

VIADUCTO ARROYO DEL VALLE

LÍNEA DE ALTA VELOCIDAD MADRID – SEGOVIA – VALLADOLID

Florencio J. del POZO VINDEL

Dr. Ingeniero de Caminos

PROES Consultores S.A.
Director General

fpozo@proes.es

José M. ARRIETA TORREALBA

Dr. Ingeniero de Caminos, I. Industrial

PROES Consultores S.A.
Director de Desarrollo Técnico

jmarrieta@proes.es

Antonio J. MADRID RAMOS

Ingeniero de Caminos

PROES Consultores S.A.
Director del Área de Puentes

amadrid@proes.es

Alberto CEREZO MACÍAS

Ingeniero de Caminos

PROES Consultores S.A.
Director Área Asistencias Técnicas

acerezo@proes.es

Amaya HERNANDO MARTÍN

Ingeniera de Caminos

PROES Consultores S.A.
Área de Puentes

ahernando@proes.es

Miguel Ángel HIGUERA ANTÓN

Ingeniero de Caminos

PROES Consultores S.A.
Área de Puentes

mhiguera@proes.es

Resumen

El Viaducto de Arroyo del Valle es un puente para ferrocarril de alta velocidad construido en la vertiente sur de la Sierra de Guadarrama, un entorno medioambiental que ha condicionado tanto el diseño estructural como los procedimientos constructivos utilizados. Sus 1755 m le convierten en el tablero continuo más largo de Europa que ha sido ejecutado por fases mediante una cimbra autoportante, que tuvo que ser fabricada específicamente para este viaducto de 66 m de luz.

Para recoger las acciones horizontales longitudinales del tablero, se ha construido un arco ojival de 120 m de luz. Cada semiarco se ha ejecutado mediante trepas en posición cuasi vertical, para posteriormente ser abatido hasta su ubicación final girando en torno a una rótula situada en la cimentación, mediante atirantamientos provisionales controlados desde la coronación de las pilas vecinas. Con los dos semiarcos ya en su posición definitiva, se procede al cierre de la clave del arco.

El presupuesto ha ascendido a 29.5 millones de euros y el puente ha sido instrumentado con equipos de toma de datos con lectura en tiempo real, para el seguimiento de su evolución a lo largo del tiempo.

Palabras Clave: viaducto, ferrocarril, hormigón pretensado, autocimbra, arco, abatimiento, Proes

1. Introducción

El ferrocarril de alta velocidad se ha configurado como uno de los principales elementos vertebradores del territorio, convirtiéndose en un privilegiado vehículo de cohesión regional y social y evidenciando su capacidad potenciadora de los corredores por los que circula.

La línea de alta velocidad con ancho internacional que une Madrid, Segovia y Valladolid constituye un elemento fundamental para el desarrollo ferroviario del Norte y Noroeste de España, al tiempo que forma parte del Eje Atlántico Ferroviario Europeo, considerado por la UE como proyecto prioritario en materia de transporte.

El tramo Soto del Real – Miraflores de la Sierra de dicha línea discurre por la vertiente madrileña de la Sierra de Guadarrama, el clásico obstáculo natural al que debían hacer frente las caballerías y los carros que viajaban de una meseta a otra y que posteriormente se convirtió en el paso obligado de carreteras y autopistas. Ahora es la alta velocidad la que hace acto de presencia en esta zona, con la pretensión de manifestar su máximo respeto al entorno y al privilegiado paisaje por el que se va a mover.

En este marco nace el Viaducto de Arroyo del Valle, que con sus 1755 m es el tablero continuo más largo de Europa y cuyo arco es récord del mundo por sus dimensiones para puentes ferroviarios de alta velocidad. Esta obra participó en la X convocatoria del Premio Internacional Puente de Alcántara y recibió la Mención de Honor en el III Premio Acueducto de Segovia.



2. Subestructura

Debemos empezar haciendo mención a la existencia de un Proyecto previo elaborado por la empresa Siegrist y Moreno S.L., que asimismo desarrolló las labores de asistencia técnica a la Dirección de Obra. Con posterioridad, PROES Consultores realizó el Proyecto modificado de construcción que ejecutó la UTE Soto del Real: AZVI – Puentes y Calzadas. Además, PROES Consultores llevó a cabo las labores de asistencia técnica al contratista durante la puesta en obra de este Proyecto modificado.

El trazado atraviesa un extenso valle por el que discurren el Arroyo del Mojón y el Arroyo del Valle, perfilado por las crestas de Somosierra en un entorno de impactante riqueza paisajística. Para preservarla era preciso un diseño estilizado que se adaptara a la amplitud visual de este marco y que no introdujera más aditamentos que los estrictamente necesarios. El espectáculo lo ofrece la Sierra de Guadarrama, no el viaducto. Y así debe seguir siendo, por lo que como esquema resistente del tablero se ha optado por la modesta viga continua, de manera que lo construido representa el mínimo imprescindible para garantizar coherencia estructural sin ninguna concesión adicional.

La geometría de las pilas responde al mismo principio de simplicidad de formas expresado en fustes rectangulares tipo cajón que miden 6.00 m en dirección transversal y que, ataluzadas en dirección longitudinal, van aumentando su dimensión desde los 2.50 m de coronación hasta la base, según un talud 1 / 50. La altura máxima se da en la pila 11 y es 75.67 m, con un espesor de tabique de 0.35 m.

Se ha utilizado encofrado trepante con módulos de 4 m, obteniendo rendimientos de una trepa por día, incluso en tiempo frío, gracias a la colocación de calefactores y sondas térmicas para registro continuo de temperatura. Sobre el macizado superior de 1.50 m se ejecutan dos mesetas de 0.60 m de altura, en las que se disponen los aparatos de apoyo que son tipo POT, con una carga vertical máxima admisible entre 29000 y 25000 kN. Sobre cada pila se colocan dos apoyos: uno libre y otro guiado longitudinalmente.

