

Puente sobre el río Tajo en el embalse de Alcántara para ferrocarril de alta velocidad



Javier Manterola Armisén

Doctor ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.

Consejero delegado de Carlos Fernández Casado, S.L



Antonio Martínez Cutillas

Doctor ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.

Carlos Fernández Casado, S.L



Borja Martín Martínez

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.

Carlos Fernández Casado, S.L

Resumen

Ubicado en la Línea de Alta Velocidad Madrid-Extremadura, el viaducto tiene una longitud total de 1.488 m. La distribución de luces del viaducto viene influenciada por el salto del Río Tajo, el cual se realiza mediante un arco de 324 m de luz, fragmentándose el tablero sobre el mismo en seis vanos de 54m. Los vanos de acceso se plantean de 60 m, intercalándose entre ellos dos vanos de transición de 57 m, uno a cada lado del arranque del arco. El elemento emblemático del viaducto es el citado arco. De directriz curva, consta de un cajón variable en canto entre 3,5 m y 4 m y en ancho entre 12 m en arranques y 6 m en clave. Con sus 324 m de luz principal, superará en más de 60 m al puente sobre el embalse de Contreras, el mayor puente arco ferroviario de hormigón ejecutado hasta la fecha en España.

Palabras clave

Ferrocarril de alta velocidad, arco de hormigón armado, voladizos atirantados, carro de avance, cimbra autoportante

Abstract

Located in the High-Speed Railway Line Madrid-Extremadura, the bridge has a total length of 1488m. The span distribution is influenced by the crossing of the Tajo River, which takes place with an arch, 324m long, and dividing the deck over it in six spans of 54m each one. The approach spans are 60m long, inserting two transition spans of 57m.

The emblematic element of the bridge is aforementioned arch. With curve directrix, it is formed by a hollow variable section between (4.00 m – 3.50 m wide; 12.00 m – 6.00 m high). With its main span length of 324m, it will surpass the bridge over the Contreras Reservoir, currently the largest railway arch bridge executed in Spain.

Keywords

Arch bridge, concrete, high-speed railway, cable-stayed cantilever construction

Datos del proyecto: Viaducto sobre el Río Tajo en el Embalse de Alcántara

Promotor: ADIF Alta Velocidad.

Director del proyecto: Ignacio Meana.

Autores del proyecto: Javier Manterola, Antonio Martínez, Borja Martín, Miguel Ángel Gil, Silvia Fuente y Lucía Blanco.

Empresa consultora: Carlos Fernández Casado, S.L. y Tyspa.

Director de obra: Juan Antonio Hermoso Marín (ADIF Alta Velocidad).

Director de contrato: Luis Alberto Dou Cortiguera (ADIF Alta Velocidad).

Asistencia Técnica Dirección de Obra: UTE AYESA-IDEAM –Ángel Francisco García Rodríguez (jefe de Unidad) y Carlos Jiménez Solanas (jefe de Oficina Técnica)–.

Empresa Constructora: UTE COPISA-COPASA –Manuel Molina Rivas (gerente) y Pablo Hurtado del Rincón (jefe de Obra)–.

Asistencia Técnica a la Constructora: Carlos Fernández Casado, S.L –Antonio Martínez, Borja Martín, Héctor Faúndez, Manuel Escamilla, Luis Miguel Salazar–.

1. Introducción

El proyecto y construcción de las nuevas líneas de ferrocarril de alta velocidad que se ha desarrollado en España en los últimos años ha permitido el desarrollo de tipologías, procedimientos de construcción específicos en el campo de los puentes.

Las exigencias de trazado, unida a la orografía de la península, han obligado a la construcción de viaductos de gran longitud, grandes alturas de pilas y luces medias y altas.

En el cruce de los grandes ríos se han construido puentes de gran luz como en el caso del puente del Ebro; pero, como siempre en nuestro país, ha sido el cruce de los embalses y rías donde ha sido preciso construir los puentes ferroviarios de mayor luz, tal es el caso, en orden cronológico, el puente sobre el embalse de Contreras, puente sobre la ría del Ulla, puente sobre el río Ulla, puente sobre el río Tajo y puente sobre el río Almonte, ambos situados en la cabecera del embalse de Alcántara.

