

Puente arco de alta velocidad sobre el río Almonte



Guillermo Capellán Miguel

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.

Director Técnico de Arenas & Asociados

Resumen

La línea de alta velocidad Madrid-Extremadura salva el río Almonte a su llegada al embalse de Alcántara mediante un viaducto constituido por un gran arco de hormigón de alta resistencia con tablero superior y luz de 384 m. Esa luz convertirá al puente en el año 2015, cuando está previsto que se concluya, en el mayor arco para ferrocarril de alta velocidad del mundo. A causa de esa excepcionalidad, son necesarias una serie de comprobaciones específicas y análisis singulares para encarar su diseño y construcción. Se describen en este artículo las decisiones principales de diseño, incluyendo la elección de tipología, obtención de la directriz antifunicular, análisis del comportamiento frente a viento y túnel de viento, así como el análisis mediante modelos no lineales evolutivos complejos.

Palabras clave

Puente arco, alta velocidad, río Almonte, directriz antifunicular, efectos aerolásticos, cálculo dinámico, cálculo no lineal

Abstract

The high speed railway line Madrid-Extremadura crosses over the Almonte River at its arrival at Alcántara reservoir through a viaduct that consists of a large arch bridge of high strength concrete with superior deck and 384 m main span. That span will turn the bridge in 2015, when it is scheduled to be completed, into the largest arch bridge for high-speed railway in the world. Because of this uniqueness, a number of specific verifications and analysis are necessary to address its design and construction. Major design decisions are described in this article, including the choice of typology, obtaining of the antifunicular form for the arch, wind analysis and wind tunnel studies, and complex nonlinear time dependent models analysis.

Keywords

Arch bridge, high speed railway, Almonte river, antifunicular form, aerolastic effects, dynamic analysis, nonlinear analysis

Datos del proyecto

Propiedad: ADIF.

Director de Obra: Pablo Jiménez Guijarro (ADIF).

Proyecto: Arenas & Asociados-IDOM.

Contratista: UTE AVE Alcántara-Garrovillas (FCC-Conduril).

Oficina Técnica Ingeniería Construcción: Servicios Técnicos FCC.

Asistencia Coordinación de la Obra: IDOM-Arenas & Asociados.

Asistencia Técnica: INES.

Ficha de características técnicas

Longitud: 996 m.

Luz principal: 384 m.

Número de vanos: 23.

Hormigón HA-80 en el arco: 9.748 m³.

Hormigón resto de la estructura: 44.351 m³.

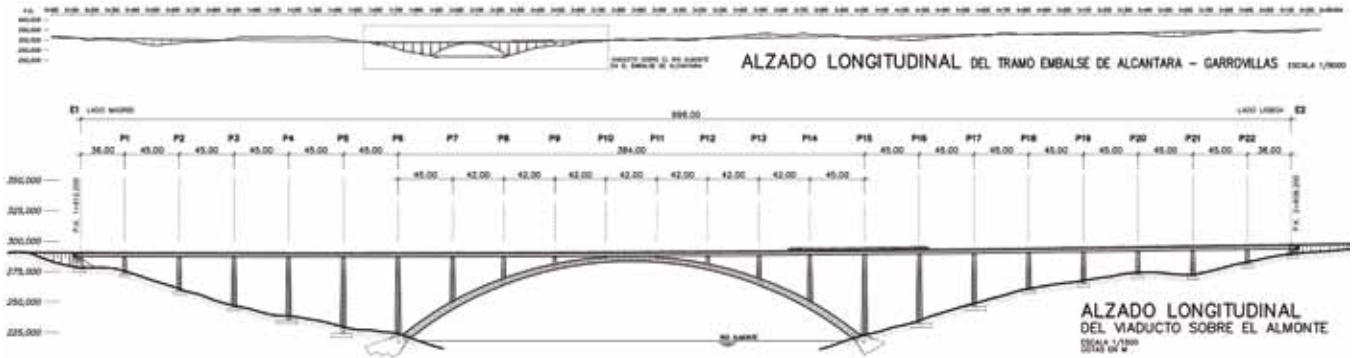
Armadura B500: 7.255 ton.