En las estribaciones de Guadarrama, lógicamente, el terreno ofrece buenas condiciones de cimentación, obteniéndose tensiones admisibles entre 0.40 y 1.00 MPa. De hecho, veintidós de las veinticinco pilas del viaducto presentan una cimentación superficial, cuyas dimensiones en planta varían entre 7.00 x 9.75 y 14.50 x 14.75 m, adaptándose la geometría de cada zapata estrictamente a las solicitaciones de su pila y a la tensión admisible en su ubicación. Los cantos oscilan entre 2.00 y 3.25 m y, con el fin de disminuir el volumen de hormigón utilizado, se ha recurrido a ataluzar las zapatas.

Sólo en las pilas 8, 9 y 10 (las más próximas al fondo del valle) fue preciso recurrir a una cimentación profunda, mediante 4 x 4 pilotes de 1.50 m de diámetro bajo encepados ataluzados de 14.00 x 14.00 x 3.75 m.

Los estribos son de tipo cerrado, con el fin de poder ejecutar correctamente el bloque técnico que sirve de transición entre terraplén y tablero. Se cimentan mediante zapatas que trabajan a 0.50 y 0.70 MPa y se completan con muros laterales escalonados, para adaptarse al perfil del terreno, y aletas triangulares, que encauzan el vertido. Al igual que en las pilas, se dispone un aparato de apoyo POT libre y otro guiado longitudinalmente, con una carga vertical máxima admisible de 11000 kN.

3. Tablero

3.1 Sección

El tablero responde a un esquema estructural de viga continua de 27 vanos y 1755 m de longitud total, con unas luces de 52.50 + 25 x 66.00 + 52.50 m. La plataforma consta de dos vías de ancho internacional, con un intereje que varía entre 8.30 y 4.70 m, e incluye los elementos habituales como son traviesas, balasto, murete guardabalasto, paseo, barrera, sumideros y soportes de catenaria, así como pantallas laterales para protección de aves. La anchura del tablero varía gradualmente entre 17.60 y 14.00 m, desde el estribo 1 (lado Madrid) hasta las proximidades de la pila 6, manteniéndose luego constante en 14.00 m hasta el estribo 2 (lado Segovia).

La sección transversal escogida responde a la tipología de cajón de hormigón pretensado cuyo canto varía entre 3.30 m sobre estribos y en centros de vano (esbeltez 1 / 20) y 5.00 m sobre pilas (esbeltez 1 / 13.2). Esta variación de canto se realiza en 13.50 m a cada lado de las pilas y reproduce una ley parabólica de segundo grado que, unido al hecho de que las almas sean inclinadas en vez de verticales, implica que el ancho del núcleo inferior del cajón también varíe entre 6.63 m en centros de vano y 5.50 m sobre pilas. Se entiende que toda esta variabilidad geométrica confiere una gran riqueza formal al viaducto acabado, aun a costa de complicar ligeramente durante la ejecución las labores de encofrado y ferralla.

La sección del cajón se hormigona en dos etapas. En primer lugar se ejecuta una U compuesta por la tabla inferior y las dos almas (cuyo espesor es 0.55 m), disponiendo a continuación unas losas quebradas prefabricadas de 7 m de luz que tienen una sección nervada en T de 13 cm de canto (alas de 5 cm). Tras apoyar estas prelosas en las almas, es posible realizar la segunda parte del hormigonado que comprende la tabla superior (sobre las propias prelosas) y los voladizos de la sección transversal (al describir el pretensado insistiremos en estas dos etapas de hormigonado).

3.2 Autocimbra

Debido a los condicionantes impuestos por la Declaración de Impacto Ambiental, se optó por la ejecución a través de cimbra autoportante, método que permite independizar en buena medida terreno y construcción del tablero, con lo que se minimizan las afecciones sobre cauces, suelo, fauna y vegetación. La construcción de puentes con autocimbra es un procedimiento común y suficientemente contrastado, capaz de adaptarse a cualquier trazado en planta y en alzado, así como a las variaciones geométricas de canto y ancho, por lo que no se insistirá en describir los movimientos de la cimbra sobre sí misma, sus apoyos sobre pilas y tablero ya ejecutado, la movilidad de los encofrados....

Pero sí debe resaltarse el hecho de que la luz de 66 m de nuestro viaducto se escapaba del rango en el que trabajaban las autocimbras disponibles en España, por lo que fue necesario construir una cimbra autoportante ex profeso para el Viaducto de Arroyo del Valle. Se trata de una gran estructura metálica de 153 m de longitud y casi 1000 toneladas de peso, dotada de todos los dispositivos fijos y móviles que hacen posible su labor portante de cargas elevadísimas como plataforma de trabajo, al mismo tiempo que es capaz de alcanzar la posición espacial prevista en el replanteo con enorme precisión.

La construcción se llevó a cabo por fases desde el estribo 2 hacia el 1. La primera fase consta del vano de compensación de 52.50 m entre el estribo 2 y la pila 25 más un voladizo de 13.50 m: es decir, un total de 66.00 m. En la fase 2 la autocimbra apoya en el tablero ya ejecutado y se lanza hacia las siguientes pilas, de forma que se construyen los 52.50 m entre el frente de fase 1 y la pila 24 (se completa así el vano tipo de 66.00 m) y un nuevo voladizo de 13.50 m.

Esta secuencia se repite hasta que en la fase 26 el voladizo queda entre la pila 1 y el estribo 1. En cada fase los voladizos de 13.50 m coinciden con la zona de canto variable que, por simetría, se extiende también en los 13.50 m anteriores a cada pila. Se concluye con la ejecución de la fase 27 entre el frente de fase 26 y el estribo 1 que, con una longitud de 39.00 m, completa el vano lateral de 52.50 m. No es necesario destacar la importancia vital que tiene la

coordinación entre los trabajos de ejecución de cimentaciones y fustes con los del tablero a la hora de lograr el cumplimiento de los plazos de obra previstos.



