

PUENTE DE FERROCARRIL DE ALTA VELOCIDAD SOBRE EL EMBALSE DE CONTRERAS

Javier MANTEROLA ARMISÉN

Dr. Ingeniero de Caminos

Carlos Fernandez Casado, S.L.

jmanterola@cfcsl.com

Juan A. NAVARRO

Ingeniero de Caminos

Carlos Fernandez Casado, S.L.

janavarro@cfcsl.com

Borja MARTÍN MARTÍNEZ

Ingeniero de Caminos

Carlos Fernandez Casado, S.L.

bmartin@cfcsl.com

Antonio MARTÍNEZ CUTILLAS

Dr. Ingeniero de Caminos

Carlos Fernandez Casado, S.L.

amartinez@cfcsl.com

Silvia FUENTE GARCÍA

Ingeniero de Caminos

Carlos Fernandez Casado, S.L.

sfuente@cfcsl.com

Resumen:

El puente está situado en el Tramo Embalse de Contreras Villargordo del Cabriel en el Nuevo Acceso Ferroviario a Levante. Se ha proyectado una solución en puente arco con tablero superior. La luz del arco es de 261 m y la distribución de luces del tablero superior es de 32.625 + 12x 43.50 + 32.625 m.

Palabras Clave: .

Arco para ferrocarril de alta velocidad. Arco de hormigón armado. Construcción por voladizos atirantados.

1. Descripción general

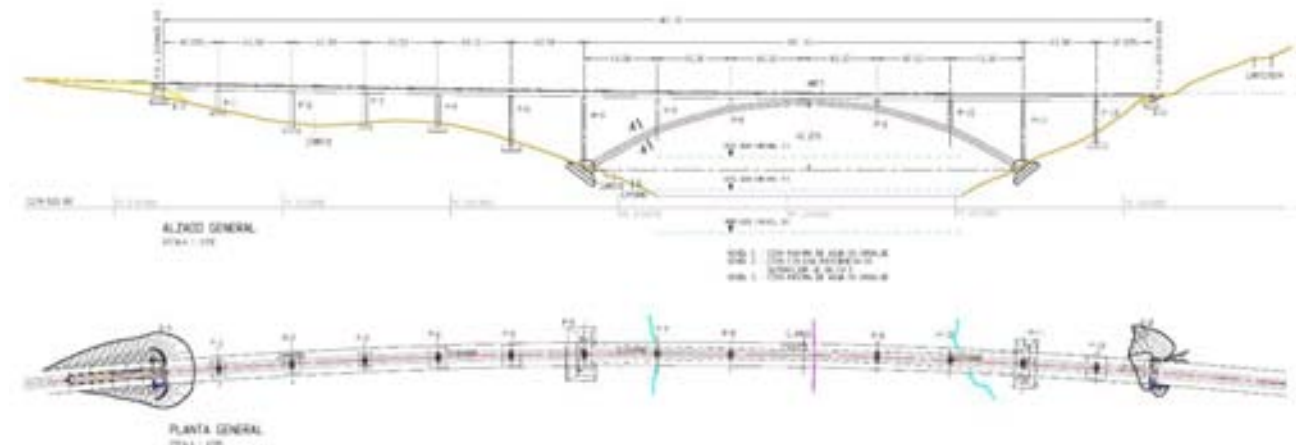


Fig. 1. Plano general

El puente está situado en el Tramo Embalse de Contreras Villargordo del Cabriel en el Nuevo Acceso Ferroviario a Levante.

Se ha proyectado una solución en puente arco para el primer cruce sobre el Embalse de Contreras. Está situado entre los PKs 210+429.375 y 211+016.625, con una longitud total de 587.25 m.

Se trata de un puente arco con tablero superior. De esta forma se integra el viaducto de acceso con el vano principal manteniendo las mismas luces y el mismo tablero, consiguiéndose una sensación de armonía e integración con el entorno. La luz del arco es de 261 m y la flecha en el centro 36,944 m lo que determina una relación flecha-luz de 1/6.77, arco rebajado pero no en exceso. Se debe indicar que, a fecha de hoy, la luz resultante entre apoyos del arco hace del Viaducto sobre el Embalse de Contreras el record europeo en puentes arco ferroviarios de hormigón.



Fig. 2. Arranque de arco

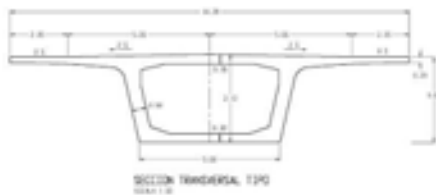


Fig. 3. Sección transversal de tablero

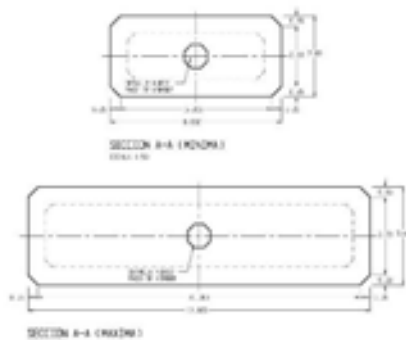


Fig. 4. Sección transversal del arco

El tablero está formado por una viga en sección cajón de 3.00 m. de canto (lo que supone una relación canto/luz de 1/14.5 con relación a la luz entre pilas), una losa inferior de 5 m. de ancho y superior de 6.50 m. unos voladizos que completan la anchura total de la sección de 14.20 m. El espesor de las almas es 0.50 m. Las almas se regruesan sobre las pilas hasta un espesor total de 1.27 m. para permitir el anclaje de los cables de pretensado de servicio. La losa inferior tiene un espesor de 0.30 m.