Acero de pretensado: 541 ton.

Acero en tirantes provisionales: 857 ton.



Figs. 1 y 2. Fotomontaje y Alzado del Viaducto sobre el río Almonte (fuente: Arenas & Asociados)



La línea de alta velocidad Madrid-Extremadura cruza sobre el río Almonte en la cola del embalse cacereño de Alcántara mediante el viaducto del río Almonte de 996 m de longitud, que sobrevuela el embalse con un gran arco de hormigón de tablero superior y 384 m de luz principal, lo que le convertirá en el puente arco de alta velocidad con mayor luz del mundo.

Ahora que las obras están avanzadas es posible observar la magnitud de esta estructura que no transmiten por completo las fotografías, y que sólo podíamos imaginar durante la redacción del proyecto.

El puente forma parte del tramo Embalse de Alcántara-Garrovillas dentro de la línea destinada en origen y a futuro

para conectar Madrid y Lisboa mediante ferrocarril de alta velocidad, prevista para tráfico mixto de pasajeros con velocidad máxima de 330 km/h y de mercancías hasta 100 km/h.

La imposibilidad de disponer pilas en el cauce del embalse y la Declaración de Impacto Ambiental condujeron al vano de 384 m que sitúa los arranques del arco justo por encima del nivel máximo de las aguas del embalse (cota 218 m), que en ningún caso puede alterar su funcionamiento como aprovechamiento hidroeléctrico por el desarrollo de las obras. Durante buena parte de las mismas hemos visto el embalse en su nivel máximo a punto de desbordar las penínsulas provisionales de protección realizadas para la ejecución de las cimentaciones del arco, ratificando la elección de la luz adoptada.

Tanto el diseño como la definición del proceso constructivo elegido que condiciona este diseño, han buscado desde el comienzo del proyecto conjugar la viabilidad técnica y la optimización de medios y costes de una actuación tan singular como ésta.

El viaducto está localizado entre los puntos kilométricos 1+612.200 y 2+608.200 y se sitúa en una recta en planta. En alzado existe un acuerdo vertical que genera un punto bajo en el punto kilométrico 1+815.198 siendo la pendiente máxima viaducto de 14,6 por mil. La rasante alcanza una altura máxima sobre el río Almonte de unos 80 m. Esto permite el encaje de un arco de altura 69 m, es decir una relación clásica de flecha/luz de 1:5,6, una vez seleccionada la tipología de puente arco.

La infraestructura cuenta con veintitrés vanos de tablero ejecutados con autocimbra superior, con luces tipo de 45 m entre pilas fuera del arco y de 42 m sobre las pilastras apoyadas en el arco.

Elección de tipología

Durante las fases iniciales del proyecto se analizaron las distintas variantes estructurales en un estudio tipológico detallado considerando de forma simultánea su comportamiento final así como el procedimiento constructivo. Algunas

de estas alternativas incluían soluciones atirantadas, de tipo pórtico, y tableros de tipo viga celosía de canto variable. Las soluciones de procedimiento constructivo incluían distintas variantes de avance en voladizo, la erección de un tramo central metálico, etc.

El análisis multicriterio llevado a cabo destacó la solución arco como la más económica, la de mejores condiciones de durabilidad y mantenimiento, y la que garantizaba un mejor comportamiento estructural frente a fenómenos dinámicos y de viento, como vemos más adelante. Esta preocupación por la durabilidad ha sido una constante durante el proceso de proyecto y ejecución de las obras, buscando legar una obra que resista de la mejor forma el paso del tiempo con el menor mantenimiento. Para ello la elección del hormigón, la geometría del arco, el desarrollo de los cálculos y la definición del procedimiento constructivo en ausencia de fisuraciones, resulta definitivo.