3.3 Pretensado

El pretensado consta de tres familias diferenciadas de cables, si bien todas tienen en común que el tesado se efectúa desde el extremo frontal. La familia 1 representa el pretensado general y consiste en dieciséis cables (ocho en cada alma) que describen trazados parabólicos y rectos entre los puntos altos de la sección (en pilas) y los bajos (en centros de vano). Se anclan en cuñas de 3.00 m de longitud adosadas a las almas en los frentes de fase, en cuyo interior tiene lugar el cruce de los cables que "nacen" y que "mueren" en cada fase. Su potencia varía gradualmente entre los 25 T 15 del centro del puente (más tarde nos referiremos a la ubicación del punto fijo) y los 19 T 15 de la última fase.



La familia 2 discurre por la tabla inferior del cajón, tiene una longitud de 28 m (excepto en las fases extremas, donde los cables miden 22.50 m) y se ancla en cuñas triangulares adosadas a la losa inferior. En definitiva, es un refuerzo a positivos que consta de entre 4 y 8 cables de 17 a 19 T 15, según las necesidades tensionales de cada fase.

Por último, la familia 3 es similar a la anterior, si bien más concentrada en los centros de vano, ya que sus cables tienen una longitud de sólo 14.00 m. No fue necesario disponerla en los vanos laterales y consta de entre 5 y 8 cables de 17 a 19 T 15.



A pesar de que la cimbra se fabricó expresamente para este viaducto, no tenía capacidad suficiente para sustentar la sección transversal completa en vanos tan largos como los que nos ocupan. Se indicó anteriormente que la sección se hormigonaba en dos etapas: primero una U (tabla inferior y almas) que posteriormente, tras la colocación de las prelasas, se completaba con la tabla superior y los voladizos.

Pues bien, la autocimbra no podía soportar por sí sola un peso superior al de la sección en U, por lo que una vez hormigonada ésta se procedía a un tesado parcial de la familia 2 y de otros cuatro cables pertenecientes a la familia 1. Con esto, ya era posible colocar las prelasas y completar el hormigonado de la sección. A continuación se tesaban los otros doce cables de la familia 1 y se completaba el tesado de los cables de las familias 1 y 2 ya utilizados parcialmente en la sección en U. Por último, se tesaba la familia 3.

Con este procedimiento se logró un rendimiento en obra de una fase cada dos semanas, excepto en la primera y en la última fase donde las operaciones de montaje y desmontaje de la cimbra ocuparon varios meses de trabajo. Por último, se indicará que se ha instalado un sistema de iluminación interior del tablero que facilitará las labores de inspección y mantenimiento.

4. Arco

4.1 Punto fijo

Como hemos visto el tablero se apoya en pilas y estribos a través de aparatos tipo POT que permiten el movimiento longitudinal del puente por lo que es preciso anclarlo en algún punto capaz de compensar las fuerzas horizontales provenientes del frenado, de las acciones lentas, rozamiento de los teflones, las acciones térmicas...

¿Dónde materializar ese anclaje? No es fácil establecer normas genéricas para adoptar una decisión en la que intervienen factores tan dispares como la longitud del puente, altura de pilas y estribos, características geotécnicas, etc. Parece que por defecto el primer intento siempre consistirá en atar el tablero a un estribo (al más bajo o al que tenga una cimentación más favorable) en busca de una referencia másica que por rozamiento con el terreno reaccione contra las fuerzas horizontales.

Pero esta opción sólo será válida para puentes cuya longitud no supere el kilómetro, siendo este valor tan sólo un orden de magnitud orientativo. El motivo no es otro que el movimiento relativo entre tablero y estribo que se produce en el extremo libre del tablero pudiera resultar excesivo para que el tráfico ferroviario circule con normalidad.

En puentes largos el siguiente paso sería disminuir la longitud de dilatación situando el punto fijo en una zona próxima al centro del puente y solidarizar ahí el tablero con una pila. Es una solución viable si las pilas tienen una altura moderada pues de lo contrario la flexión inducida en la base del fuste y en la cimentación será tan fuerte que podría invalidar el sistema.

En nuestro caso nos encontramos ante un puente de 1755 m de longitud que, en su zona central, se sitúa a unos 50 m sobre el terreno: no parece viable anclar un tablero así en una pila de 50 m, por lo que se hace necesario recurrir a otro método de anclaje. Y el sistema elegido ha sido la construcción entre las pilas 14 y 15 de un arco ojival en cuya clave se anclará el conjunto a través de un tetón que entra en el tablero: desde ese tetón se transmitirán las fuerzas horizontales del tablero al arco.

A efecto de acciones verticales, la presencia del arco no rompe la modulación de luces de 66.00 m en el tablero, por lo que podría asimilarse a una pila ficticia 14 bis entre las pilas reales 14 y 15. De hecho el apoyo vertical del tablero sobre la clave del arco se efectúa mediante aparatos POT similares a los del resto de pilas.

El arco tiene 120.00 m de luz, 50.40 m de flecha y se cimenta en zapatas escalonadas comunes con las pilas 14 y 15 para una tensión media admisible en el terreno de 0.70 MPa, por lo que es necesario una superficie de zapata de 17.00 x 15.50 m. La sección transversal del arco consiste en un cajón de 6.00 x 3.00 m con un espesor de tabique de 0.40 m y en su coronación se maciza para formar la clave. Sobre ella se ejecuta el tetón de 4.00 x 2.45 m con una altura de 3.80 m, que penetra en el tablero y se solidariza con él a través de bandas de neopreno zunchado. Además, el tetón se encuentra pretensado a la clave del arco a través de 10 cables de 33 T 15.