De acuerdo a nuestra experiencia, iniciada con el puente sobre el embalse de Contreras, el puente arco de hormigón constituye un alternativa desde el punto de vista técnico y constructivo para puentes de ferrocarril de alta velocidad en el rango de luces entre 200 y 400 m siempre que se cumplan las condiciones adecuadas para su cimentación.

Tanto en el proyecto del puente sobre el embalse de Contreras, con una luz principal de 261 m [2] como en el puente sobre el río Tajo, con una luz principal de 324 m, [3] confluyen condiciones de trazado y encaje en el terreno que han conducido a la utilización del arco de hormigón como la solución óptima. La necesidad de un viaducto de gran longitud en el que es preciso salvar una luz importante ante la imposibilidad de cimentar en el lecho del río o embalse por la gran profundidad de la cimentación y la enorme variabilidad de la cota del nivel de agua.

Para garantizar las posibilidades de construcción con independencia de la lámina de agua en ambos casos fue necesario el proyecto de un vano principal de gran luz. Las condiciones de cimentación propiciaron el encaje de un arco de tablero superior. Lo que hemos considerado fundamental ha sido, una vez elegida la luz óptima del viaducto de acceso, es mantener la misma secuencia de luces sobre la estructura del arco. De esta forma el viaducto tiene una modulación única, soportándose de forma natural y eficaz sobre la estructura principal del arco. Esta unidad formal se complementa con la unidad constructiva del conjunto. El arco se construye in-

dependientemente del cauce inferior, por medio de voladizos sucesivos atirantados. Una vez cerrado el arco en clave y liberado del atirantamiento provisional, es decir, cuando el arco se convierte en arco, el tablero superior puede construirse con los mismos medios auxiliares convencionales que han permitido la construcción del viaducto de acceso, cimbra autolanzable o sistema de empuje.

Esta unidad formal y constructiva se ha conseguido gracias a un encaje cuidado de la geometría del arco para minimizar las flexiones en el mismo en situación de carga permanente y por las posibilidades resistentes que debe tener el arco ante las sobrecargas ferroviarias no simétricas, que le permiten tener márgenes para hormigonados no estrictamente simétricos de los tableros sobre el mismo. Adicionalmente, la tecnología actual permite la utilización de hormigones de alta resistencia tanto en el arco como en el tablero, así como un control adecuado de la fisuración y las condiciones de estabilidad estructural en estado límite de servicio y último.

El resultado final, desde nuestro punto de vista, constituye una aportación al campo de los arcos de hormigón para ferrocarril, heredero en el siglo XXI, del puente de ferrocarril



Fig. 1a. Puente sobre el río Ebro (L=120 m)



Fig. 1b. Puente sobre la ría del Ulla (L=240 m)



Fig. 1c. Puente sobre el río Ulla (L=179 m)



Fig. 1d. Puente sobre el Embalse de Contreras (L=261 m)



Fig. 1e. Puente sobre el río Tajo (L=324 m)



Fig. 1f. Puente sobre el río Almonte (L=384 m)