La elección de la tipología tiene también mucha relación con los condicionantes no sólo del emplazamiento, con la elevada altura de rasante y buenas condiciones de cimentación directa en roca, sino de las propias peculiaridades de los puentes ferroviarios de alta velocidad, en este caso de gran luz. Las particularidades que se dan en estos puentes son unas cargas de tráfico mucho mayores

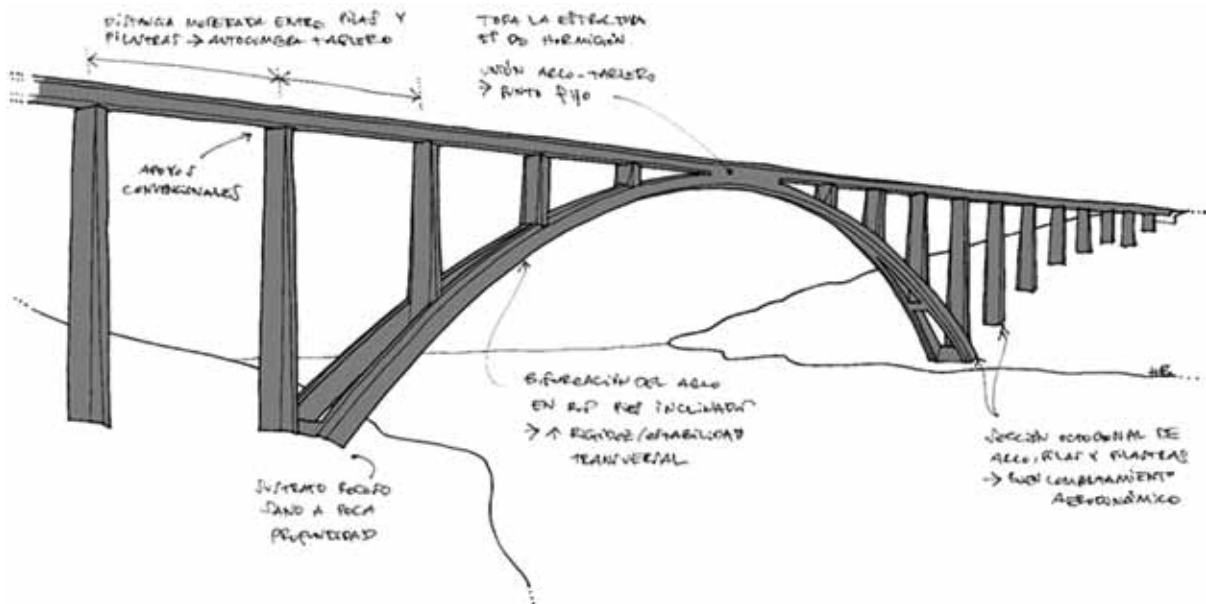


Fig. 3. Croquis de la solución arco de tablero superior (fuente: Héctor Beade, A&A)