El arco tiene una directriz poligonal curvilínea en el plano vertical, correspondiente al antifunicular de las cargas permanentes. Está inscrito en planta en la alineación circular de radio 3875 m para evitar excentricidades en el empotramiento de las pilas sobre el mismo. El arco es de hormigón armado HA-70, debido a las grandes compresiones a soportar.

Las pilas tienen una altura variable entre 3.53 y 35.376 m. Todas ellas están generadas por una pila básica de sección cajón rectangular de 2.60 m. de ancho constante y canto variable entre 5.20 m. en la parte superior, 3.20 m. en la "cintura" situada a 5 m. de la parte superior y un ensanchamiento hacia la base.

El arco está empotrado en dos grandes plintos, que permiten la difusión de la carga en el competente terreno de las laderas mediante cimentación directa.

La distribución de luces del tablero superior es de 32.625 +12x 43.50 + 32.625 m. Las pilas P-6 a P-11 se apoyan sobre la estructura del arco inferior.

El trazado en la zona del Viaducto está formado por dos alineaciones circulares en planta de 4000 y 3500 m de radio y una curva de transición con un parámetro de 1973.44 m. En alzado está situado en un acuerdo parabólico con un Kv de 25000 m. Para poder construir el tablero por el procedimiento de empuje se ha inscrito el eje del viaducto en una alineación circular de 3875 m de radio, provocándose unas excentricidades máximas entre el eje de las vías y el tablero de 0.11 m por lo que se ha ampliado la plataforma a 14.20 m. Así mismo el eje de deslizamiento en alzado será una alineación recta produciéndose unos descensos sobre la alineación teórica de 1.724 m. Estos efectos, tanto de excentricidades como de descensos se han tenido en cuenta en el cálculo del tablero.



Fig 5 Pilas de vanos de acceso

2. Proceso Constructivo

A la luz de las características geométricas y tipológicas expuestas anteriormente, es obvio que el proceso de ejecución, actualmente en su punto culminante previo al cierre del arco, debió ser estudiado concienzudamente. Esto ha provocado la necesidad de un seguimiento estricto de la obra, tanto por parte de la Dirección de Obra y su Asistencia Técnica como de la Constructora y su Asistencia Técnica, buscando una solución diligente a los requerimientos que la construcción de un viaducto de esta envergadura implica.

Al realizar el Proyecto Constructivo, este viaducto se planteó para ser construido como empujado desde el Estribo-1, tomándose para su viabilidad las precauciones anteriormente indicadas. No obstante, en la redacción del Proyecto Modificado, se propugnó la construcción del tablero mediante cimbra autoportante, sin modificaciones tipológicas ni de dimensiones en las secciones. Dicha construcción mediante autocimbra se lleva a cabo desde los dos estribos, a los que denominaremos "lado Cuenca" y "lado Valencia", al encontrarse la clave del arco prácticamente situada en la frontera entre ambas provincias.

Para la ejecución del arco de hormigón, se plantea en el Proyecto su construcción mediante dos semiarcos en avance en voladizos atirantados. A la hora de estudiar el modo de realizar el sistema de atirantamiento, se consideró necesario comenzar a construir el arco en voladizo desde su arranque en cimentación. Esto es debido a la proximidad de los



Fig 6. Pila provisional



Fig 7 Construcción del arco

Las obras comienzan con la ejecución de las cimentaciones, que son directas en todos los casos. Se realizan las cimentaciones correspondientes a las seis pilas de la zona de viaducto de acceso al arco, así como las de los estribos. Las cimentaciones de los plintos de los arcos suponen un volumen imponente de hormigón, por lo que se deben estudiar sus fases de ejecución, cuidando especialmente las juntas entre las mismas. Por último, se deben ejecutar las cimentaciones correspondientes a las pilas provisionales. Éstas se ejecutan en la vertical de las pilas P-7 y P-10, de unión entre arco y tablero.

Las pilas se realizan mediante encofrado trepante, quedando preparadas para el comienzo de la ejecución del tablero. Dicho tablero se ejecuta mediante cimbra autoportante desde los lados Cuenca y Valencia. La sección se hormigona en una primera fase que comprende losa superior y almas hasta su extremo superior, para posteriormente disponer prelosas para el hormigonado de la losa superior.

Una vez se han realizado los plintos de los arcos, se trepan las pilas P-6 y P-11, cimentadas también sobre dichos plintos. Así mismo, se hormigonan las pilas provisionales.

arranques de arco a la zona inundable del embalse, lo que llevó a evitar la disposición de pilas provisionales. Esto supone la segunda diferencia del proceso constructivo inicialmente previsto en Proyecto respecto al realmente ejecutado. En este último, debido al bajo nivel estacional del embalse, se incluyó la disposición de dos pilas provisionales en la zona inundable con objeto de reducir la longitud volada de los semiarcos. Este sistema permite una ejecución más económica, pero con el riesgo de tener que ejecutar cimentaciones en zonas rellenadas al haber quedado inundadas. No obstante, ambas soluciones comparten el mismo espíritu y el mismo concepto estructural.

En este momento se comienza la ejecución del arco. El primer tramo de cada semiarco, entre cimentación y pilas provisionales, se realiza sobre cimbra apoyada en el suelo. Para ello se disponen una serie de castilletes metálicos que sirven de apoyo a los cuchillos que sostienen la vigería de sustentación del encofrado del arco. Sobre esta fase de construcción, se debe hacer hincapié en la necesidad de una perfecta concepción y revisión de los detalles de las estructuras auxiliares, básicas en estas fases.