Para dar una idea de las deformaciones del tablero vale decir que, a pesar de situar el punto fijo cerca del centro del puente, es necesario disponer aparatos de dilatación de vía en ambos extremos del tablero, cuyas juntas pueden llegar a moverse 960 mm en el estribo 1 y 765 mm en el 2. Por otra parte, se hizo necesario ampliar 0.50 m en dirección longitudinal la plataforma horizontal de apoyo del tablero sobre cinco pilas extremas para poder absorber el rango de movimientos que iban a experimentar los aparatos POT.

Se ha instrumentado el tablero con el fin de disponer de datos que pueden ser recogidos en tiempo real vía radio.

4.2 Proceso constructivo

La Declaración de Impacto Ambiental no permitía el montaje de una cimbra convencional en la ejecución del arco, por lo que se decidió construir cada semiarco en posición cuasi vertical como si se tratara de falsas pilas. De hecho, para la puesta en obra se recurrió a la técnica de encofrado trepante arriostrado a la pila vecina, con la que comparte zapata. En esta fase el semiarco no se encuentra empotrado a la cimentación, sino que apoya en ella a través de una rótula de acero.



A continuación comienza el abatimiento del primer semiarco utilizando la pila vecina como puntal, disponiéndose dos familias de tirantes: los de retenida, dispuestos desde la cabeza de la pila puntal hasta la zapata de la siguiente pila y los de abatimiento, dispuestos desde la pila puntal a una traviesa-macizado prevista en la sección hueca del semiarco a 53.11 m de la base.



Se actúa alternativamente sobre los gatos de abatimiento (situados en la coronación de la pila puntal) y los de retenida (en la zapata de la siguiente pila), controlando los esfuerzos en la pila puntal por medio del control de los movimientos en cabeza hasta situar el semiarco en su posición final. A continuación se procede de forma similar con el otro semiarco.



Cuando ambos están en posición, se dispone un encofrado en clave y se hormigonan esta zona y el tetón que unirá el arco con el tablero.



A continuación se bloquean las rótulas y se hormigonan los arranques, configurando un arco biempotrado.



Por último se procede al destesado del sistema de abatimiento, actuando alternativamente sobre los tirantes de abatimiento y retenida para mantener acotados los esfuerzos en las pilas puntal.

En estas condiciones el arco ya puede recibir el paso de la autocimbra para ejecutar la fase 12 del tablero, que quedará anclado definitivamente en el tetón. Es el momento de liberar una coacción longitudinal provisional que desde el comienzo de la construcción del tablero ataba éste al estribo 2 a efecto de acciones longitudinales durante la fase constructiva.



Una vez que la autocimbra llega al estribo 1 y se da por finalizada la ejecución del tablero, puede procederse al desmontaje de la estructura metálica y se termina de construir el estribo con su correspondiente junta. Queda todavía pendiente la labor de remate de los diferentes tajos, restitución del terreno y limpieza.

Como es preceptivo se realizó la prueba de carga que arrojó resultados satisfactorios. Se procedió a la impermeabilización del tablero, colocación de canaletas, barrera de protección de aves, barandillas y acabados, así como a los trabajos de instalaciones ferroviarias. En línea con el respeto al entorno seguido durante la obra, se realizaron tratamientos de hidrosiembra y de restitución paisajística en la zona afectada.

En noviembre de 2006 se dieron por concluidos los trabajos con una inversión aproximada de 29.5 millones de euros.

5. Datos técnicos

Propiedad	ADIF
Dirección de obra	ADIF - INECO
Construcción	UTE Miraflores: AZVI – Puentes y Calzadas
Proyecto original y A.T. a la D.O.	Siegrist y Moreno
Proyecto constructivo	PROES Consultores
Asist. T. a la Construcción	PROES Consultores

Cuantías de materiales:

Hormigón en tablero	$0.87 \text{ m}^3 / \text{m}^2$
Acero activo en tablero	$36 \text{ kg} / \text{m}^2$
Acero pasivo en tablero	$139 \text{ kg} / \text{m}^2$
Acero en arco	$132 \text{ kg} / \text{m}^3$



L.A.V. TRAMO: SOTO DEL REAL-MIRAFLORES

VIADUCTO ARROYO DEL VALLE

Carlos SIEGRIST FERNÁNDEZ

Dr. Ingeniero de Caminos

SIEGRIST Y MORENO S.L.

csiegrist.sym@ciccp.es

Guillermo SIEGRIST RIDRUEJO

Ingeniero de Caminos

SIEGRIST Y MORENO S.L.

gsiegrist.sym@ciccp.es

Miguel Ángel UTRILLA ARROYO

Ingeniero de Caminos

SIEGRIST Y MORENO S.L.

bot.sym@ciccp.es

Resumen

El viaducto Arroyo del Valle está ubicado en el Tramo Soto del Real – Miraflores de la Sierra, del Nuevo Acceso Ferroviario al Norte y Noroeste de España. Se trata de un viaducto de 1755 metros de longitud con 25 vanos de 66 metros y dos vanos laterales de 52.50 metros. Lleva un arco ojival de 120 metros de luz al que se ancla longitudinalmente el tablero.

Palabras Clave: viaducto, arco, hormigón pretensado, autocimbra, descenso y giro.

1. Resumen de Características Principales

Esquema estático: Tablero en viga continua de hormigón pretensado

Longitud total: 1755 metros

Luces de los vanos: 52.50-25x66.00-52.50 metros

Altura máxima de la rasante: 75 metros

Anchura del tablero: Variable entre 17.60 y 14.00 metros en los 395 metros primeros y 14.00 metros contados a partir de este punto.

Punto fijo: Arco ojival central construido por trepas sucesivas, abatimiento de semiarcos y ejecución de dovela de cierre.