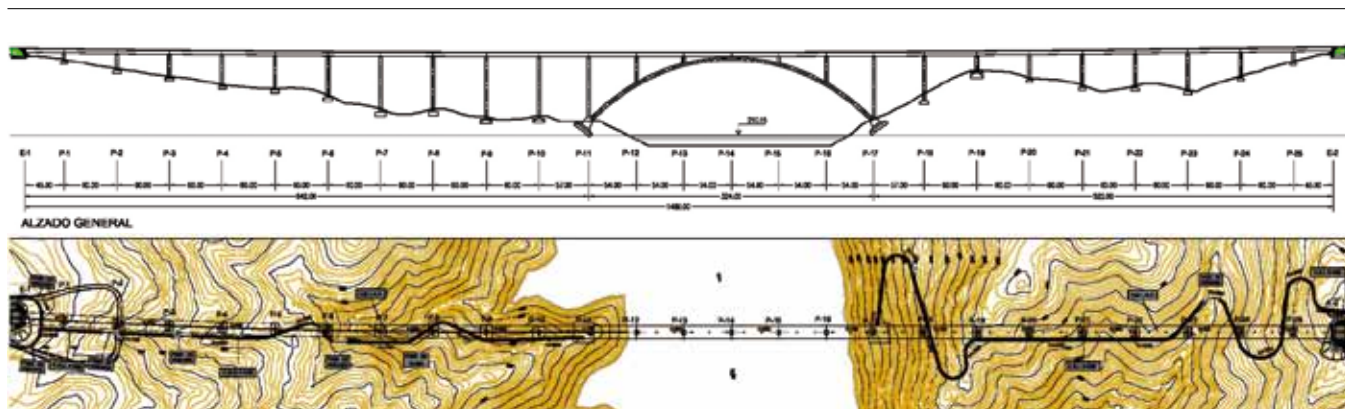


Fig. 2. Definición general

sobre el río Esla, viaducto de Martín Gil, de 209 m de luz, construido durante la posguerra, en el siglo XX. [1].

2. Planteamiento general

Tras en estudio inicial respecto a la situación de una rasante del ferrocarril que favoreciese al conjunto de los puentes sobre el Tajo y sobre el Almonte, optimizándose así mismo el movimiento de tierras entre ellos, se decidió por parte de la dirección de proyecto elegir lo que se llamó rasante alta que pasa en el lugar del puente sobre el río Tajo a 76 m.

La anchura del río, en el punto de cruce, es del orden de 300 m, valor poco variable en función de la altura de las aguas en el embalse.

Los dos tramos de acceso al río son claramente diferentes en lo que se refiere a la distancia que existe entre el terreno

y la rasante. Mientras en la margen izquierda, a sólo 140 m de la margen del río, la cota del terreno se sitúa a sólo 23 m, en la margen derecha hay que separarse de la orilla del río casi 600 m. para alcanzar la misma distancia, esto va a influir en el tratamiento de los viaductos de acceso al puente principal. La posición del empotramiento en la ladera está casi fija, pues la margen derecha del terreno es bastante tendida y no tiene sentido aumentar la luz.

3. Descripción del viaducto

El viaducto está situado en el P.K. 4+061.00, tiene una longitud total de 1.488 m con una distribución de luces de $45 + 9 \times 60 + 57 + 324 + 57 + 7 \times 60 + 45$ m.

3.1. Tablero

El tablero está formado por una sección cajón de hormigón pretensado de 4 m de canto. Esta esbeltez permite salvar