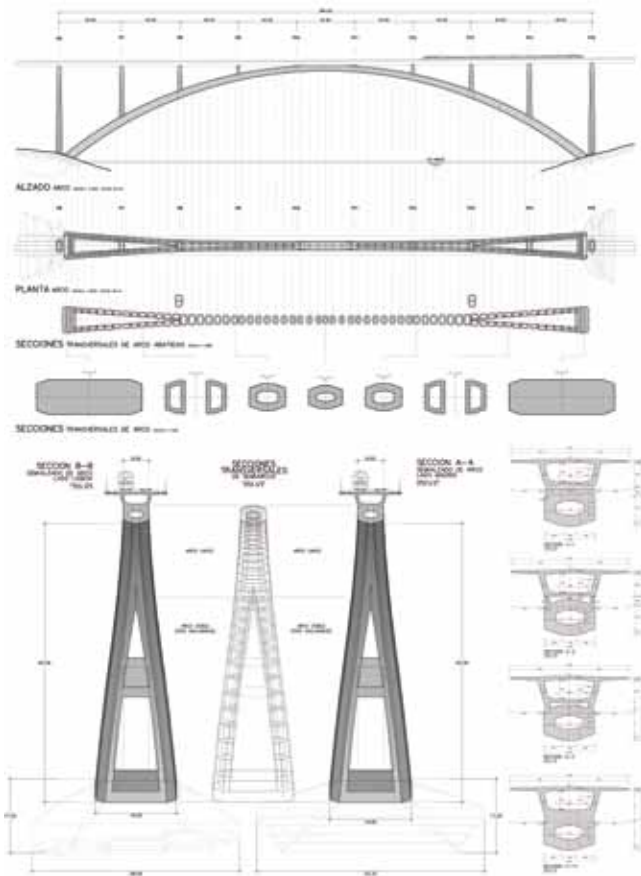


Fig. 4. Planos de geometría del arco (fuente: Arenas & Asociados)

que las de carretera, unos efectos dinámicos por el paso de los convoyes, unas cargas horizontales notables y un trabajo de fatiga que no se puede despreciar. Todo esto debe conjugarse con unas consideraciones funcionales muy estrictas para que el nivel de servicio de la estructura no deba limitarse en ningún momento: deflexiones y aceleraciones permisibles pequeñas y una longitud entre juntas de dilatación de vía limitada por motivos tecnológicos. Dadas esas particularidades, las luces mayores de 100 m hasta ahora han sido inusuales en los puentes para ferrocarril de alta velocidad y, por tanto, la luz que ha sido necesario adoptar para salvar el embalse de Almonte entra dentro de un rango excepcional.

A esto se une en el caso del viaducto del Almonte que transcurre a una altura de más de 80 m sobre la lámina de agua y con altura de pilas de hasta 65,3 m, la preocupación por los efectos aerolásticos y aerodinámicos de viento y las de-

formaciones transversales bajo éstas y el resto de cargas horizontales.

El arco es una estructura de baja deformabilidad vertical, no en vano el canto efectivo del sistema estructural o la “viga equivalente” es la flecha del arco, es decir 69 m, en este caso. Para limitar la deformabilidad lateral y mejorar su comportamiento a viento se actúa definiendo una sección octogonal del arco aerodinámica frente al viento, buscando la mayor esbeltez del arco, y abriendo en transversal su sección en arranques en dos pies inclinados curvos que aumentan el brazo resistente en esta dirección.

Descripción de elementos de la estructura

El ancho total del tablero es de 14 metros. La sección transversal del tablero está formada por 10,1 metros centrales para alojar el balasto de la plataforma, dos muretes guardabalasto de 0,2 m y espacios laterales para alojar impostas, canaletas, paso de servicio, barreras y protecciones de aves.

Se trata de una estructura de tablero hiperestático, con sección cajón de hormigón pretensado ejecutado in situ. La construcción se plantea en fases sucesivas, mediante autocimbra. Su configuración es la de un tablero estándar para puentes multivano de alta velocidad de vanos tipo de 45 m en accesos ejecutado con autocimbra, lo que colabora a la reducción de costes y mejora de rendimientos en su ejecución, pudiendo extender el mismo procedimiento constructivo a todo lo largo del tablero, incluso sobre el arco sobre el embalse, sólo reduciendo el vano tipo a 42 m para adaptarse a la longitud del vano y las diferentes condiciones de apoyo.

El tablero se resuelve mediante una sección cajón de hormigón pretensado de canto constante 3,1 metros (relación luz/canto 1/15). Los voladizos del cajón son de 3,25 metros y el ancho de la parte superior del núcleo del cajón es de 7,5 metros. La anchura del fondo del núcleo es de 6 metros.

El pretensado e los vanos de acceso está formado por 4 familias de 3 tendones (6 tendones por alma) de 27 cordones de 0,6”. En los vanos sobre arco se mantienen estas 4 familias de 3 tendones (6 por alma) pero son de 31 cordones de 0,6”. Además se disponen familias adicionales sobre pila o en centro de vano como refuerzo en tramos principales sobre el arco.