Fig. 1 Viaducto de Arroyo del Valle. Obra finalizada.

2. Condicionantes Fundamentales

El nuevo acceso ferroviario al Norte y Noroeste de España cruza el valle por el que pasa el arroyo del mismo nombre (arroyo del Valle), en el tramo Soto del Real-Miraflores de la Sierra, a una altura máxima de 80 metros desde la rasante de la línea ferroviaria hasta el fondo del valle, lo que da lugar a una estructura de unos 1755 metros de longitud, para poder construir el tablero con autocimbra entre los dos túneles.

Se pretende describir la solución construida adaptando el Proyecto de Construcción del Paso de la Línea Ferroviaria de Alta Velocidad, de Madrid a Valladolid pasando por Segovia, sobre un barranco entre los P.K. 500+100 y P.K. 502+000.

El trazado en planta, en la zona del viaducto, se desarrolla en recta, excepto los 300 metros primeros en que se desarrolla en una clotoide de parámetro 1784 metros.

El entreeje de vías, que era variable en el Proyecto de Construcción entre aproximadamente 9,20 metros en el inicio del viaducto, variando hasta llegar a los 6,00 metros en el P.K. 500+524,237 y a partir de este punto kilométrico y hasta el final del proyecto el entreeje de vías se mantenía en los 6,00 metros constante, pasó en el Proyecto Modificado a ser variable entre los 4,70 metros igual que en el resto de líneas de Alta Velocidad españolas y los 8,30 metros al final del viaducto.

El alzado se desarrolla en pendiente constante de 17,50 milésimas, excepto en la zona final en la que existe un acuerdo vertical convexo de parámetro 48.000 metros y longitud 696 metros, con pendiente final de 3 milésimas.

El entreeje variable de vías da lugar a una estructura de 14,00 metros de anchura para poder alojar el balasto y vías, los paseos peatonales, las canaletas de comunicaciones, los anclajes de los postes de catenaria, etc, que aumenta a 17,60 metros para tener en cuenta la separación variable entre ejes de vías, provocada por la existencia de los túneles en el tramo anterior al del presente proyecto.

El terreno admite cimentación directa, excepto en las pilas ubicadas en el fondo del valle que precisan cimentación por pilotes.

3. DESCRIPCIÓN

3.1 Tablero

El tablero es una viga cajón continua monocelular en toda la longitud del viaducto, de hormigón pretensado, con 27 vanos de 52,50-25x66-52,50 metros, con entregas en los extremos de 1,50 metros, que representan 1758 metros de longitud total.

El canto de la sección cajón, que se mantiene invariable en sus dimensiones exteriores en 39 metros de los vanos extremos y en los 39 metros centrales de los vanos de 66 metros, es de 3,20 metros en el eje de la estructura, que se corona con un bombeo del 2% a cada lado del eje, y varía parabólicamente en 27 metros centrados con los ejes de pilas, alcanzando los 5 metros en el eje de las mismas.



Fig. 2 Encofrado sección del tablero.

La anchura inferior del cajón es de 6,63 metros, en las zonas de canto constante, y paramentos laterales inclinados con una proyección horizontal de 1,50 metros para una altura de 4,54 metros. La sección se completa con dos voladizos laterales acartelados que tienen canto variable linealmente de 0,40 metros a 0,20 metros en el extremo, y que son de 2,75 metros de longitud hasta completar los 14,00 metros del ancho de plataforma en la zona en que ésta se mantiene constante. En las zonas sobre pilas de canto variable se mantiene la inclinación de los paramentos laterales hasta llegar

a una ancho inferior de 5,50 metros. En la zona de ancho variable del tablero se suplementan los voladizos hasta aumentar en 1,80 metros por cada lado con 0,20 metros de espesor.

El espesor de la losa inferior es de 0,30 metros en los 4,469 metros centrales de la sección, aumentando, mediante unas cartelas de longitud constante de 0,70 metros, hasta 0,60 metros en el contacto con las almas. Este espesor se aumenta a 0,60 metros, desapareciendo las cartelas, en el encuentro con las riostras de las pilas.

La losa superior, que se mantiene constante a todo lo largo, tiene 0,35 metros de espesor en el eje de la sección, incluyendo la prelosa de 5 cm de espesor, con paramento con bombeo del 2% en los 5,12 metros centrales, y cartelas dobles de 0,95 metros de longitud y 0,15 metros de canto en el contacto con las almas. Éstas tienen un espesor de 0,55 metros, excepto en las zonas de frente de fase donde se cruzan cables, en que el espesor aumenta a 1,60 metros.

La sección se maciza sobre pilas en una longitud de 2,50 metros y en estribos el macizado es de 2,50 metros. En todos los macizados de pilas se disponen agujeros de 0,80 metros de anchura y longitud variable en la losa inferior para facilitar la inspección de los aparatos de apoyo, así como puertas de 2,00x2,60 metros para circular por el interior del tablero, al que se accede por unos agujeros de 0,80x0,80 metros dejados en la losa inferior en las proximidades de los estribos.

El punto de anclaje frente a esfuerzos longitudinales se dispone en un arco ojival situado entre las pilas 14 y 15. La fijación al arco se realiza dejando un hueco de 4,416x2,55 metros en la vertical del apoyo en éste, en el que penetra un tetón solidario del arco que se pretensa contra los macizados del tablero que tienen 2,00 metros de espesor.



Fig.3 Conexión tablero-arco.

El pretensado del tablero se efectúa con 8 cables, cuatro por alma, con trazado parabólico, y cables rectos por las losas superior e inferior, cuyo número varía y potencia de acuerdo con el proceso constructivo y con la distancia al punto fijo.

El tablero se apoya en pilas, arco y estribos mediante aparatos de neopreno-teflón en caja de acero, de 1100, 2600 y 2800 t de capacidad de carga, disponiendo uno libre y otro guiado longitudinalmente en cada eje de apoyos.