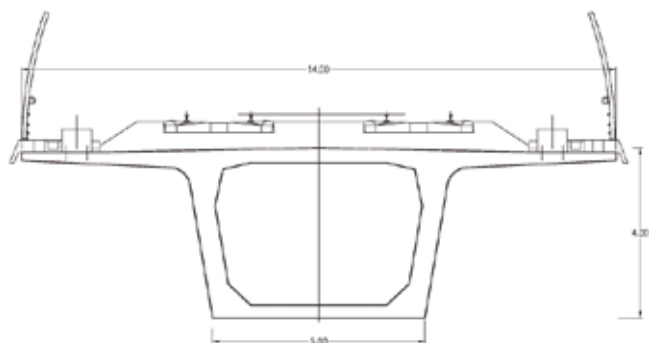


Fig. 3. Definición del tablero



Puentes Arco Metálicos



Río Guadalquivir. Palma del Río

Luz: 130 m



Río Deba. Guipúzcoa

Luz: 110 m

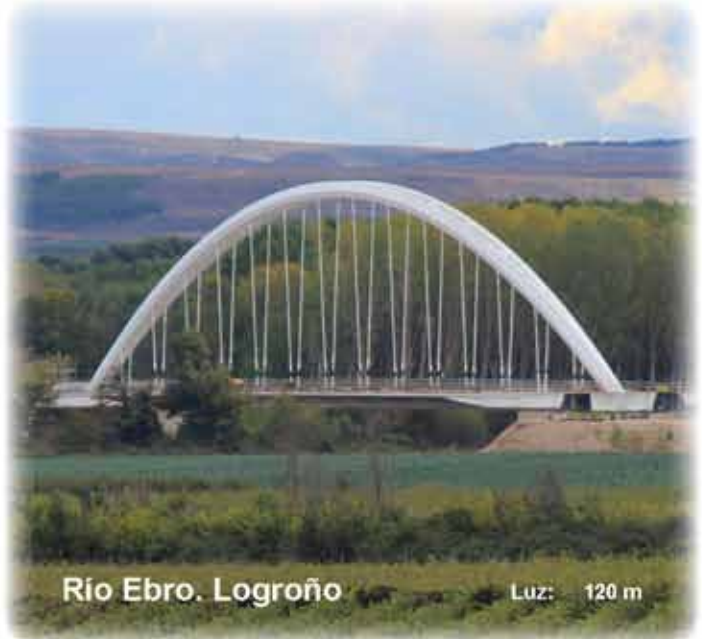
IDEAM

Ingeniería de Puentes y Estructuras

Jorge Juan, 19 - 3º - 28001 Madrid
Tel. 91 435 8084 - e-mail: general@ideam.es
www.ideam.es

ESPAÑA ■ BRASIL ■ MÉXICO

Presidente: Francisco Millanes Mato
Director General: Luis Matute Rubio
Director de Ingeniería: Miguel Ortega Cornejo



Río Ebro. Logroño

Luz: 120 m

Principales campos de actuación:

- Puentes de Carretera, Autovías, Líneas de Ferrocarril y de Alta Velocidad
- Pasarelas Peatonales
- Edificación Singular
- Rehabilitación e Inspección de Puentes y Estructuras
- Asistencias Técnicas y Direcciones de Obra

Actividades:

- Estudios Previos, Anteproyectos y Proyectos de Licitación
- Peritajes y Asesorías Técnicas
- Auscultación e Instrumentación de Estructuras
- Control de Calidad de la ejecución de estructuras
- Supervisión y Control de Proyectos y Ejecución de Obras



Valdebebas. Madrid

Luz: 120 m

adecuadamente las luces de 60m de los vanos de acceso y de 54 m sobre el arco que, debido a su flexibilidad introduce flexiones complementarias. La losa inferior tiene 5 m de ancho y la superior 6,5 m, con voladizos que completan la anchura total de la sección de 14 m. El espesor de las almas es 0,5 m. La caracterización del hormigón es HP-50 en los vanos del viaducto de acceso y HP-70 para los vanos situados sobre el arco.

Los vanos de acceso tienen 5 cables de pretensado con entre 25 y 37 unidades de $\varnothing 0.6''$, por cada alma con un trazado. En los vanos sobre el arco se complementan con cables superiores e inferiores con trazado rectilíneo.

Dada la longitud del tablero, superior a 1.200m, se estudió la posibilidad de disponer el punto de anclaje de las acciones horizontales en la clave del arco. Los incrementos de tensiones en el arco eran asumibles por lo que se optó finalmente por esta disposición que ha permitido el empleo de juntas de dilatación de vías en ambos estribos con dimensiones convencionales.

3.2. Arco

El arco tiene una directriz curvilínea en el plano vertical. Esta directriz ha sido obtenida a partir de un estudio detallado de optimización de las flexiones de carga permanente con una aproximación a la curva antifunicular de dichas acciones. Está formado por una sección cajón rectangular de canto variable entre la sección de arranques, 4 m y clave, 3,5 m. La anchura varía linealmente entre los 12 m de la sección de arranques hasta los 6 m en la sección de clave. El espesor de almas y losa superior varían para conseguir un estado de compresiones máximas lo más homogénea posible. La resistencia del hormigón necesaria es HA-70.

Debido a las condiciones meteorológicas del lugar así como la singularidad de la estructura se realizó un estudio del comportamiento aeroelástico del arco tanto en construcción como en servicio en un ensayo en túnel de viento con modelo reducido. De dicho estudio se concluyó que la estructura no presentaba ningún fenómeno reseñable de inestabilidad frente al viento en las diferentes configuraciones estructurales.