El arco, de hormigón de alta resistencia HA-80 autocompactable, tiene una sección ortogonal hueca en sus 210 m centrales bifurcándose a continuación en dos pies de sección hexagonal irregular también hueca hasta sus arranques, para dotarlo de mayor estabilidad transversal. Ambos pies se arriostran entre sí en el empotramiento entre la segunda pila (comenzando desde los arranques) y el arco. La sección octogonal tiene un comportamiento aerodinámico adecuado, muy beneficioso en grandes luces como la que estamos considerando. La sección varía entre los 6 m de ancho central y canto de 4,8 m, y un ancho total de 19 m entre ambos pies y 6,9 m de canto, lo que supone una relación luz/canto variando entre 1/80 y 1/56.

Las pilas del viaducto, tanto las que se cimientan sobre el terreno como las que se apoyan en el arco (también denominados montantes o pilastras), tienen sección octogonal variable, cuya aerodinámica es beneficiosa en el vano del arco dada su gran luz, que se mantiene en las pilas de los vanos de acceso para mantener el equilibrio visual del conjunto. La altura de pilas alcanza los 65.3 m. Los estribos son de hormigón armado, cerrados con aletas en vuelta.

El apoyo del tablero sobre pilas y estribos se materializa mediante apoyos de neopreno confinado tipo 'POT' con teflón en parejas de apoyos libres y guiados con restricción transversal.

El punto fijo se sitúa en el centro del arco, materializado mediante una unión entre el arco y tablero que permite transmitir los esfuerzos horizontales de frenado y arranque al arco. De esta forma las longitudes de movimientos horizontales debidas a las variaciones de temperatura y reología del hormigón que han de asumir los estribos son los correspondientes a 450 y 546 m respectivamente, perfectamente asumibles.

Las cimentaciones de arco, pilas de vanos de acceso y estribos se resuelven mediante zapatas sobre el sustrato rocoso. Cada arranque del arco y su pila adyacente cuentan con una cimentación conjunta. Las cimentaciones de los arcos son unos grandes macizos cajeados en la roca cuya ejecución requiere de penínsulas provisionales de protección para bajar por debajo del nivel máximo de aguas del embalse.

Cálculo estructural e Influencia del encaje de la directriz del arco en el diseño del arco

A consecuencia de la naturaleza de la propia estructura, de las condiciones de servicio, y del método constructivo el análisis estructural debe incluir:

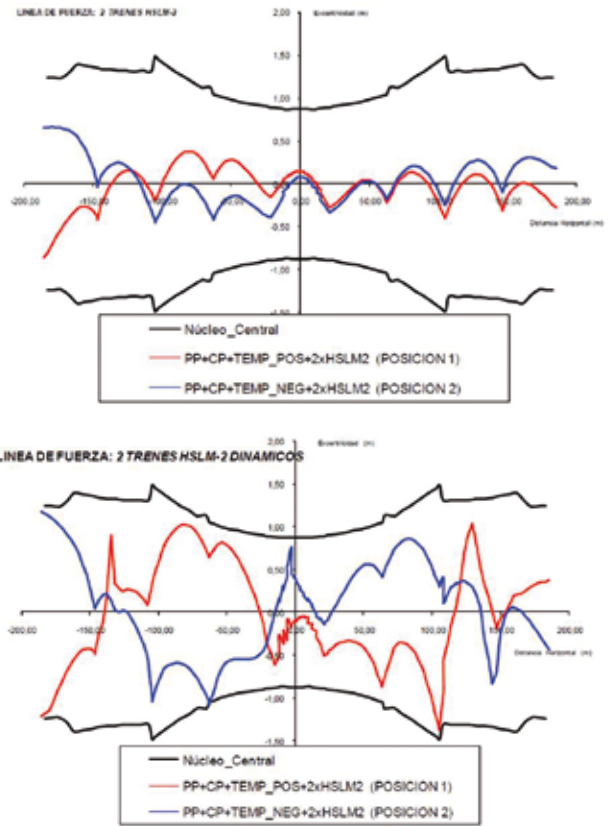


Fig. 5. Líneas de fuerza a lo largo del arco para cargas ferroviarias sin y con efectos dinámicos respecto al núcleo central