3.2 Arco

Entre las pilas 14 y 15 se dispone un arco ojival al que se fija el tablero longitudinalmente.

Este punto no es el centro del viaducto, como sería de desear, ya que éste corresponde al centro del vano entre la pila 13 y la 14, pero ello conduciría a cimentar el arco en la pila que habría que disponer entre las pilas 14 y 15, en una zona que exige cimentación por pilotes por ser de arenas y arcillas cretácicas, lo que no es aconsejable en absoluto.

Por otro lado colocar el arco entre la pila 12 y la clave del arco dispuesto, tampoco es aconsejable, ya que hay una diferencia de cotas del terreno de unos 15 metros entre un arranque y el otro.

El arco tiene 120 metros de luz, y una flecha de 50,40 metros, y su directriz se ha encajado de forma que sea el antifunicular de su peso propio y de la reacción vertical del tablero debida al peso propio del tablero, la carga permanente y la mitad de la sobrecarga. De esta forma se tiene un arco ojival, en el que cada semiarco tiene una directriz circular de 312 metros de radio.

La sección del arco es constante, de 6 metros de ancho y 3,00 metros de canto, con bordes achaflanados y aligerada, con paredes de 40 cm de espesor.

La sección se maciza en el primer metro en arranques, y en clave, en una longitud de 4 metros medida en el intradós. En esta última sección se dispone un tetón de 2,45x4,00 metros y 4,50 metros de altura al que se ancla longitudinalmente el tablero.

A 19,64 metros de la clave se maciza la sección del arco en una longitud de 1 metro para anclar en esta zona los cables de descenso.

Las zapatas del arco, que son también las zapatas de las pilas 14 y 15, tienen 15,50 metros de anchura y 3,00 metros de canto, y una dimensión longitudinal de 17,00 metros, escalonada.



Fig.4 Vista general del arco en la Prueba de Carga.

3.3 Pilas

Las pilas son de sección cajón, ataluzadas en sentido longitudinal, con una sección en cabeza de 2,50x6,00m metros. El ataluzamiento tiene una pendiente de 2:10. Las paredes son de 35 cm de espesor. Se macizan en los 1,50 metros superiores, y llevan un hueco de 60 cm de altura y 2,50 metros de ancho, desde donde poder inspeccionar los aparatos de apoyo, que se sitúan a 4,00 metros de separación entre ejes.

Todas llevan cimentación directa, con zapatas comprendidas entre los 13,75x13,75x3 metros de la pila 16 y los 7x9,75x2 metros de la pila 25, excepto las pilas 8, 9 y 10, que están en la zona de arcillas arenosas y limosas del fondo del valle, que tienen cimentación profunda, a base de 16 pilotes de 1,50 metros de diámetro, arriostrados con un encepado de 14x14x3,75 metros.



Fig.5 Vista de pilas terminadas.

3.4 Estribos

Los estribos son muros de hormigón armado. El estribo 1 tiene 19,77 metros de altura de los que 16,30 metros son hasta la meseta de apoyo del tablero. El espesor del muro es de 1,30 metros aumentándose interiormente hasta 2,80 metros en el metro superior, ya que la meseta de apoyo tiene 2,50 metros, y el murete superior 30 cm de espesor. Lleva unos muros en vuelta de 4,20 metros de longitud y un 0,90 metros de espesor, con tres módulos de muros en vuelta de 6 metros de longitud cada uno y una aleta volada de 3,00 metros. Se cimenta sobre una zapata superficial de 18,50x7,75x1,75 metros.

El estribo 2 tiene 14 metros de altura, con 10,5 metros hasta la meseta de apoyo del tablero. El muro tiene 1,70 metros de espesor, y un murete superior de 30 cm de espesor. Lleva muros en vuelta de 17,90 metros de longitud

Se disponen juntas de chapa deslizando sobre chapa, en ambos estribos, para impedir la caída del balasto, así como canaletas en ambos laterales para conducciones, impostas con barandillas, sumideros para evacuación del agua del tablero y anclajes para postes de catenaria.

4. Proceso Constructivo

El sistema de construcción, tanto de pilas como del arco, ha sido el de encofrado trepante. El módulo de trepa de las pilas es de 4 m de altura, con un rendimiento en obra de una trepa por día de trabajo, empleándose en obra dos módulos, por lo que los rendimientos alcanzados fueron de 8 m de pila al día.

Los condicionantes de la DIA aconsejaron la no utilización de una cimbra convencional para la ejecución del arco, por lo que se optó por la solución de ejecutar el arco mediante dos semiarcos cuasi verticales adosados a las pilas adyacentes y una vez terminados, hacerlos girar, alrededor de una rótula provisional situada en su base, mediante cables de descenso y retenida, hasta su posición definitiva. Posteriormente se cierra la clave y en ella se construye un tetón que queda encastrado en el tablero al hormigonarse éste mediante la cimbra autoportante.

El módulo de trepa de los semiarcos fue también de 4 m. En cada semiarco se realizaron 13 trepas de 4 m y 7 trepas de diferentes desarrollos, para ajustarse a la generatriz del semiarco y a la necesidad, tanto en la primera trepa de conformar el anclaje de la rótula, como en la trepa correspondiente a la traviesa para el anclaje de los cables de descenso, de materializar ésta. Se emplearon dos módulos que permitieron ejecutar el semiarco Norte entre el 29/04/05 y el 22/07/05, y el Sur entre el 13/05/05 y el 05/08/05.



Fig. 6 Ejecución de semiarcos con encofrado trepante

El arco se ejecutó construyendo los dos semiarcos en posición vertical y abatiéndolos mediante cables de descenso y retenida anclados en la coronación de las pilas laterales y en las zapatas de las pilas adyacentes a éstas. Una vez colocadas en posición se procedió a hormigonar la clave y el tetón de anclaje del tablero.