3.3. Pilas

Las pilas tienen una altura variable entre 9,6 y 71,5 m. Todas ellas están generadas por una pila básica de sección cajón rectangular de 3 m de ancho constante y canto variable entre 5,2 m en la parte superior, 3,2 m en la "cintura" situada a 5 m de la parte superior y un ensanchamiento hacia la base.



Fig. 4. Definición de arco

3.4. Aparatos de apoyo y juntas

Los aparatos de apoyo son de teflón esféricos tanto unidireccionales como bidireccionales, salvo los situados en clave que son aparatos de apoyo fijos. Los de los estribos tienen una capacidad de carga vertical de 1.100 T mientras que los de las pilas tienen una capacidad variable entre 1.600 y 2.500 T. La junta de ambos estribos debe admitir un movimiento total de 1.100 mm.

3.5. Estribos

Con objeto de sustentar sobre estructura los aparatos de dilatación de vía, se configuran estribos en cajón con cuchillos intermedios con alturas máximas 8,63 m en E-1 y 9,64 m en E-2.

3.6. Barrera de Protección

Para cumplir las prescripciones de la DIA resulta necesario disponer una protección de 3 m de altura para la protección de las aves. La barrera está formada por tubos de acero curvos de 100 mm de diámetro cada 0,5 m. En su parte inferior se disponen tubos horizontales de diámetros variables para formar la barandilla de protección. Se ha realizado un estudio específico sobre el comportamiento aeroelástico de las distintas tipologías de barreras aplicables en este caso, llegando a ésta como solución óptima.



Fig. 5. Ejecución de tablero con autocimbra

4. Proceso de construcción

4.1. Definición general de ejecución del tablero

La construcción del tablero se realiza vano a vano por medio de una cimbra autoportante dispuesta desde ambos estribos. Los dos vanos dispuestos en la clave del arco se

construirán por medio de una cimbra apoyada sobre el arco y para la que se aprovechará el encofrado de las cimbras autoportantes. Para no crear esfuerzos excesivos sobre el arco, se ha previsto un hormigonado simétrico del tablero, admitiendo un desfase máximo de un solo vano, teniendo explícitamente en cuenta la deformabilidad del conjunto formado por tablero, pilas y arco durante la ejecución del primero en su tramos apoyado sobre el arco, el cual supone una sustentación elástica que influye en gran medida en su dimensionamiento.

4.2. Definición general de ejecución del arco

La construcción del arco se realiza por voladizos sucesivos, atirantados por medio de una torre metálica provisional. La torre se atiranta a las cimentaciones de las pilas próximas que precisan de unidades de anclaje al terreno.

Los medios auxiliares necesarios para la construcción del arco son: una torre colocada sobre la cabeza de la pila 11 para la construcción de un semiarco y otra torre idéntica sobre la cabeza de la pila 17 para el otro semiarco; un carro de hormigonado para cada semiarco; un sistema de tirantes de acero que soporta el semiarco construido anclándose en