Por otra parte, en el arranque del arco se suman una serie de factores que requieren un especial cuidado. Se trata de la sección más solicitada en servicio y contiene una gran cantidad de armadura.



Fig 8. Primer tramo de arco apeado

A esto se une el hecho de que se emplea un hormigón HA-70 de alta resistencia, en su primera puesta en obra. Todos estos factores llevan a buscar una optimización del proceso de hormigonado. Vista la imposibilidad de hormigonar de una sola vez la sección completa del arco, se exige la necesidad de minimizar lo máximo posible la diferencia de edades entre los hormigones de una misma sección. Para ello, se premonta en gran medida la ferralla, llegándose a hormigonar en una sola fase la losa inferior y los hastiales, y transcurriendo poco más de un día desde ello hasta la ejecución de la losa superior. Con esto se previene en gran medida la aparición de fisuras de retracción.

Una vez ejecutado el tramo de arco cimbrado, se ejecutan las pilas P-7 y P-10 sobre el arco, para permitir que la autocimbra avance hasta dichas pilas.

En este momento, se desmonta la autocimbra, procediéndose al comienzo del avance de los semiarcos mediante voladizos atirantados. Para ello, se disponen dos pilonos metálicos sobre el tablero, en la vertical de las pilas provisionales. A partir de este momento, los semiarcos avanzarán en voladizo mediante hormigonado con carro de avance. Para hacer factible dicho avance en voladizo, se disponen sucesivamente nueve familias de tirantes en cada semiarco. Cada familia cuenta con una pareja de cables delanteros anclados en las dovelas ejecutadas del arco, y una pareja de cables traseros anclados



Fig 9. Atirantamiento provisional

en los plintos del arco. De este modo, cada dos o tres dovelas según la zona, se dispone una pareja de tirantes. El proceso constructivo, para el control de esfuerzos y deformaciones, requiere de un ciclo de maniobras de tesado, retesado y destesado para cada familia de cables. Dichas operaciones se realizan mediante actuación indirecta sobre los tirantes, al haberse diseñado la pieza de anclaje de los mismos con dos barras que permiten una correcta regulación de la carga.

Como es lógico en una estructura tan sensible a las variaciones de carga, se ha establecido un completo sistema de seguimiento para el control de la correcta

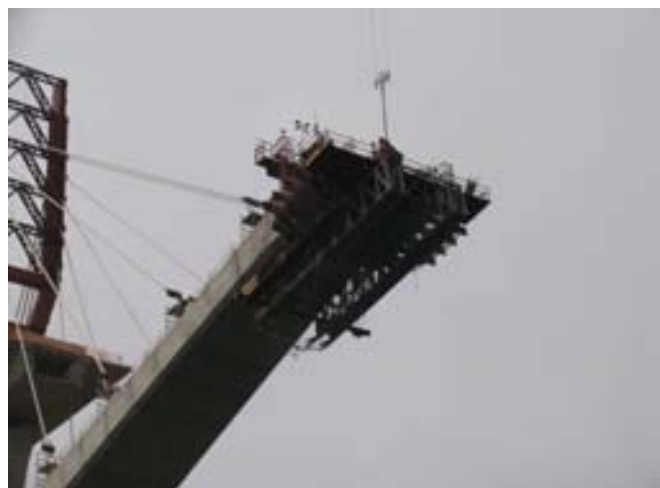


Fig 10. Carro de avance



Fig 11. Tirantes provisionales

ejecución de la estructura. En primer lugar, se realiza un chequeo y comprobación de la adecuación de las cargas obtenidas en tirantes durante las maniobras de puesta en carga, respecto a los valores de cálculo. En segundo lugar, se realiza un exhaustivo control topográfico para controlar la eventual desviación de las deformaciones reales respecto a las previstas. Por último, se ha realizado un completo programa de auscultación, incluyéndose la disposición de clinómetros, instrumentación de tirantes y de secciones principales del arco. Todos los datos obtenidos por el sistema de instrumentación puede ser seguido por ordenador de modo remoto.

Una vez se ejecutan los dos semiarcos, se desmonta el carro de avance del lado Cuenca, procediéndose a adaptar el carro del lado Valencia para la ejecución de la dovela de cierre del arco. Para ello, mediante un sistema de gatos y anclajes se nivelan los dos labios, procediéndose al hormigonado.

Tras el cierre del arco, se comienza la retirada de los cables de atirantamiento provisional y el desmontaje de los pilonos. Tras ello, se debe proceder a despear el arco de las pilas provisionales. Para ello se disponen en la parte superior de las mismas unos gatos que tienen como objeto levantar el puente de sus apoyos provisionales. En ese momento, se demuelen los macizos provisionales de apoyo, procediendo a soltar el arco, quedando exento. Debe mencionarse que, así como los semiarcos resultan muy flexibles antes de su unión, lo cual facilita las tareas de nivelación previas a la unión en clave, el arco cerrado es ya muy rígido y no experimenta grandes descensos al ser desapeado. A continuación, se demuelen las pilas provisionales.



Fig 12. Vista general del viaducto en construcción

Ya con el arco cerrado, se ejecutan las pilas cortas restantes de apoyo del tablero sobre el arco. Para la realización de los vanos restantes hasta cerrar el tablero se emplea ya una cimbra tradicional, apoyada directamente en el arco ya ejecutado.

FICHA TÉCNICA:

Nombre de la obra: Viaducto sobre el Embalse de Contreras.

