

# Puente Arco Sobre el Río Eresma en la Conversión en Autovía de la Circunvalación de Segovia (SG-20)

Arch bridge over the Eresma River in the conversion into highway of Segovia ring road (SG-20)

Enrique Hernández Velasco<sup>a</sup>, Alberto Baíllo Rodríguez de las Heras<sup>a</sup>

Juan Luis Alcalá Sánchez<sup>a</sup>, Javier Mellado Fernández<sup>a</sup>

Juan Jesús Álvarez Andrés<sup>b</sup>, Guillermo Lorente Perchín<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. IPES S.L.

<sup>b</sup>Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. GGRAVITY ENGINEERING S.A.

## RESUMEN

El nuevo puente arco sobre el río Eresma forma parte del desdoblamiento en autovía de la carretera de circunvalación de Segovia, SG-20. Dicha carretera, terminada en 2003, cruza el cerrado valle del Eresma mediante un arco de hormigón de tablero superior de 99,50 m de luz. En el desdoblamiento, consistente en la construcción de una calzada anexa a la existente, se ha construido otro arco paralelo al anterior y de igual luz y flecha, pero de distinto ancho y adaptado a la normativa en vigor. El proyecto ha sido realizado por Ingeniería de Puentes y Estructuras (IPES) y la construcción ha sido llevada a cabo por Dragados.

## ABSTRACT

The new arch bridge over the Eresma river is part of the conversion into highway of the Segovia ring road (SG-20). This road, finished in 2003, crosses the Eresma valley by mean of a 99.5m-span concrete deck arch bridge. In the conversion into highway, in which a new road is constructed beside the previous one, an arch bridge parallel to the existing one has been built. The new bridge has the same span length and sag as the old one, but it has a different width and meets today's applicable Standards. Ingeniería de Puentes y Estructuras (IPES) has designed the bridge and Dragados has constructed it.

**PALABRAS CLAVE:** puente arco, conversión en autovía, Ribera, travesaño, cimbra porticada

**KEYWORDS:** arch bridge, conversion into highway, Ribera, transverse bracing, heavy-duty shoring

## 1. Introducción

El nuevo arco sobre el Eresma (figura 1) es una estructura muy similar al arco biempotrado de tablero superior previamente existente en la carretera SG-20, cuyo desdoblamiento ha sido el objeto de la obra. Este arco también fue proyectado por IPES, en el año 1997.

En 2015 Dragados resultó adjudicataria de la obra de desdoblamiento de la SG-20 para su conversión en autovía. En el proyecto de licitación, la solución planteada para el cruce del río Eresma era la construcción de un segundo puente arco similar al preexistente, imitando a éste tanto en su definición como en su proceso constructivo. El proyecto se había redactado cuando aún estaba en vigor la antigua norma de

acciones IAP-98, si bien contenía una adenda posterior en la que se estimaba el incremento de coste que tendrían las estructuras por tener que ser adaptadas a la nueva normativa, tanto de acciones como de sistemas de contención de vehículos. Así pues, el propio proyecto reconocía la necesidad de realizar una profunda

adaptación del mismo previa a la construcción. Dado que IPES ya había proyectado el viaducto existente, Dragados le encargó el nuevo proyecto, que sería el de construcción, en el que se aprovechó para realizar una serie de mejoras aparte de actualizar la normativa empleada.



Figura 1. Nuevo Viaducto del Río Eresma

En el diseño del puente de 1997 se prestó especial atención al aspecto estético, dado que se trataba de la estructura más singular del tramo. Y en el nuevo puente, como ya se hizo entonces, la configuración de arco y tablero ha pretendido recordar geoméricamente a los diseños de José Eugenio Ribera, ya que el arco está desdoblado en dos arcos aligerados conectados entre sí por travesaños horizontales, constituyendo este conjunto una viga Vierendel en dirección

transversal. A su vez, el tablero, que descansa sobre el arco, recuerda a las secciones en “pi” de los arcos de Ribera. Cada nervio se completa con unos voladizos laterales, algo mayores que en los puentes de Ribera, hasta alcanzar el ancho total del tablero. Ambos nervios están unidos entre sí por una losa de hormigón armado que los conecta superiormente.

## 2. Estudio de alternativas tras la adjudicación de la obra

En el proyecto de adjudicación se planteaba construir un arco parecido al existente y que se construiría siguiendo el mismo proceso, hormigonado in situ sobre cimbra sustentada por torres.