Fig. 6. Carro de hormigonado

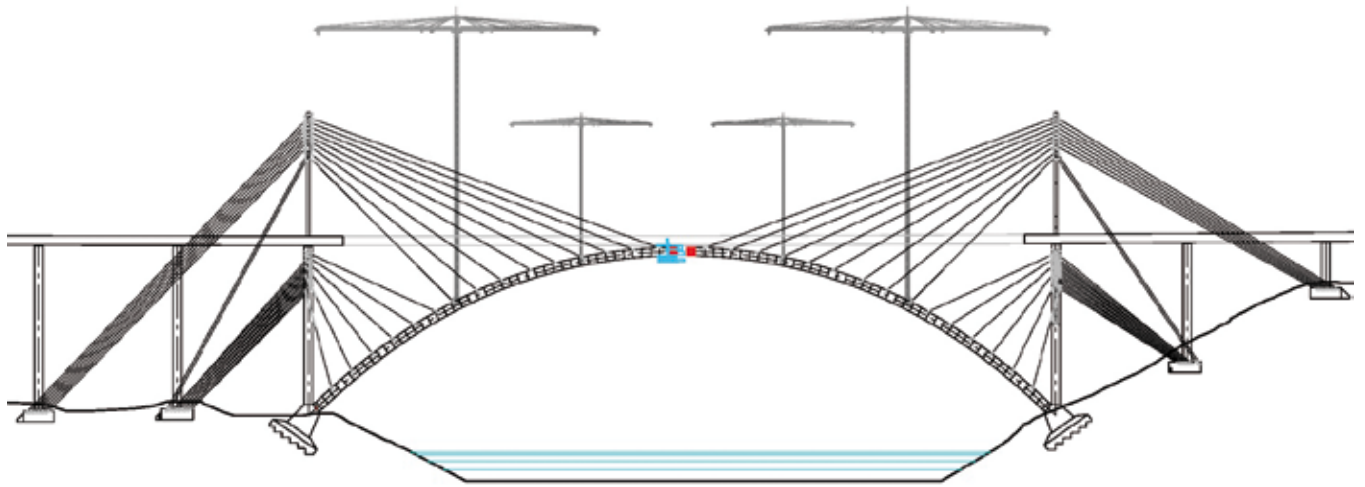


Fig. 7. Esquema de proceso constructivo

la torre y otro sistema que soporta la torre anclándose en las cimentaciones de las pilas adyacentes y, finalmente, un sistema de anclajes provisionales al terreno para sujetar las zapatas de las pilas contiguas.

El carro de hormigonado es un elemento metálico que permite soportar el encofrado de cada dovela del arco y el hormigonado de la misma. Este carro se apoya en la zona del arco recién hormigonada para preparar el hormigonado de la siguiente dovela. Se consideró una longitud de cada dovela algo menor a cuatro metros y para ello se tuvo en cuenta un peso del carro, con el encofrado exterior e interior, de noventa y cinco toneladas.

Se han considerado quince parejas de cables que sujetan el semiarco completo y otras quince parejas que retienen la torre. Los tirantes del arco están separados doce metros, es decir se coloca un cable cada tres dovelas. La separación de los tirantes en la torre es de dos metros salvo los dos primeros que, por ser muy verticales, están más alejados entre sí para que no se toquen los anclajes. El anclaje de los tirantes en la cimentación se hace de la manera siguiente: los ocho primeros cables en la zapata de la pila adyacente a la que se encuentra la torre y los otros siete a la cimentación de la pila contigua. Es decir van ocho cables a la cimentación de la pila 10 y siete a la zapata de la pila 9 para la torre que está en la pila 11 y otros ocho cables a la zapata de la pila 18 y siete a la pila 19 para la torre que está sobre la pila 17. Los tirantes

que van al arco se cruzan en la torre con los que van a la cimentación de las pilas adyacentes.

La cimentación de las pilas 9, 10, 18 y 19 se ancla provisionalmente al terreno mediante unidades de ciento sesenta toneladas dispuestas en dos familias, disponiéndose anclajes verticales e inclinados a cuarenta y cinco grados.

4.3. Optimización del proceso de ejecución del arco

Debido a los condicionantes propios de la obra, y en aras de optimizar el empleo de los medios auxiliares realmente disponibles y ajustar de un modo óptimo los plazos de ejecución, durante el desarrollo de la misma se plantean una serie de modificaciones en el proceso, con objeto de optimizar el sistema tanto desde un punto de vista estructural como de plazos. El procedimiento planteado se basa en la posibilidad de adelantar el comienzo de la construcción del arco realizando los atirantamientos iniciales necesarios para la ejecución del mismo directamente desde la pila de hormigón sobre el plinto de arco.

En lo referente al diseño estructural, el principal condicionante de esta alternativa es que con el atirantamiento desde la pila se pierde altura y por lo tanto verticalidad en ángulo de ataque de los tirantes con respecto a la carga gravitatoria del peso del arco, al igual que ocurre con la retenida. Dado que esto supone un incremento de la carga horizontal a compensar en las zapatas de retenida, el



Fig. 8. Vista general del viaducto en construcción

alcance de esta solución debe condicionarse a un número máximo de dovelas de forma que no se penalicen en exceso los anclajes de retenida a realizar en las zapatas anexas al arranque del arco.