Promotor: Administrador de Infraestructuras Ferroviarias (ADIF)

Autor del proyecto: Javier Manterola, Antonio Martínez, Juan Antonio Navarro, Silvia Fuente, Lorenzo Nogales

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

Dirección de Obra: ADIF: Julio Pérez Nicolás, Pablo Jiménez, Ángel Azcona

Asistencia Técnica Dirección de Obra: Sener-Gestec: José Carlos Pazos

Carlos Fernández Casado, S.L: Borja Martín

Empresa constructora: Azvi / Constructora San José: Luis Miguel Torres, Ernesto Maristany

Asistencia Técnica a la Constructora: EIPSA: José Antonio Llombart, Jordi Revoltós, Jorge Cascales

CONSTRUCCIÓN DEL PUENTE ARCO DEL EMBALSE DE CONTRERAS (261 M.) DE LA L.A.V. MADRID VALENCIA CON HORMIGÓN DE ALTA RESISTENCIA (70 MPA)

Pablo JIMENEZ GUIJARRO

Ingeniero de Caminos, C. y P. DEA
ADIF
Director de Obra
pablojimenez@adif.es

Ernesto MARISTANY PIÑEYRO

Ingeniero de Caminos, C. y P.
CONSTRUCTORA SAN JOSÉ, S.A.
Jefe de Obra Ute E. Contreras
emaristany@utecontreras.org

Luís M TORRES FERNANDEZ

Ingeniero de Caminos, C. y P.
AZVI, S.A.
Gerente Ute E. Contreras
lmtorres@utecontreras.org

Resumen

La construcción del Viaducto sobre el Embalse de Contreras del Nuevo Acceso Ferroviario de Levante, de tipología puente arco de 261 m de luz (record de España), exige el uso de hormigón de resistencia a compresión de 70 Mpa, requiere unas prescripciones técnicas muy exigentes en la dosificación

Se describen brevemente las características principales de la obra y la necesidad de emplear un hormigón de alta resistencia.

Se analizan los parámetros exigidos al hormigón y se detallan las características principales de los materiales constituyentes.

Finalmente se hace un repaso de los ensayos y controles realizados al hormigón fresco y endurecido durante la construcción del viaducto con un resumen de los resultados obtenidos.

Palabras clave: Hormigón de alta resistencia, reología, trabajabilidad, aditivo superplastificante, aditivo polifuncional, puente arco, módulo de elasticidad, Viaducto de Contreras.

1.- INTRODUCCIÓN

El Proyecto de Construcción de Plataforma del Nuevo Acceso Ferroviario de Alta Velocidad de Levante. Tramo Embalse de Contreras – Villargordo del Gabriel" se desarrolla en los términos municipales de Minglanilla en la provincia de Cuenca y Villargordo del Cabriel en la provincia de Valencia.

El cruce de la traza sobre el Embalse de Contreras se materializa por medio de un puente arco con tablero superior y longitud total de 587.25 m. La luz del arco es de 261 m, lo que constituye el record de España en esta tipología. La relación flecha luz es de 1/7.

El arco tiene una directriz poligonal curvilínea en el plano vertical, correspondiente al antifunicular de las cargas permanentes. Está inscrito en planta en una alineación circular de radio 3875 m. Está formado por una sección cajón rectangular de canto variable, de 3.40 m en la sección de arranques y 2.80 m en la clave. La anchura varía linealmente entre los 12.0 m de la sección de arranques hasta los 6.0 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 construcción del arco tiene dos zonas bien diferenciadas para cada semiarco: el primer tercio, que se ejecuta con cimbra porticada desde el plinto de arranque hasta una pila provisional, que se demolerá una vez cerrado y puesto en carga el arco, y los dos tercios restantes que se ejecutan por voladizos sucesivos, atirantados a un pilono metálico situado sobre el tablero, en la vertical de la pila provisional.

El procedimiento constructivo del tablero será por medio de autocimbra desde los estribos hasta la vertical de las pilas provisionales. El resto se ejecutará mediante una cimbra porticada especial apoyada en el mismo arco una vez finalizada la construcción de éste.



Fig 1. Vista de las obras del Viaducto sobre el Embalse de Contreras desde el lado Cuenca

Debido a la gran magnitud de los esfuerzos que soporta el arco y a su notable esbeltez es necesario recurrir al uso de un hormigón de alta resistencia (HAR), que podría definirse como aquel cuya resistencia a compresión ensayada en probeta cilíndrica de dimensiones 15 x 30 cm. debe superar los 50 MPa.

El término HAR puede no ser suficientemente preciso y quizás sea más correcta la utilización de hormigón de altas prestaciones (HAP), ya que las características de composición de un hormigón de alta resistencia implica la mejora de otras propiedades adicionales también muy importantes, como pueden ser una mayor compactación, un mejor comportamiento para resistir la acción de agentes agresivos, y una mayor durabilidad.

Para la elaboración de un hormigón de estas características habitualmente es necesario el empleo de cantidades de cemento superiores a las utilizadas en hormigones convencionales, relaciones agua / cemento inferiores, que se consiguen gracias a la adición imprescindible de aditivos superplastificantes reductores de agua de alta actividad y en ciertas ocasiones el uso de adiciones tales como el humo de sílice (microsílice) o la nanosílice.

2.- CARACTERÍSTICAS DEL HORMIGÓN

2.1- REQUISITOS EXIGIDOS AL HORMIGÓN

El principal requisito exigido al hormigón para la zona del arco y el tablero del viaducto es el de alcanzar una resistencia a compresión de 70 MPa a la edad de 28 días.