- El estudio de la directriz óptima del arco en base al cálculo de la antifunicular de las cargas.
- El análisis detallado de las fases constructivas.
- La valoración de estado límite de servicio y último con modelos de cálculo no lineales.
- El análisis dinámico detallado.
- Entre los estudios especiales se ha de señalar la confirmación de los resultados de los estudios analíticos realizados del comportamiento de la estructura frente a las cargas de viento, mediante la realización de estudios experimentales con ensayo en túnel de viento.

En el diseño de puentes arco la búsqueda de la geometría de su directriz es un punto clave del diseño, ya que si es



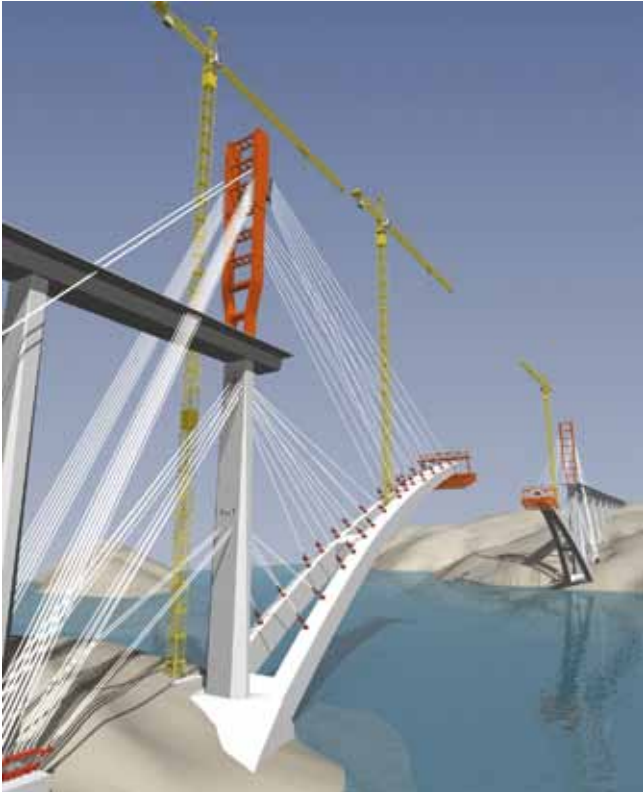
la adecuada trabajará por forma, es decir, sometido sólo a tensiones normales de compresión en todos y cada uno de sus puntos, funcionando como antifunicular de las cargas. De esta forma el material constituyente del arco está exento de tracciones y, al no fisurar el hormigón, se garantiza la durabilidad del puente con un mantenimiento mínimo además de economizar en las cuantías de acero que son las que, dado el caso, deben resistir las tracciones.

En el caso de los ferrocarriles de alta velocidad, la búsqueda de la directriz antifunicular en los grandes arcos ferroviarios impone una nueva realidad en la metodología empleada hasta la fecha en el encaje de la misma: en el ferrocarril los trenes de carga correspondientes al material móvil suponen importantes deformaciones y, por tanto, esfuerzos de flexión de valor absoluto considerables.

