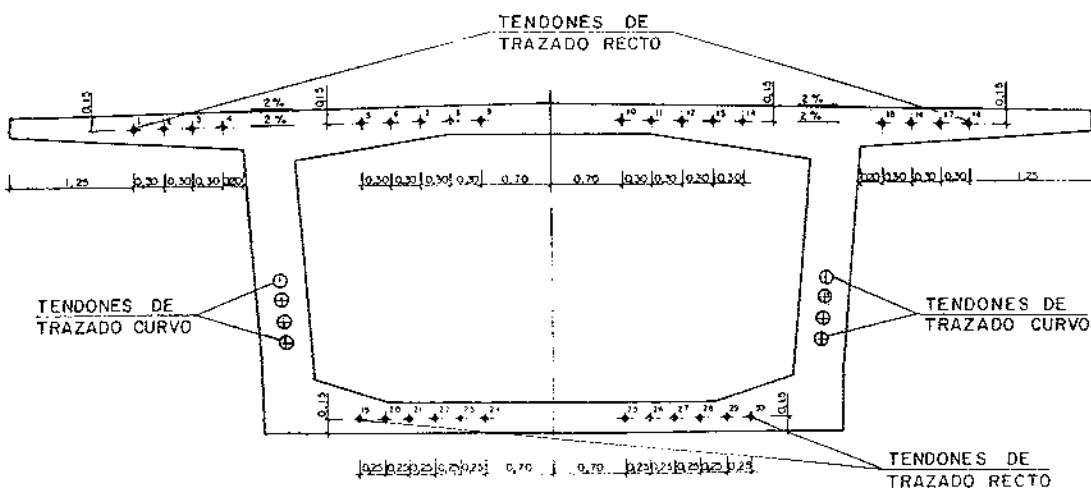
La segunda familia de pretensado se ha aplicado una vez completado el empuje y desmontada la nariz de lanzamiento. Está constituida por cables con trazado curvo, que se alojan en las almas de la viga-cajón.

ANÁLISIS DE LA ESTABILIDAD DE PILAS

Durante el desarrollo del Proyecto se estudió la estabilidad de cada fuste, sometido a las acciones de la Instrucción. Se tuvo en cuenta la



ALZADO POR JUNTA DE DOVELAS



SECCION TIPO

Fig. 15.

geometría real de la sección de hormigón, variable con la altura, así como las armaduras dispuestas, y se llevó la verificación, considerando el caso real de flexión esviada, en teoría de segundo orden.

Para ello, se utilizó un programa de cálculo puesto a punto expresamente para esta obra y cuya descripción ha sido hecha ya por su propio autor en el número 171 de la Revista Hormigón y Acero (2º trimestre de 1989).

PROCESO CONSTRUCTIVO

Tal como ya se ha indicado, la construcción de las pilas se ha llevado a cabo mediante encofrados deslizantes, y los tableros, mediante el método de empuje desde una ladera.

Cada una de las dovelas, que marcan los ciclos de construcción, tiene una longitud de 22,50 m, correspondiente a la mitad de los vanos de mayor luz, a excepción de las extremas, de 23,30 m y 15,80 m.

El empuje se ha realizado con la ayuda de una "nariz de lanzamiento" metálica, adosada al extremo frontal del tablero mediante barras pretensadas (Figura 16).



Fig. 16.

El hormigonado de cada dovela se ha llevado a cabo en dos fases. En la primera de ellas, se ha construido la losa inferior del cajón y los dos tabiques laterales, quedando una junta horizontal en la unión de las almas con la losa superior (Figura 17). Una vez retirados los encofrados de los elementos verticales, se ha procedido a la inmediata construcción de la losa superior. El hormigonado de cada dovela se ha efectuado, por tanto, sin haberse producido movimiento alguno de avance del tablero (Figura 18).

Tal procedimiento, adoptado últimamente en la construcción de puentes de ferrocarril con tablero empujado, ofrece plenas garantías constructivas y estructurales y elimina el riesgo de fisuras que existe con otros métodos, en que el movimiento de empuje se lleva a cabo antes de

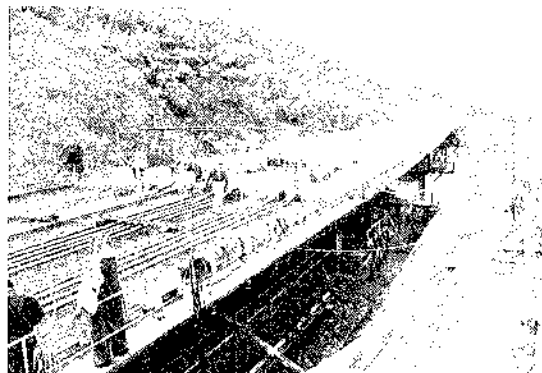


Fig. 17.