Además existen unos requisitos iniciales a cumplir en las operaciones de desencofrado y movimiento de los carros de hormigonado que son las siguientes:

- En la primera fase de hormigonado se necesitan resistencias a compresión superiores a 30 Mpa y una espera de 72 horas.
- En la segunda fase las resistencias a compresión deben superar los 25 Mpa y un tiempo de espera de 48 horas.

Actualmente y con los resultados holgados de resistencias a compresión conseguidos a edades tempranas se está estudiando la posibilidad de reducir los tiempos de espera con el fin de optimizar los tiempos de ejecución.

También se le exige al hormigón una trabajabilidad adecuada, que se consigue, a pesar del bajo contenido en agua, por el alto contenido en finos, el empleo de un árido fino rodado y la combinación de dos aditivos mezclados en proporciones adecuadas y de los que hablaremos más adelante. La consistencia del hormigón es variable en función de las distintas zonas de hormigonado. Esto es debido a la pendiente que tienen las distintas dovelas que componen el arco. Este fue el motivo principal por el cual se desechó la utilización de un hormigón autocompactante que dadas sus

propiedades de alta fluidez y deformabilidad hubiera facilitado el proceso de colocación del hormigón por su capacidad de relleno de moldes y encofrados con alta densidad de armado.



Fig 2. Carro de hormigonado del lado Cuenca

2.2.- PROPIEDADES DE LOS MATERIALES CONSTITUYENTES

Un hormigón de altas resistencias necesita una selección adecuada de los materiales que van a componer la mezcla.

Los requisitos exigidos a estos materiales constituyentes son los marcados por la Instrucción EHE. No obstante suelen buscarse otras propiedades no contempladas en la Instrucción y que mejoran las características finales del hormigón.

A continuación se describen los constituyentes empleados en la dosificación final, así como sus propiedades más destacadas.

CEMENTO.

Indudablemente existe una relación directa entre las características resistentes del cemento utilizado y las del hormigón resultante. Además de las características de resistencia existen otras propiedades tales como la finura de molido que influyen positivamente en la consecución del objetivo marcado.

De la extensa variedad de cementos disponibles en el mercado, para la elaboración de HAR parece obligado el uso de cementos de los tipos 42.5 y 52.5

En nuestro caso se optó por el empleo de un cemento CEM I 52,5 R procedente de Cementos La Unión, con un contenido en clinker del 96 % y una superficie específica Blaine de 5200 cm²/g.

Destacan entre sus propiedades físico mecánicas un principio de fraguado entorno a los 160 minutos y resistencias a compresión de 22 MPa a 1 día y de 67 MPa a 28 días, muy por encima del valor mínimo exigido a los cementos de esta clase.

ARIDOS.

De entre las posibles canteras analizadas se seleccionó la cantera de Moratalla próxima a la obra para el suministro de las distintas fracciones granulométricas utilizadas en la obra.

Para el árido fino se seleccionó una arena de naturaleza silícea con un tamaño de 0-6 mm.

Las principales características del árido fino se detallan en la tabla 1

Tabla 1. Características del árido fino

Ensayo	Resultado
% pasa 0.063	1.6
E.A	88
Coefficiente friabilidad (%)	18
Densidad (Kg/m ³)	2.57
Coefficiente absorción	0.9
Reactividad álcali-silíce	NO REACTIVO

El árido grueso presentaba varias opciones. En un primer lugar se realizaron ensayos con dos fracciones de árido grueso rodado 6-12 y 12-20 que eran las que se estaban utilizando para la elaboración del resto de hormigones empleados en la obra.

Posteriormente se vio que el tamaño máximo elegido podía causar problemas en la puesta en obra del hormigón debido a que los elementos a hormigonar tienen una alta densidad de armaduras con barras muy próximas unas a otras.

Esto condujo a reducir el tamaño máximo del árido grueso, suprimiéndose la fracción granulométrica 12-20 y empleándose una única fracción de árido grueso de tamaño 6-12 mm.

Además, se sustituyó el árido rodado por árido de machaqueo.

Estas dos modificaciones influyeron positivamente en el comportamiento mecánico del hormigón.

En principio se presupone una mayor adherencia del árido de machaqueo a la pasta de cemento que la que proporciona el árido rodado.

La energía de compactación necesaria para compactar hormigones de menor tamaño de árido es menor, por tanto se reduce el riesgo de segregación y como consecuencia, la concentración de agua en exceso en la zona próxima al árido grueso es también menor lo que implica conseguir una zona de transición más homogénea.

También es importante comentar que, en la mayoría de los tipos de roca, los áridos de menor tamaño son más resistentes que los de tamaño superior, debido a que durante el proceso de machaqueo se eliminan defectos internos del árido como pueden ser poros, microfisuras, materiales blandos, etc.

La naturaleza del árido grueso elegido es silícea y las principales características se muestran en la tabla 2.

Tabla 2. Características del árido grueso

Ensayo	Resultado
Desgaste LA	25
Índice de lajas	16
Densidad (Kg/m ³)	2.59
Coefficiente absorción	1.1
Reactividad álcali-carbonato	NO REACTIVO

ADITIVOS.

Se utilizan dos tipos de aditivos de distinta naturaleza.