Tras el análisis de estos condicionantes se concluye que la solución ideal pasa por atirantar desde la pila de hormigón los 6 primeros pares de tirantes del arco. Lo que permite lanzar un total de 20 dovelas del arco antes de que sea necesario disponer de la torre metálica de atirantamiento sobre las pilas, suponiendo una holgura de aproximadamente 6 meses.

Cabe indicar que para librar el paso de los cables de retenida que se anclan en pilono, a través del tablero entre las pilas 10 a 11 y entre las pilas 17 a 18 resulta necesario realizar unas ventanas provisionales ubicadas en las alas del cajón, que posteriormente deberán ser cerradas tras la retirada del atirantamiento provisional.

Con este planteamiento se consiguen una serie de objetivos:

- Adelantar el comienzo de la ejecución del arco.
- Sincronizar la ejecución del arco con la llegada del tablero hasta las pilas sobre plinto.
- Reducir el plazo de terminación del tablero.

- Acortar la altura del pilono y reducir la carga sobre la estructura metálica.
- Reducir la longitud de los cables de los 6 primeros pares de tirantes.
- Concentrar todas las operaciones de tesado, en la vertical de cada la pila.
- Permitir el acceso del material para la construcción del arco a través del tablero.

4.4. Secuencia de fases de ejecución del arco

El proceso de construcción de cada semiarco se inicia con el hormigonado de la dovela inicial cuyo encofrado se soporta mediante una cimbra apoyada en la cimentación del arco. Esta dovela inicial debe tener la longitud necesaria para que, una vez endurecido el hormigón, se pueda colocar el carro de avance para comenzar el proceso de avance por voladizos sucesivos. Colocado el carro en su posición, se hormigona la primera dovela en ménsula, posteriormente se mueve el carro sobre ésta y se prepara para el hormigonado de la segunda dovela en ménsula.

El montaje del primer tirante requiere mayor atención ya que la torre está todavía sin arriostrar. Se empieza por dar el 25 % de la carga de montaje del cable que va a la cimentación, a continuación el 25 % de la carga del primer tirante del arco, luego otro 25 % del tirante de la zapata y



así sucesivamente. Es necesario controlar los movimientos longitudinales de la punta de la torre. Colocado el primer tirante se continúa con la secuencia de hormigonado de dovela y traslado de carro hasta alcanzar la posición de montaje del segundo tirante.

El proceso entra en fase secuencial repetitiva pero el montaje de los tirantes a partir del cuarto se complica puesto que se debe actuar previamente sobre cables ya colocados. En algunas fases resulta necesario destesar o retesar adicionalmente alguno de los cables iniciales del arco en fases más avanzadas. Estas actuaciones vienen obligadas por el control de la fisuración del arco.

La secuencia finaliza después de colocar los últimos tirantes de los semiarcos y realizar un ajuste de carga en tirantes para llegar a la geometría deseada. Se retira entonces uno de los carros y con el otro se hormigona la clave quedando así cerrado el arco. Se completa el proceso desmontando los tirantes provisionales empezando por

el último del lado del arco, luego el del lado de la cimentación, se pasa a continuación por el penúltimo cable del arco, el penúltimo de la cimentación y así sucesivamente. Cuando se han retirado todos los cables se procede al desmontaje de las torres metálicas y la retirada de los anclajes al terreno. **ROP**

Referencias

[1] Fernández Troyano, Leonardo. Camino sobre el río. Historia de los Puentes Españoles. Correos, (2013)

[2] Manterola, J.; Martínez, A.; Navarro, J.A.; Martín, B. Puente arco de ferrocarril sobre el embalse de Contreras en la línea de alta velocidad Madrid-Levante. Hormigón y Acero nº261 (2012)

[3] Manterola, J.; Martínez, A.; Martín, B.; Gil, M.A.; Fuente, S. Blanco, L.; Faúndez, H. Viaducto para Ferrocarril de Alta Velocidad sobre el río Tajo en el Embalse de Alcántara. VI Congreso ACHE, Madrid (2014)