Tras la adjudicación de la obra, Dragados realizó un estudio para buscar otras soluciones que, siendo técnicamente equivalentes, fueran más ventajosas por economía o facilidad constructiva.

Una de las alternativas analizadas, teniendo en cuenta la complicada orografía de la zona y el difícil acceso al cauce para ejecutar las cimentaciones provisionales necesarias para las torres de cimbra, fue la posible ampliación del puente original en lugar de la construcción de un nuevo puente en paralelo. Dragados tiene una amplia experiencia en este tipo de actuaciones, con ejemplos como la ampliación del Puente de los Santos (figura 2) [2] o la del Puente de Rande.

Sin embargo, esta alternativa fue pronto desechada debido a lo siguiente:

En primer lugar, la estructura original, aunque es bastante reciente, no fue proyectada contemplando su ampliación futura, algo que habría simplificado enormemente la duplicación planteada menos de 15 años después de ser inaugurada. Un ejemplo de previsión en este sentido es el viaducto del Pintor Fierros o Arco de la Regenta (proyecto de Apia XXI) [1], arco de tablero superior que se concibió desde su diseño inicial para poder soportar una duplicación de anchura en el futuro, lo que facilitó enormemente dicha actuación.

Y por otra parte, otro motivo que llevó a descartar la ampliación del puente existente fue su sección transversal. En estructuras como el Puente de los Santos (figura 2), con sección en cajón de hormigón de gran canto, la ampliación se realiza ensanchando la sección con ayuda de jabalcones metálicos, complementados con elementos estructurales adicionales que refuerzan el tablero para soportar las nuevas cargas. Pero en el viaducto del Eresma, el tablero tiene un canto muy reducido, por lo que el uso de elementos tipo jabalcón habría resultado poco eficiente. Una solución con costillas metálicas habría planteado también problemas en el cosido a la sección de hormigón, con un paramento muy inclinado, frente al paramento vertical o semivertical de una sección cajón.



Figura 2. Ampliación del Puente de los Santos

Por último, existía un problema de capacidad en la estructura existente, ya que la simple aplicación de la IAP-11 (frente a la IAP-98, norma con que se calculó) obligaba ya a refuerzos en tablero y arco, con mucho mayor motivo si se trataba de duplicar la anchura de la calzada, resultando singularmente complejo el refuerzo del arco y sus montantes.

Descartada por tanto la opción de ampliar la estructura existente, se planteó la posibilidad de cambiar el proceso constructivo previsto (cimbra al suelo) por un avance en voladizo. Pero se descartó por no ser competitiva económicamente con la solución cimbrada y por el hecho de contar con la referencia previa relativamente reciente de la construcción cimbrada del arco original, que era además la solución propuesta en el proyecto del nuevo.

Por lo tanto, tras estudiar posibles variantes tanto de diseño como constructivas, finalmente se decidió mantener la idea general del proyecto de licitación, pero realizando un nuevo proyecto para mejorar ciertos aspectos del mismo, adaptarlo a la normativa vigente, reducir en lo posibles las cuantías de materiales y adaptar el dimensionamiento de la estructura a los medios constructivos que iban a ser empleados.

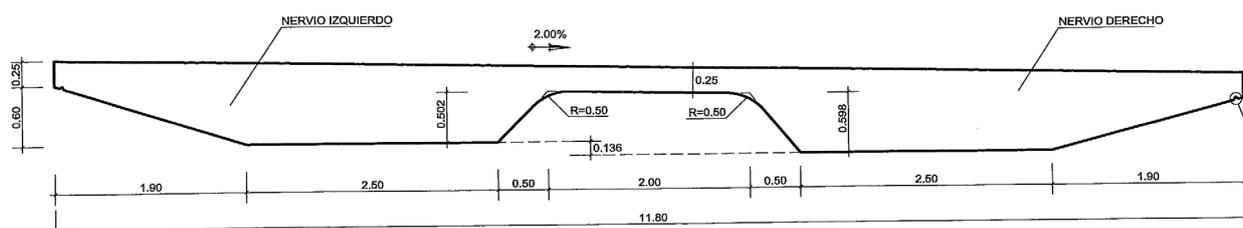


Figura 3. Sección transversal del tablero

### 3. Descripción de la Estructura

Se trata de un puente de 201,50 m de longitud formado por un tramo central apoyado en el arco de 99,50 m de luz entre arranques y dos tramos de acceso apoyados sobre pilas. La distancia entre montantes del arco es de 16,58 m, y las luces de los tramos de acceso son 15-18-18 m. La modulación de vanos del tablero es por tanto 15 + 2 x 18 + 6 x 16,58 + 2 x 18 + 15 m.