El primero de ellos es el Glenium TC-1323. Se trata de un superplastificante / reductor de agua de alta actividad basado en la tecnología de los éteres policarboxilatos. Compuesto por moléculas sintéticas complejas con grupos funcionales y cadenas de diferentes longitudes, que son atraídas por las partículas de cemento rodeándolas rápidamente y produciendo un incremento de las cargas negativas de la superficie de las partículas de cemento. Este efecto provoca una repulsión electrostática que permite un aumento importante de la dispersión, lo que conduce a una mejora notable de la trabajabilidad del hormigón incluso con un contenido bajo de agua. Además estos aditivos poseen cadenas laterales que provocan impedimentos estéricos que facilitan enormemente que las partículas de cemento puedan mantenerse alejadas unas de otras generando un excelente efecto dispersante.

El segundo aditivo utilizado es el Melcret R2. Es un polifuncional a base de lignosulfonatos cuya función principal es la de mantener la consistencia del hormigón fresco durante un periodo mayor de tiempo, facilitando también la unión entre tongadas y evitando las posibles juntas que pudieran producirse sobre todo en épocas de altas temperaturas donde las pérdidas de consistencia del hormigón son más notables. Este aditivo debe emplearse en dosis correctas ya que una dosificación en exceso provocaría retrasos importantes e incontrolados en el fraguado del hormigón.

3.- DISEÑO DE LA MEZCLA.

Se estudiaron diversas dosificaciones, que dado el número de variables existentes, ofrecían una amplia posibilidad de tanteos. Las variables utilizadas fueron el contenido de cemento, la relación agua / cemento, los distintos porcentajes de aditivos empleados, los distintos porcentajes de participación de los áridos finos y gruesos y el empleo de adiciones tales como el humo de sílice y la nanosílice.

Los primeros tanteos se realizaron con 485 Kg de cemento por m³. Se empezó utilizando árido rodado con tamaños máximos de 12 y 20 mm. Los resultados obtenidos a 28 días no alcanzaban el valor de resistencia a compresión de 70 Mpa. Se decidió sustituir el árido rodado por árido de machaqueo y trabajar con un único tamaño de árido grueso de granulometría 6-12, especialmente por motivos de hormigonado en zonas de alta densidad de ferralla.

Con estos parámetros de partida, 485 Kg de cemento, árido grueso de machaqueo 6-12, se inició un nuevo plan de ensayos en el que se realizaron pruebas de hormigón sin adiciones y con dos tipos distintos de adiciones, la primera de ellas el humo de sílice con una dosificación del 6% y la segunda la nanosílice en un porcentaje del 1.5%.

Los resultados obtenidos no mostraron mejoras en los valores de resistencia a compresión con las adiciones, de hecho los valores del hormigón con humo de sílice quedaron por debajo del hormigón sin adición, mientras que con el uso de la nanosílice los valores eran muy parejos al del hormigón sin adición.

Por tanto se descartó el empleo de adiciones y se optó por buscar el objetivo de resistencia de 70 MPa con el incremento sucesivo de cemento en pequeñas cantidades.

En la tabla 3 se muestran los resultados de resistencia a compresión obtenidos en las distintas dosificaciones probadas.

Tabla 3. Resistencias a compresión (MPa) de las distintas dosificaciones

TIPO ARIDO GRUESO	CEMENTO (Kg/m ³)	HUMO DE SILICE (%)	NANOSILICE (%)	RESISTENCIA A COMPRESION A 28 DÍAS (MPa)
Rodado 20 mm.	485	----	----	63.2
Rodado 12 mm.	485	----	----	54.1
Machaqueo 12 mm.	485	----	----	66.5
Machaqueo 12 mm.	485	6	----	61.5
Machaqueo 12 mm.	485	----	1.5	66.3
Machaqueo 12 mm.	490	----	----	74.0
Machaqueo 12 mm.	495	----	----	75.5
Machaqueo 12 mm.	500	----	----	80.1

Finalmente se consiguió una dosificación con una cantidad de cemento de 500 Kg por m³ y una relación agua / cemento de 0.29 que cumplía con creces los requisitos exigidos de resistencia a compresión a 28 días de 70 Mpa.

La dosificación seleccionada se detalla a continuación.

ARIDO FINO 0/6	670 Kg/m ³
ARIDO GRUESO 6/12	1010 Kg/m ³
AGUA	145 Kg/m ³
CEMENTO	500 Kg/m ³
SUPERPLASTIFICANTE	2.0% spc
POLIFUNCIONAL	0.6% spc
RELACIÓN a/c	0.29

4.- CARACTERISTICAS DE LA CENTRAL DE HORMIGONADO

El hormigón se fabrica en una planta propia instalada exclusivamente para la elaboración de todos los hormigones utilizados en la obra.

Se trata de una amasadora de doble eje horizontal con capacidad para fabricar 3 m³. El rendimiento de la planta varía en función del tiempo de amasado. Para el caso concreto del hormigón HA-70 se está empleando un tiempo de amasado de 90 sg. superior al del resto de hormigones convencionales, con el objetivo de obtener una perfecta homogeneización de la mezcla.

La central también cuenta con cuatro silos de cemento, dos de ellos con capacidad de 100 toneladas y otros dos con capacidad de 60 toneladas, cuatro tolvas para almacenamiento de áridos de 30 toneladas cada una más una zona de acopios perfectamente diferenciada con muros de hormigón para separar las distintas fracciones granulométricas. Para el almacenamiento de los aditivos se cuenta con tres silos de 16000 litros de capacidad.