Se convierte por ese motivo en pieza importante del diseño de un puente arco la decisión de si se acepta fisuración en el arco en situaciones de servicio o no. Se da el caso particular de que aceptar una fisuración limitada del arco en ciertas situaciones de servicio, hace difícil y encarece el cumplimiento de las deformaciones límites para el servicio de la estructura, ya que las fisuras degradan la rigidez de la estructura. Es decir, cuando esta degradación de la rigidez ocurre en un



Figs. 6 y 7. Túnel de viento en situación constructiva y final (fuente: Oritia y Boreas)



Figs. 8 y 9. Infografía explicativa del procedimiento constructivo desarrollado durante el proyecto, y Estado actual de las obras (fuente: Santiago Guerra y Eduardo Rojo, A&A)

arco, los movimientos con los que responde a las cargas son mayores, y para lograr unas flechas admisibles adecuadas al uso ferroviario sería necesario dimensionar el puente para las inercias en fisuración, o sea, sería necesario aumentar la cantidad de material y el canto en comparación a si se pudiese evitar la fisuración. Es por eso que en los puentes arco de ferrocarril es aconsejable un criterio general de evitar la fisuración ante sobrecargas en situaciones de servicio aprovechando las herramientas en juego.

Hay que tener en cuenta también la influencia de los efectos dinámicos sobre los esfuerzos de sobrecargas sobre la envolvente de excentricidades que debe situarse dentro del núcleo central del arco.

Para las situaciones de Estado Límite Último (ELU), resulta prácticamente inevitable evitar la fisuración con las solicitaciones producidas por las cargas mayoradas y las resistencias de los materiales minoradas, por lo que todas las comprobaciones referidas del comportamiento global del arco y la estabilidad del mismo en situaciones

de ELU deben hacerse teniendo en cuenta los efectos de la fisuración.

Es necesario seleccionar la directriz que minimiza los esfuerzos de flexión en el arco teniendo en cuenta el proceso constructivo y estos efectos dinámicos, y de forma simultánea seleccionar el canto más adecuado, que define su rigidez y la altura de su núcleo central. Este proceso de cálculo es necesariamente iterativo, no lineal y considerando todas las fases de la ejecución, lo que lo hace muy complejo, pero sin embargo fundamental para el objetivo de durabilidad buscado.

Otros análisis que en esta estructura resultan fundamentales para evaluar su comportamiento incluyen la influencia de la no linealidad del material y geométrica. Estos comprenden la evaluación de la retracción y fluencia, el control de la fisuración del hormigón durante las fases de la secuencia de construcción y en servicio con el puente terminado, la no linealidad de las ecuaciones constitutivas del acero y del hormigón. Además, la consideración de la no linealidad



Figs. 10 y 11. Ejecución de pilas y tablero. Carros de avance de arcos
(fuente: Ignacio Meana Martínez, ADIF)

geométrica y los efectos de segundo orden considerando imperfecciones de montaje. Así como también el cálculo dinámico y control de la deformabilidad de la estructura para cumplir los criterios de funcionalidad para la seguridad y confort de los usuarios.

Comportamiento frente a viento y ensayos de túnel de viento

En estructuras de luz superior a 200 m, el comportamiento de la estructura frente a las cargas de viento es un factor clave en el diseño y de obligado estudio. El canto del arco debe ser lo más reducido posible para presentar una menor superficie expuesta al viento, y la forma de la sección transversal debe optimizarse en base al conocimiento de las propiedades del flujo del viento con un perfilado efectivo como para establecer un arco compacto y opaco al viento. Sin embargo además debe poseer la inercia suficiente para hacer frente a los momentos flectores concomitantes provenientes de las cargas de tráfico. El resultado de todo el análisis anterior conduce a que el puente sobre el río Almonte tenga una sección hueca, que cumple los

requisitos de compacidad y, por tanto, perturbación menor del flujo aéreo con el menor peso. La sección es de forma octogonal con chaflanes pronunciados que afilan su perfil para los vientos de dirección horizontal. El análisis en túnel de viento sobre modelo reducido ha confirmado la bondad del diseño.

Se han realizado modelos seccionales del arco y del tablero, y modelos globales de túnel de viento a escala 1:210 del viaducto tanto en situación de estructura completa como en construcción en situación de voladizo con el atirantamiento provisional, teniendo en cuenta la orografía del terreno. La medición de velocidades de viento y aceleraciones de la estructura real durante la construcción va a permitir evaluar con un nivel de precisión sin precedentes el comportamiento estimado en los estudios de viento llevados a cabo en la Universidad de Western Ontario (Canadá).