#### 3.1 Tablero

La sección transversal del tablero se compone de dos núcleos o nervios unidos por la losa superior más dos voladizos. Las dimensiones de la sección se aprecian en la figura 3.

La separación transversal entre los ejes de apoyo de cada uno de los nervios sobre pilas, montantes y estribos es de 5,50 m.

Longitudinalmente el tablero es una viga continua, pretensada excepto en el tramo central de 24,78 m, que es armado.

#### 3.2 Arco y Montantes

La estructura en arco está constituida por dos arcos paralelos aligerados de 2,90 m de anchura con canto variable de 2,00 m en arranques a 1,40 m en clave. El intereje de los arcos es 5,50 m.

La directriz del arco es parabólica de 2º grado, la distancia entre arranques es de 99,50 m y la flecha es de 18,30 m, por lo que resulta una relación flecha/luz de 1/5,44, con lo que los

efectos de retracción y fluencia, que pueden provocar una pérdida de reacción resultante en los arranques y que han sido analizados convenientemente, no son condicionantes.

Los dos arcos están conectados entre sí por travesaños de 1 m de canto, dispuestos coincidiendo con los puntos de empotramiento de los montantes sobre los arcos y también en el punto medio entre cada dos montantes. En los nudos de intersección de travesaños y arcos, éstos se macizan en una longitud de 2 m.

La cimentación del arco es directa, sobre macizos de 6,68 m de dimensión según el eje del puente y de 8,73 m de altura.

El tablero transmite las cargas a los arcos a través de montantes de sección rectangular de 2,50 x 0,80 m de canto, excepto los dos de mayor altura, coincidentes con los arranques del arco, cuyas dimensiones son 2,50 x 1,20 m de canto.

El tablero descansa sobre los montantes mediante apoyos de neopreno. En la clave, el tablero es tangente al arco, habiéndose dispuesto también neoprenos en ese punto.

Las pilas de los vanos de acceso son similares a los montantes, también con sección de 2,50 x 0,80 m, y con cimentación directa.

El puente se apoya en sus extremos en estribos de hormigón armado convencionales.

#### 3.3 Aspectos más relevantes del cálculo estructural

El cálculo con el que se determinan el pretensado y el armado longitudinales del tablero

se realiza con un modelo tipo línea ajustando los resultados con un modelo posterior integral 3D en el que se incluye el arco.

Debido a la asimetría de la sección transversal del tablero por el peralte de la estructura, se realiza un modelo de cálculo tridimensional del arco utilizando elementos sólidos para modelizar el tablero, de manera que se representen con exactitud el peso del tablero sobre el arco y la rigidez transversal de los nervios longitudinales, así como la unión entre los mismos, para obtener con precisión los esfuerzos en el arco (figura 4).

En este modelo 3D se comprueba que las deformaciones verticales globales de los apoyos del tablero sobre los montantes del arco son lo suficientemente reducidas como para no alterar significativamente los esfuerzos de flexión longitudinal en el tablero, demostrando la validez del modelo de cálculo longitudinal tipo línea realizado en primer lugar.

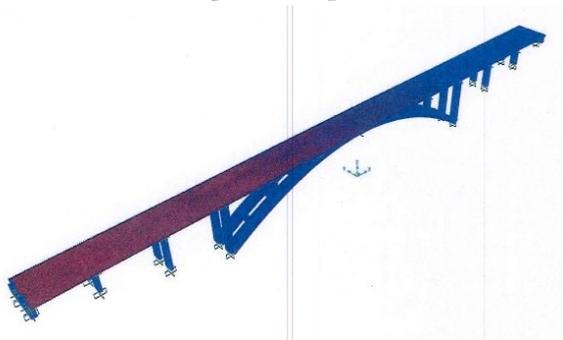


Figura 4. Modelo 3D sólidos.

A partir de las deformaciones que se producen en el tablero del modelo sólido se realiza un modelo tridimensional equivalente de barras (figura 5).