Fig 3. Planta de hormigón de Ute Embalse Contreras

5.- FABRICACIÓN Y PUESTA EN OBRA

En la fabricación del hormigón dado sus especiales características se presta atención a los siguientes puntos:

- Control estricto en las humedades de los áridos para el cálculo correcto de la cantidad de agua que aportan.
- Control diario de la calidad de los áridos, en especial del equivalente de arena.
- Incremento del tiempo de amasado a 90 sg. para asegurar una correcta homogeneización del hormigón.
- Transporte del hormigón en camión hormigonera de 9 m³ de capacidad, cargadas con 7 m³. De esta manera se consigue un mejor mantenimiento de la homogeneidad de la mezcla durante el transporte. Además, debido a la lentitud de la puesta en obra y a la necesidad de mantener la consistencia durante el hormigonado, no es conveniente el transporte de cantidades mayores, para no aumentar el tiempo que transcurre desde la fabricación a la puesta en obra. El tiempo estimado de llegada al tajo es de 20 minutos.
- Vertido con bomba o cubilote y compactación mediante vibradores de aguja.



Fig 4. Hormigonado de una sección del arco cimbrado

6.- PROPIEDADES DEL HORMIGÓN FRESCO

Las propiedades del hormigón fresco que se están controlando son la consistencia y la temperatura tanto del hormigón fresco como la ambiente.

Para el control de la consistencia se realiza el ensayo del cono de Abrams a todos los camiones hormigonera que llegan al tajo. Los resultados obtenidos en este ensayo varían, como ya hemos comentado con anterioridad, en función de la zona a hormigonar debido a la diferencia de pendiente existente entre las distintas dovelas que conforman el arco del viaducto. De ahí que encontremos valores tan extremos como 6 y 20 cm.

Este amplio abanico de conos de Abrams se consiguió utilizando distintos porcentajes del aditivo superplastificante que quedaron perfectamente definidos en los ensayos preliminares.

Dadas las condiciones climatológicas existentes en la zona, existía cierta preocupación por conocer el comportamiento reológico del hormigón a temperaturas tan dispares.

En invierno se esperaban temperaturas por debajo de 0° C. Este hecho obligó a la elaboración de un procedimiento específico para el hormigonado a bajas temperaturas. Este procedimiento detalla las medidas de actuación para el hormigonado en dichas condiciones.

En primer lugar es necesario conocer la previsión meteorológica para planificar el hormigonado y establecer la dosificación a emplear.

En la planta de hormigón se requiere un mayor control de todos los elementos para garantizar un correcto funcionamiento de la central de hormigonado. Debe asegurarse la utilización de árido del interior del acopio para evitar que este presente síntomas de helada. También deben extremarse las precauciones en cuanto a la toma de probetas y conservación de las mismas.

Durante la fabricación del hormigón se estableció que la temperatura mínima de la masa del hormigón debía ser superior a 13° C para la zona del arco y del tablero del viaducto (zonas de empleo del hormigón HA-70). Esta temperatura se consigue en la planta gracias a un sistema que permite calentar el agua utilizada en cada amasada a través de una caldera. Este sistema permite realizar un calentamiento selectivo del agua en todo momento con posibilidad de variar la temperatura, a diferencia de otros métodos habitualmente utilizados que calientan el agua del depósito del cual se abastece la planta.

Una vez hormigonado el elemento, y en función de la previsión de temperaturas mínimas, se establece el tipo de protección y duración de la misma para evitar la congelación del hormigón:

- Para temperaturas mínimas entre 5° C y 0° C el elemento ha de protegerse mediante plásticos.
- En rangos de temperaturas entre 0° C y -5° C la protección a aplicar consiste en una doble capa de plástico y calentamiento con cañones de calor.
- Para el tercer intervalo de temperaturas establecido de -5° C a -10° C se utilizarán lonas rellenas de fibra mineral junto con la aplicación de calor por medio de cañones.
- Por debajo de -10° C las operaciones de hormigonado quedan suspendidas.

Por otro lado también preocupaba el extremo opuesto. En verano las temperaturas superan los 35° C, y el comportamiento reológico del hormigón a esas temperaturas creaba dudas. Por este motivo se realizaron ensayos adicionales para estudiar dicho comportamiento. El objetivo era determinar el porcentaje correcto de los dos aditivos utilizados en la dosificación del hormigón para conseguir una consistencia de partida determinada y un mantenimiento de la consistencia que garantizase la correcta ejecución del proceso de hormigonado.

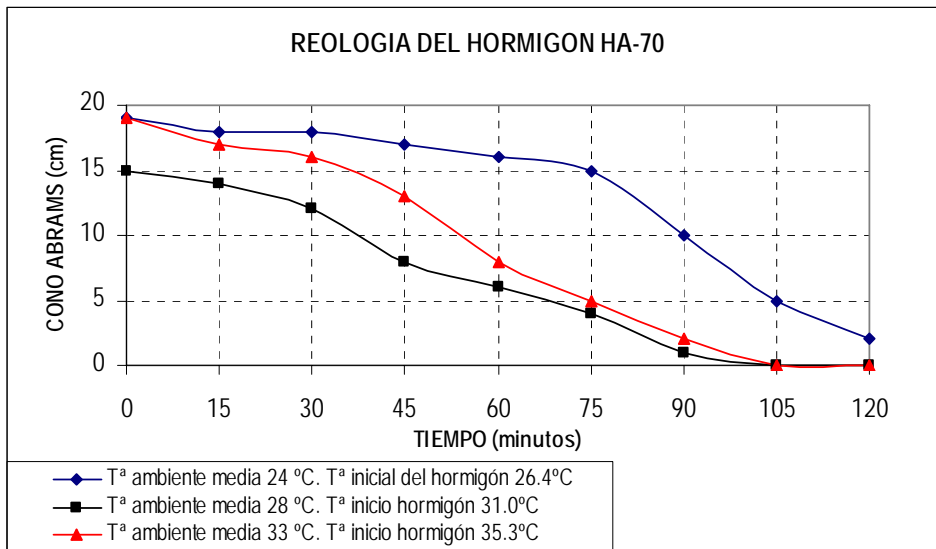
Los ensayos se realizaron en distintas franjas horarias para conseguir distintas temperaturas ambiente. El estudio reológico consistió en la realización del ensayo de cono de Abrams cada 15 minutos hasta pérdida de consistencia.