Para poder realizar el descenso de los semiarcos se requería una resistencia mínima del hormigón de 30 MPa y una resistencia adicional frente al deslizamiento de las zapatas de retenida (pilas 13 y 16) de 6,9 y 4,02 MN respectivamente.

Para asegurar esa resistencia frente al deslizamiento, fue necesario anclar al terreno la zapata de la pila 13 mediante 49 barras Gewi $\varnothing 40$ dispuestas en una malla de 7 x 7 separadas 1,40 m y de una longitud de 2 m, entrando 1 m en el terreno, y en la pila 16 se construyó en su base un macizo de 5,35 x 7 x 3 m que se unió a la zapata por 15 $\varnothing 32$ de 3 m y se ancló la zapata al terreno mediante 8 anclajes de 980,7 kN y de una longitud de 14 m bajo zapata.



Fig. 7 Construcción de semiarcos por abatimiento

El descenso del semiarco Norte se realizó entre los días 27 y 28 del mes de julio de 2005. El elemento crítico en este proceso es la pila que actúa como puntal, por lo que el proceso de descenso se diseñó de forma que se minimizasen las solicitudes sobre la misma.

En la primera fase del proceso (Fase 0) se realizaron una serie de lecturas para determinar la rigidez real de la pila. Las flexiones en la pila son función de los movimientos inducidos en su cabeza y éstos no debían ser en ningún caso superiores a 64 mm respecto a la posición de reposo. Durante todo el proceso se controlaron estos movimientos, teniendo en cuenta para su corrección los posibles movimientos de la pila debidos a su incurvación por gradientes térmicos. Igualmente se controlaron las fuerzas en los cables, en cada fase.

El descenso del semiarco Sur se efectuó los días 9, 10, y 11 de agosto de 2005 mediante un proceso idéntico al del semiarco Norte, procediéndose al cierre de la clave, hormigonado de las zonas de rótulas y conformación del tetón entre el 12 de Agosto y el 1 de Octubre, fecha en que llegó la cimbra a posicionarse para realizar el vano que se apoya en la pila 15 y en la clave del arco. Dicho vano quedó terminado el día 15 de Octubre de 2005.

Merece destacarse la operación de cierre de la clave del arco y construcción del tetón de anclaje, no sólo por la dificultad intrínseca de un trabajo realizado a gran altura sino también por la dificultad técnica de su realización en fases.

El tablero se construyó con una cimbra autolanzable de 157 metros de longitud y 950 t de peso, disponiendo las juntas de construcción a 13,50 metros de los ejes de pilas.

El tablero del viaducto se construyó avanzando vano a vano en 27 fases, estableciendo juntas de construcción a cuartos de la luz y avanzando desde el estribo 2 en sentido de p.k's decrecientes. La primera fase tiene una longitud de 67,50 metros, las veinticinco posteriores 66,00 metros y la última 40,50 metros.

La cimbra autolanzable se apoya en unas ménsulas provisionales dejadas en cabeza de las pilas y en el voladizo de la zona de tablero ya construida durante el hormigonado de la fase correspondiente.

La luz entre pilas (66 m) ha requerido la fabricación de una cimbra autoportante nueva, ya que las existentes en el país no servían para alcanzar tal luz. Con este mismo motivo se cambió el proyecto original de canto constante a una sección acartelada de canto variable a fin de aligerar al máximo el peso que gravita sobre la cimbra.