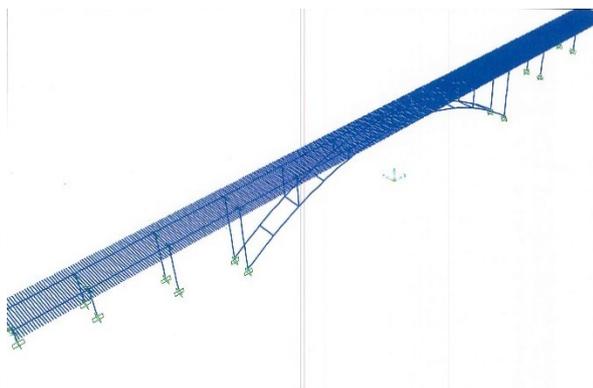


Figura 5. Modelo 3D barras.

Los dos nervios de la sección transversal del tablero se modelizan mediante sendas barras longitudinales, unidas a su vez por medio de barras transversales cuyas características se ajustan en función de los resultados obtenidos del modelo sólido (figura 6).



Figura 6. Sección Tablero Modelo 3D sólidos

Con este modelo de barras se comprueban los esfuerzos obtenidos en el tablero, se obtiene la armadura transversal de la losa de conexión de ambos nervios y se reproducen las fases de cálculo del proceso constructivo.

También se obtiene del modelo de cálculo tridimensional la carga de pandeo del arco en su plano. El factor de amplificación de carga para el arco con la sobrecarga uniforme en la mitad de la estructura y los vehículos pesados en clave es superior a 12, con lo que está garantizada la ausencia de problemas de estabilidad por pandeo en la estructura (figura 7).

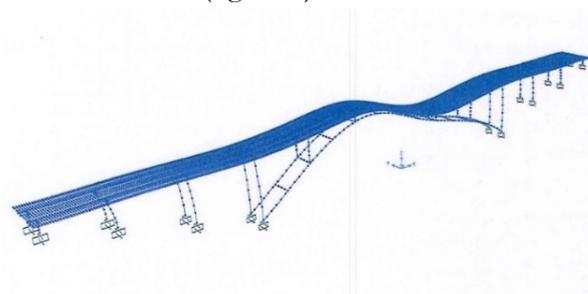


Figura 7. Pandeo en el plano del Arco

La configuración geométrica del arco, a base de dos arcos unidos por travesaños, dota a la estructura de una gran rigidez transversal que le confiere una capacidad de comportamiento óptimo frente a cargas excéntricas y acciones horizontales fuera del plano del arco.

## 4. Construcción de la estructura

El hecho de construir el nuevo arco junto al antiguo ha supuesto alguna ventaja constructiva, puesto que la calzada existente se ha utilizado en lo posible como plataforma de trabajo (con las consiguientes limitaciones al tráfico rodado), pero también ha implicado la necesidad de no afectar a la estructura en servicio. Una desventaja de la presencia del puente existente ha sido que dicho puente, por así decirlo, había ocupado el “emplazamiento bueno”, como se explica a continuación.

### 4.1 Ejecución de la subestructura

Cuando se construyó el viaducto original se eligió para cruzar el valle del Eresma el mejor sitio posible de la zona. Debido a ello, al construir el nuevo, fue especialmente complicado encajar y ejecutar las cimentaciones de los arranques del arco e incluso, en mayor medida, las de las zapatas provisionales de las torres de la cimbra y de las dos grúas torre necesarias para la construcción del viaducto.

El terreno natural es muy competente, por lo que todas las cimentaciones son directas, pero la irregularidad de las laderas obligó a realizar grandes excavaciones en terreno muy duro. Esto obligó a usar voladura en algunos casos, pero controlando siempre el proceso para evitar que las vibraciones pudiesen afectar al viaducto original contiguo.

Los elementos más singulares de la subestructura son los plintos o macizos de cimentación del arco, que por su masividad (casi 600 m<sup>3</sup> de hormigón cada uno y 9 m de altura) se ejecutaron en 3 fases (figura 8).

La cimbra (figura 9) se componía de 5 vanos y por lo tanto 6 apoyos (Z1 a Z6). Para ejecutar la zapata Z4 fue necesario acceder desde el lado opuesto del río mediante un vado provisional en época de poco caudal. Para la Z5, situada en una zona bastante compleja por su irregularidad en dirección transversal, fue

necesario ejecutar un gran macizo de apoyo en hormigón no estructural anclado al terreno, para permitir el apoyo uniforme y estable de la torre de cimbra.