El primero de los ensayos se realizó a primera hora de la mañana buscando las temperaturas más bajas del día. La temperatura media del ensayo fue de 24° C, con una temperatura inicial del hormigón de 26.4° C. El comportamiento reológico del hormigón fue satisfactorio. A los 75 minutos de ensayo, únicamente se había producido una pérdida de cono de 5 cm, con un valor a ese tiempo de 15 cm que proporcionaba al hormigón una trabajabilidad muy aceptable.

Los otros dos ensayos se realizaron a media mañana y a primera hora de la tarde con temperaturas ambientes más altas y temperaturas iniciales del hormigón también mayores, debido al incremento de temperatura de todos sus constituyentes.

Las curvas reológicas en estos dos casos son muy similares. Existe una pérdida de consistencia muy rápida. A los 75 minutos de ensayo el valor del cono de Abrams es de tan solo 5 cm, valor que dificulta la trabajabilidad y puesta en obra del hormigón.

Grafico 1. Reología del hormigón a diferentes temperaturas



7.- PROPIEDADES DEL HORMIGÓN ENDURECIDO

Para controlar las propiedades del hormigón endurecido, se analizan dos de sus características que son la resistencia a compresión y el módulo de elasticidad.

Se prevé la fabricación de un total de 5142 m³ de HA-70 repartidos en 3582 m³ para la construcción del arco y 1560 m³ para la ejecución del tablero lo que implica la fabricación de más de 300 series de probetas cilíndricas de 15 x 30 cm.

Las probetas de hormigón se están refrentando con un mortero especial que sustituye al habitual método de refrentado con azufre, y que está destinado al refrentado de probetas de hormigones de altas resistencias. El mortero tiene una composición a base de azufre y adiciones que le confieren una elevada resistencia a compresión. Esta alta resistencia minimiza las desviaciones entre probetas de una misma serie, obteniéndose valores de roturas a compresión próximos a la realidad.

Los resultados de los que se dispone a fecha de hoy de las resistencias a compresión quedan reflejados en la tabla 4.

Tabla 4. Resistencia a compresión en MPa

	EDAD (días)				
	2	3	7	28	90
Nº SERIES	46	70	121	114	82
VALOR MEDIO	55.7	61.2	75.0	84.6	92.5
VALOR MAXIMO	72.6	75.1	82.5	97.8	104.9

Los resultados de los ensayos muestran valores de resistencias a la edad de dos días que ya superan los 50 MPa. El valor de 70 MPa exigido al hormigón a 28 días ya se consigue a la edad de 7 días. En algunas probetas se ha llegado a superar los 100 MPa a la edad de 90 días.

Otro aspecto importante es que en el diseño de la mezcla de hormigón no se ha buscado optimizar la dosificación sino que se ha tratado de asegurar que la resistencia exigida de 70 MPa se conseguía de una forma holgada, para así evitar posibles problemas de resistencias que acarrearían nefastas consecuencias para el correcto desarrollo de la obra y el cumplimiento de las plazos de ejecución de la misma.

La segunda de las propiedades estudiada ha sido el módulo de elasticidad.

Los datos disponibles se detallan en la tabla 5.

Tabla 5. Módulo de elasticidad en MPa

	EDAD (días)					
	1	2	3	7	28	90
Nº SERIES	5	5	23	29	19	2
VALOR MEDIO	30846	37028	37933	39161	40999	41936
VALOR MAXIMO	35516	40657	44826	47276	46751	43559

Debe destacarse que a la edad de 1 día ya se superan los 30 GPa, obteniéndose valores que superan los 40 GPa a 28 días.

8.- CONCLUSIONES

El proceso constructivo del viaducto sobre el embalse de Contreras, tramo destacado por su singularidad dentro del trazado de la línea de alta velocidad Madrid – Valencia, exige el diseño de un hormigón de alta resistencia para la construcción del arco y del tablero de dicho viaducto.

Se presta especial atención a la selección de los constituyentes, así como al diseño correcto de la dosificación para garantizar la obtención de las resistencias mecánicas exigidas y la trabajabilidad necesaria en cada fase de hormigonado, especialmente en lugares de difícil acceso como son las zonas de alta densidad de armadura.

Los estudios previos realizados con los aditivos en periodos de altas temperaturas y las medidas de actuación para hormigonados a bajas temperaturas han posibilitado la correcta ejecución del proceso de hormigonado.

Las adiciones efectuadas al hormigón consisten en un superplastificante, elaborado con éteres policarboxilatos y un aditivo polifuncional a base de lignosulfonatos. Se ha desechado el empleo de humo de sílice y nanosílice al no observarse con su adición mejoras en la resistencia del hormigón.

La resistencia requerida de 70 Mpa se está alcanzando de forma holgada, obteniéndose a 7 días una resistencia media de 75 Mpa y un módulo de elasticidad de 40.000 Mpa.



Fig 5. Vista de las obras del Viaducto sobre el Embalse de Contreras desde el lado Valencia