Desarrollo de las obras

La construcción del puente comenzó en abril de 2011 y su finalización está prevista para final de 2015. El procedi-



Fig. 12. Vista panorámica del estado actual de las obras (Fuente: Eduardo Rojo)



Fig. 13. Vista aérea general de la ejecución del viaducto sobre el río Almonte (fuente: FFCC)

miento de ejecución principal para el arco es el de avance en voladizo con atirantamiento provisional siguiendo la misma secuencia considerada en el proyecto de construcción.

La construcción comenzó con la ejecución de las cimentaciones y la erección de alzados de estribo y pilas con encofrado trepante. El tablero de ambos accesos se ejecuta con autocimbra hasta alcanzar el vano anexo al tramo de tablero sobre el arco.

Para la materialización de los puntos de retenida de los cables de contrarresto del atirantamiento provisional se realizan anclajes al terreno en las cimentaciones de las pilas anexas a las que llegan los tirantes. Estos anclajes se ensayan y se instrumentan para su control.

La ejecución mediante avance en voladizo del arco requiere la construcción de unos carros de avance de encofrado de gran complejidad que permiten variar todas las dimensiones de la sección para adaptarse a sus formas variables. Los

carros son dos por arco en los pies inclinados curvos en arranques para luego combinarse y conformar un carro único en la zona central del arco. Cada dovela tiene una longitud en proyección en planta aproximadamente 6 m, lo que supone longitudes desarrolladas de entre 6.80 y 6.20 m.

Los tirantes se anclan en las primeras dovelas del arco en la pila sobre el arranque del arco, pero a partir de una determinada dimensión del voladizo su dimensión resulta insuficiente y es necesaria una torre de atirantamiento provisional. Esta torre de atirantamiento provisional desarrollada por los servicios técnicos de FFCC constituye una estructura en sí misma, con una altura de más de 50 m sobre el tablero, articulada en la base. Su montaje se realiza mediante giro de abatimiento con respecto a esta rotula inferior.

En el momento actual de las obras se han ejecutado 16 dovelas del arco en el lado sur y lado norte, encontrándose



justo en la conexión entre los pies inclinados y el arco central, lo que supone un voladizo de 90 m en planta.

El proceso de ejecución está siendo monitorizado con una instrumentación con medición continua que incluye clinómetros, acelerómetros, galgas extensométricas, células de carga en tirantes de retenida, medidas topográficas automatizadas y medidas meteorológicas de viento y temperatura. Registrándose todos estos valores para su evaluación permitiendo detectar desplazamientos o cambios en las frecuencias de vibración de la estructura que alerten de cualquier cambio o anomalía en el comportamiento de la misma.

Conclusiones

El estado actual y los avances de la técnica y la construcción han permitido proyectar y afrontar la ejecución de este gran reto de la ingeniería. Entre ellos hay que señalar los hormigones de altas prestaciones, las herramientas de cálculo avanzado no lineal y evolutivo, la modelización aerolástica, y los tratamientos semiprobabilísticos normativos, como elementos clave para el diseño y la validación de la garantía estructural del puente sobre el río Almonte. El uso conjunto e intensivo de todos ellos ha permitido superar los rangos de luz que hasta ahora se habían establecido para puentes ferroviarios de alta velocidad, resaltando la importancia de las elevadas sobrecargas, la influencia de la amplificación dinámica de sus efectos y del comportamiento no lineal tanto geométrico como del material para valorar con precisión los niveles de seguridad con los que se dimensiona y se construye esta estructura. **ROP**



Figs. 14 y 15. Vistas de la ejecución en voladizo de los arcos con atirantamiento provisional (fuente: Eduardo Rojo, A&A y FCC)