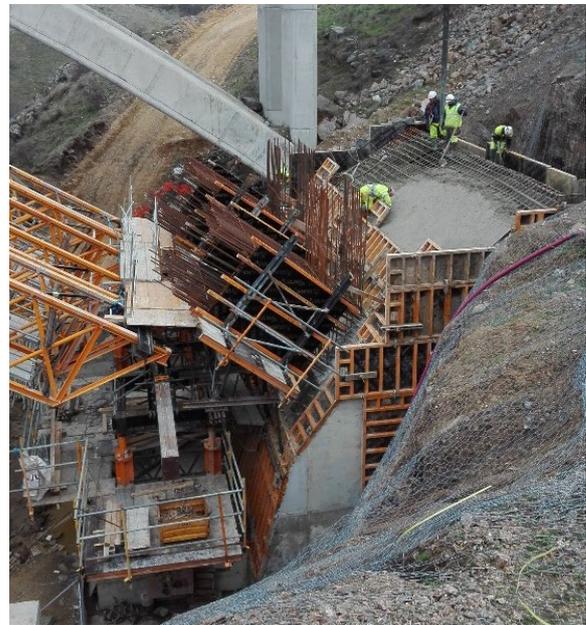


Figura 8. Hormigonado de la 3ª fase de un plinto

### 4.2 Ejecución del arco

El arco se ejecutó sobre una cimbra porticada con vanos de casi 20 m de luz (figura 9). Para ello se utilizó un sistema de la empresa ULMA compuesto por torres T500 de gran capacidad y cerchas tipo H33. Se utilizaban dos celosías por cada arco y una torre T500 bajo cada celosía. Para su montaje se aprovechó el puente existente, recibiendo en él las piezas y montándolas en su posición por medio de las dos grúas torre (figuras 9 y 10).

La secuencia de ejecución del arco comenzó con el hormigonado de una sola vez del fondo de cada uno de los dos arcos (figuras 11, 12 y 13). Después se ejecutó el resto de la sección, incluyendo los travesaños de conexión entre arcos, en tres fases según la dirección longitudinal, dos laterales y una final para la zona central del arco (figura 14). Una vez completado el arco se procedió al descimbrado del mismo, empleando de nuevo las grúas torre y grúas auxiliares emplazadas bajo el puente (figura 15).



Figura 9. Vista general de la cimbra del arco





Figura 12. Vista general con el fondo del arco recién hormigonado



Figura 13. Hormigonado del fondo del arco



Figura 14. Hormigonado final del arco en zona de clave



Figura 15. Vista general del descimbrado del arco

### 4.3 Ejecución del tablero

Los alzados de pilas y los montantes sobre los arcos se hormigonaron mediante encofrados trepantes y puestas de 5 m de altura máxima.

A continuación se ejecutó el tablero, comenzando por los tramos de acceso y siguiendo por los vanos situados sobre el arco. Para ello se apoyaron las vigas metálicas que constituían la cimbra en ménsulas fijadas a las pilas y a los montantes sobre los arcos.

Para minimizar las cargas asimétricas sobre el arco durante la ejecución del tablero, éste se ejecutó por fases de forma simultánea desde ambos estribos, limitando el desequilibrio máximo a 1 vano.

Las fases 1 y 2 abarcaban los respectivos tramos de acceso de tres vanos cada uno (figuras 13 y 14). Cada una se subdividió en 2 subfases.

Las fases 3 y 4 se correspondían con el primer y último vano de los 6 vanos que descansan sobre el arco (figura 14).