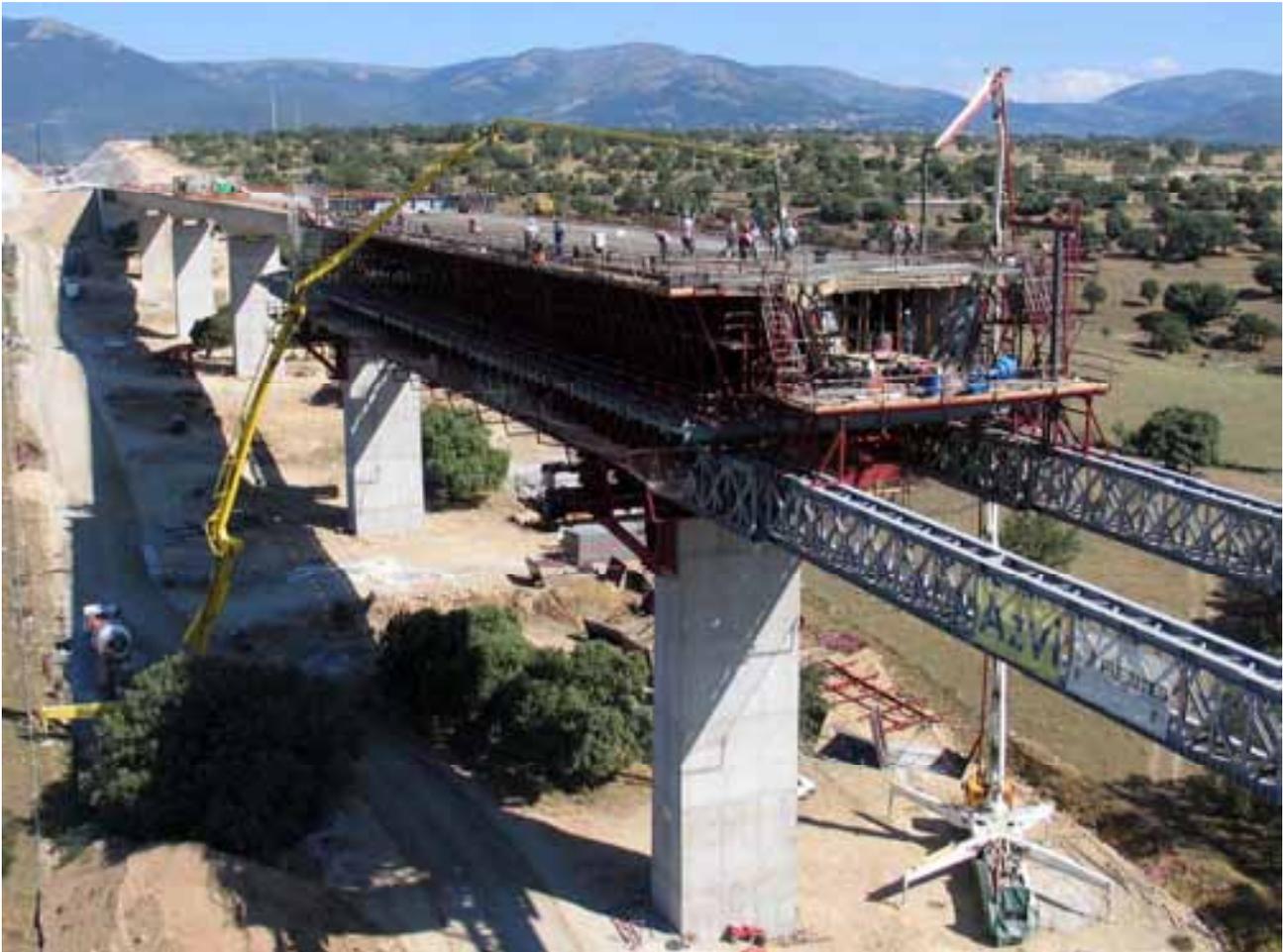


Fig. 8 Cimbra empleada en Arroyo del Valle

El primer montaje de cimbra, requirió 2 meses de trabajo dadas las dimensiones y peso de la cimbra. Ejecutado dicho vano, hubo que proceder a correr la cimbra y simultáneamente ir montando los elementos de cola de la misma hasta que quedó terminado el segundo montaje y la cimbra lista para la ejecución de los vanos de 66 m. Este proceso duró un mes. A partir de este momento los trabajos adquirieron "velocidad de crucero", con una producción de un vano de 66 m cada dos semanas, hormigonando la sección en dos fases: La 1ª fase comprende fondo y hastiales del cajón y la 2ª losa, con los voladizos.

Finalizado el vano que apoya en la Pila 15 y clave del arco, los trabajos continuaron al ritmo señalado en el Plan de Obra (un vano cada 15 días) hasta llegar al último, Pila 1-Estribo1, para cuya realización fue necesario desmontar las puntas de la cimbra y parte de las baterías, así como reposicionar los paneles del encofrado. Esta operación requirió la instalación de castilletes auxiliares para el apoyo de la cimbra. La realización completa de este último vano consumió 45 días de trabajo.

Simultáneamente a la ejecución de los vanos y sobre la parte de tablero ya ejecutada y con el desfase necesario por motivos de seguridad, se trabajó en el tablero para ejecutar los muretes guardabalasto, canaletas para cables, la barrera de protección de aves y la impermeabilización.

En el interior del tablero se realizó la instalación para la iluminación que permita un cómodo y seguro trabajo de mantenimiento y se procedió a la instalación de la instrumentación en la zona del arco que permite enviar en tiempo real, vía teléfono móvil, los datos de los elementos instalados, que son almacenados en un ordenador y pueden ser consultados y analizados mediante el acceso restringido a una página web en Internet. Una vez se encuentre instalada la fibra óptica para la explotación de la vía, los datos que genere la instrumentación serán transmitidos por la misma.

Paralelamente se realizaron los trabajos de restitución del terreno, mediante aportación de tierra vegetal e hidrosiembra y plantaciones.

Coincidiendo en el tiempo con los trabajos de restitución se realizó la prueba de carga de la estructura con resultados satisfactorios, empleando para la medición de las flechas tanto sistemas convencionales como modernos sistemas de lectura láser.

Con la finalización de los trabajos de restitución paisajística se dio por finalizada la obra con fecha 12 de Noviembre de 2006, tal y como estaba previsto en el Plan de Obra.



Fig. 9 Viaducto de Arroyo del Valle.

5. Ficha técnica

Tabla 1 Principales entidades involucradas en el proyecto y ejecución del Viaducto

<p>Propiedad</p> <p>“Nuevo Acceso Ferroviario al Norte y Noroeste de España. Madrid – Segovia – Valladolid – Medina del Campo”</p>	<p>ADIF</p>	<p>José Luis Martínez Pombo (Gerente del Tramo) José Manuel Carbonell Porras (Director de Obra) Paloma Paco Gómez (Director del Proyecto)</p>
<p>Ingenieros de Caminos Autores del Proyecto</p>	<p>Proyecto original</p> <p>Asistencia Técnica a la Empresa Constructora</p> <p>Asistencia Técnica a la Dirección de Obra</p>	<p>SIEGRIST Y MORENO S.L./ INOCSA Carlos Siegrist Fernández</p> <p>PROES S.A. Florencio del Pozo</p> <p>SIEGRIST Y MORENO S.L. Carlos Siegrist Fernández</p>
<p>Ejecución del Viaducto</p>	<p>Empresa Constructora: U.T.E. Soto del Real: Azvi – Puentes y Calzadas empresa constructora, S.A.</p> <p>Asistencia Técnica a la Constructora</p> <p>Asistencia Técnica a la Dirección de Obra</p> <p>Empresa Consultora, Coordinación</p>	<p>Juan María Loureda Mantiñán (Gerente de la UTE) Juan Pérez Torres, Juan Ignacio Contreras, Ricardo Colastra (Jefes de Obra)</p> <p>PROES S.A. Florencio del Pozo</p> <p>INOCSA Ingeniería S.L. SIEGRIST Y MORENO S.L.</p> <p>INECO, S.A.</p>