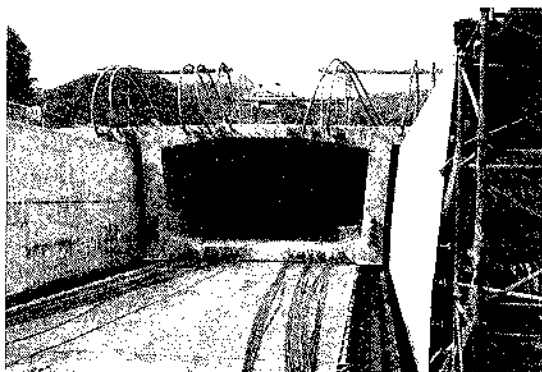


Fig. 18.

haberse completado el hormigonado de la sección total de cada dovela.

Se estableció un programa de construcción a razón de una dovela por semana, correspondiente a 22,50 metros lineales de tablero, incluido el correspondiente avance. El ritmo real de la obra coincidió con las previsiones y una vez puestos a punto los sistemas, pudo rebajarse, ocasionalmente, dicho plazo a seis días.

La construcción de los ocho Viaductos se hizo de forma que en algunos momentos existieron simultáneamente, en tres de ellos, equipos de construcción de dovelas. Se consiguió un rendimiento real de tres dovelas por semana en

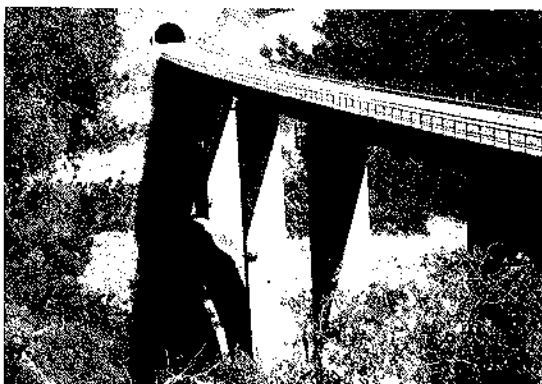


Fig. 19

el conjunto de la obra, lo que puede considerarse un auténtico "record" de producción, gracias a la excelente labor de organización llevada a cabo por la entidad constructora.

Las figuras 19 y 20 muestran dos imágenes de la obra terminada.

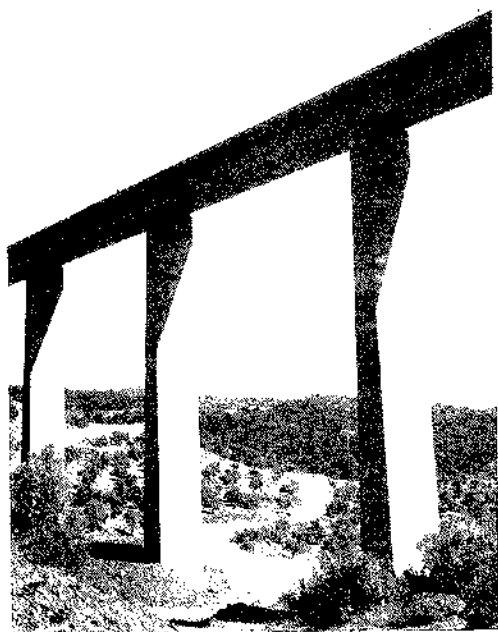


Fig. 20.

EJECUCION DE LA OBRA

La construcción fue llevada a cabo por una Agrupación de Empresas formada por DRAGADOS y CONSTRUCCIONES, ENTRECANALES y TAVORA y COMSA.

El sistema de pretensado fue CTT-Stronghold. Todos los mecanismos para el empuje de tableros fue aportado por CENTRO DE TRABAJOS TECNICOS (CTT).

La Administración de la obra fue la Dirección General de Infraestructura del Transporte.

La construcción de los Viaductos finalizó en 1990, y las Pruebas de carga, en 1991.

RESUMEN

La nueva línea ferroviaria Madrid-Sevilla, para el Tren de Alta Velocidad, atraviesa Sierra Morena por una zona en que, por su accidentada orografía, ha precisado la construcción de ocho Viaductos, algunos de los cuales franquean valles de gran altura.

El tablero de cada uno de los viaductos está formado por una viga-cajón, continua en toda su longitud. El procedimiento seguido en la construcción ha sido mediante empuje desde una ladera. Las pilas se han ejecutado mediante encofrados deslizantes.

Las estructuras están provistas de unos sistemas especiales para transmitir fuertes cargas horizontales debidas al frenado y a la fuerza centrífuga.

El diseño de los tableros se ha realizado siguiendo criterios encaminados a facilitar en el futuro los trabajos de conservación de la obra en fase de servicio.

SUMMARY

The new High-Speed Railway Madrid-Seville crosses Sierra Morena through a rugged zone. Its special orography determine the construction of eight viaducts, some of them jumping over deep valleys.

The deck of all viaducts is done by a continuous Box-Girder. The construction method consists in launching from an abutment. The piers have been erected with slip-form construction.

The structures are provided with special devices in order to transmit strong horizontal loads due to braking and centrifugal forces.

The decks have been designed following criterious that will lead to an easy maintenance of the structures.