Figura 16. Ejecución de tablero, fase 1

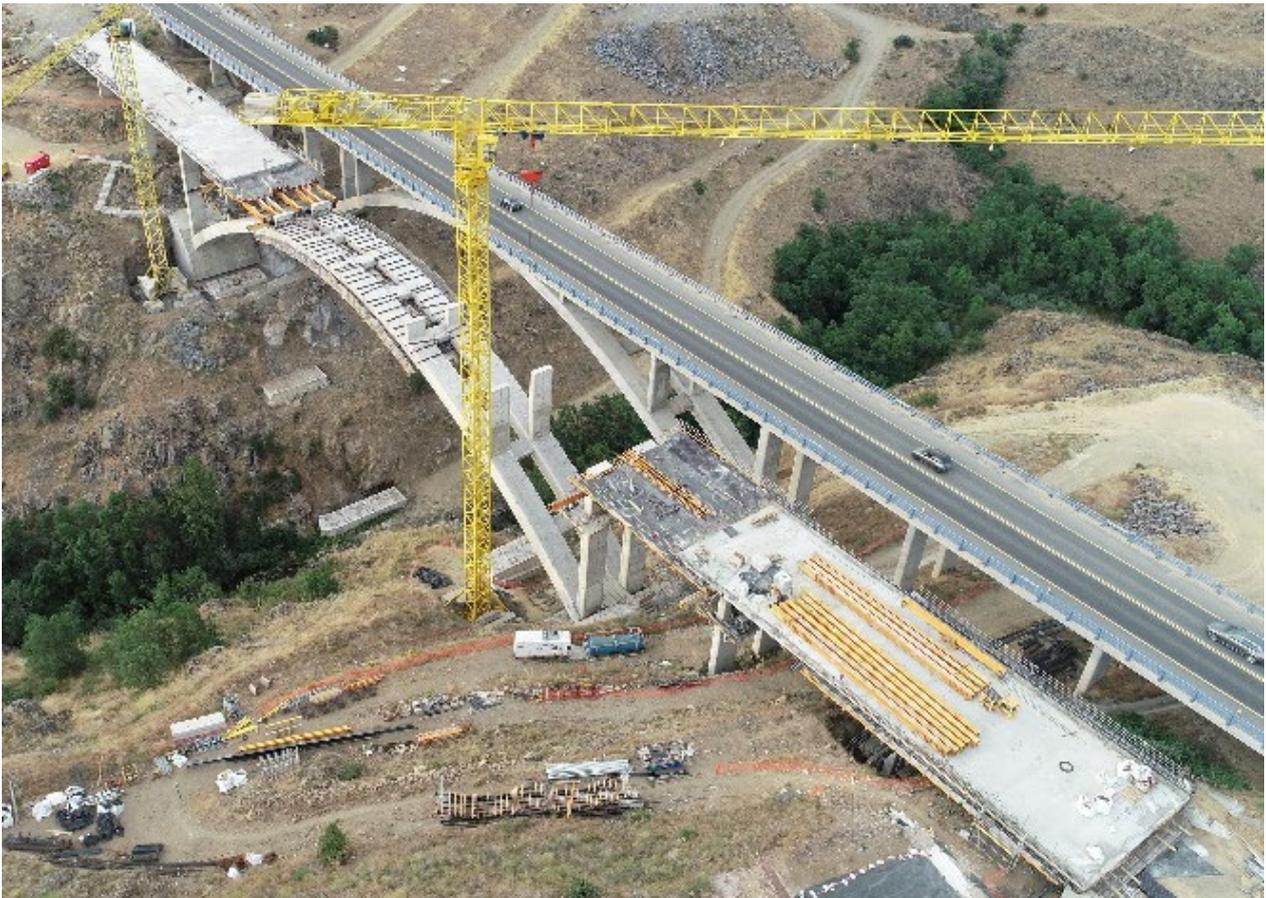


Figura 17. Ejecución de tablero, fase 2 (en primer plano) y fase 3 (arriba, a la izquierda)

En las fases 5 y 6 (figura 15) se ejecutaba el vano siguiente a cada uno de los dos anteriores, y en la fase 7, correspondiente a los dos vanos centrales, se cerró el tablero sobre la clave del arco (figura 16).

En este proceso se tesaba cada vano tras su ejecución, pero ello no era posible en la última fase (cierre del tablero sobre clave del arco), por lo cual este tramo central era simplemente armado.

Este proceso constructivo difiere del que se había llevado a cabo en el viaducto anterior, en el que el tablero se ejecutó por fases desde el estribo 1 al estribo 2, de modo que la asimetría de carga de peso propio sobre el arco durante la construcción era mayor, condicionando así su cuantía de armadura.

Una vez completo el tablero, se ejecutaron los trabajos de impermeabilización, aglomerado, pretilas y demás acabados, quedando así terminado el viaducto.

### Referencias

- [1] GARCÍA-ARANGO CIENFUEGOS-JOVELLANOS, Ignacio et al. Ampliación del Viaducto del Pintor Fierros (Arco de la Regenta). Revista de Obras Públicas nº 3495 (enero 2009)
- [2] CORRES PEIRETTI, Hugo, Ampliación del puente de Los Santos en la A-8 de 12,00 a 24,60 metros, sin cortes de tráfico. Hormigón y Acero nº 273 (julio 2014)



Figura 18. Ejecución de tablero, fases 5 y 6



Figura 19. Ejecución de tablero, fase 7



Figura 20. Viaducto terminado