

Hormigón autocompactante utilizado en la construcción del arco del viaducto de Almonte

Self-compacting concrete used in the construction of the arch of the Almonte Viaduct

Pedro Cavero de Pablo^a

^aIngeniero de Caminos, Canales y Puertos. Director de la división ferroviaria de FCC Construcción y Gerente de la UTE Alcántara-Garrovilleas. Madrid

Recibido el 26 de abril de 2018; aceptado el 7 de enero de 2019

RESUMEN

La elaboración y puesta en obra del hormigón del arco del viaducto de Almonte requirió un estudio profundo y exhaustivo de más de un año de duración dada la particularidad del elemento a construir. En el artículo se repasa la cronología de ensayos y pruebas y se explican los diferentes factores y motivos en el camino recorrido hasta dar con la solución final.

© 2020 Asociación Española de Ingeniería Estructural (ACHE). Publicado por Cinter Divulgación Técnica S.L.L. Todos los derechos reservados.

PALABRAS CLAVE: Hormigón autocompactante, alta resistencia, cementos última generación, pruebas *in situ*, etringita diferida.

ABSTRACT

The production and installation of the concrete of the arch of the Almonte Viaduct required a deep and exhaustive study of more than one year of duration due to the particularity of the element to be built. The article reviews the chronology of tests and explains the different factors and reasons on the way to find the final solution.

© 2020 Asociación Española de Ingeniería Estructural (ACHE). Published by Cinter Divulgación Técnica S.L.L. All rights reserved.

KEYWORDS: Self-compacting concrete, high resistance, last generation concretes, in situ test, deferred etringita.

1.

INTRODUCCIÓN

El hormigón con el que se ha calculado y proyectado el arco variable del viaducto sobre el río Almonte para la ejecución del tramo embalse de Alcántara-Garrovilleas de la línea de alta velocidad Madrid-Extremadura, es un hormigón de alta resistencia, $f_{ct}=80$ MPa, que debido a la alta densidad de armadura pasiva que presenta el arco ha de ser autocompactante. Un hormigón autocompactante es un hormigón capaz de fluir y rellenar cualquier parte y rincón del encofrado a través del armado simplemente por la acción de su propio peso, sin la necesidad de cualquier otro método de compactación externo y sin segregación o indicios de bloqueo [1]. Además, este hormigón ha de ser puesto en obra en condiciones especiales dada la longitud del arco a ejecutar (384 metros) lo que implica grandes

distancias de bombeo, superiores a 200 metros, la altura del mismo (70 metros aproximadamente en la zona de clave), *figuras 1 y 2*, la inclinación (varía desde los 37 grados que forma con el terreno en el arranque hasta alcanzar la horizontalidad en el cierre), la geometría variable en todos sus paramentos con la que ha sido diseñado, el fuerte armado, *figura 3*, que presenta y la necesidad de alcanzar altas resistencias iniciales superiores a 40 MPa a las 12 horas que permitan desencofrar la pieza hormigonada y avanzar con el carro logrando así una secuencia en el ciclo que permita la ejecución del arco en los plazos requeridos.

Debido a esta delicada puesta en obra y al importante compromiso de su ubicación dentro de la estructura y a la falta de experiencia previa de los proveedores habituales en el ámbito del proyecto, este hormigón ha sido estudiado, diseña-

* Persona de contacto / Corresponding author.
Correo-e / email: pcaverop@fcc.es (Pedro Cavero de Pablo)



Figuras 1 y 2. Puente y voladizos.

do y producido con especial delicadeza y profundo interés por los Servicios Técnicos de FCC Construcción y por los departamentos de calidad y producción del equipo de obra.

El objeto de este artículo es hacer una cronología de los ensayos y pruebas realizados a los materiales, primero por separado y posteriormente en conjunto, para comprobar las bondades de la dosificación realizada para este tipo de hormigón en aras de conseguir un hormigón que se compacte por la acción de su propio peso, sin necesidad de energía de vibración ni de cualquier otro método de compactación.

En estas pocas líneas se resume el trabajo de más de un año del equipo de FCC en el diseño, fabricación y pruebas de este hormigón tan singular.

2. ESTUDIO DE MATERIALES INICIAL

En un hormigón autocompactante los componentes de la mezcla son variados y deben estudiarse cuidadosamente para conseguir que un hormigón de alta consistencia y cohesión pueda atravesar una densa armadura con un perfecto relleno sin bloqueo del árido grueso y sin segregación ni exudación. Los diferentes componentes de la formulación a estudiar se han analizado tanto en el laboratorio central de FCC Construcción como en el laboratorio contratado por el equipo de obra y que la empresa Geotécnica del Sur tiene en la obra.

Para ello, se localizaron los áridos, cementos, aditivos y adiciones de los que se disponía en el mercado, disponiéndose de las siguientes alternativas:

Cemento

Se estudia desde el inicio dos posibilidades, el cemento tradicional tipo I-52,5 R y el cemento especial tipo I-52,5 UL-TRAVAL R de muy altas resistencias iniciales y finales. Este cemento es fabricado por Cementos Portland Valderrivas en sus instalaciones de Olazagutía (Navarra) y su característica principal es la composición del clínker y la finura de molido que permite una mayor hidratación que la habitual en un cemento convencional, es por ello, capaz de desarrollar muy altas prestaciones mecánicas a cortas edades y está indicado en hormigones de altas resistencias especialmente aquellos adicionados.

Árido grueso

Se emplea en las pruebas tanto áridos procedentes de la cantera de Villaluengo que la empresa Hormigones CG tiene en las cercanías de la obra y que en el estudio de materiales del proyecto se incluye como una de las canteras válidas para fabricar hormigón, de origen ofítico y que se han empleado en la fabricación del resto de hormigones de la obra, y árido procedente de canteras ubicadas en la provincia de Madrid, con el fin de conocer la incidencia que el árido grueso tiene en la resistencia final de las diferentes dosificaciones.

Árido fino

Se ensayan y analizan las diferentes canteras y graveras presentes en el estudio de materiales del proyecto. Al no encontrar en las mismas arenas que cumplan los requisitos necesarios para

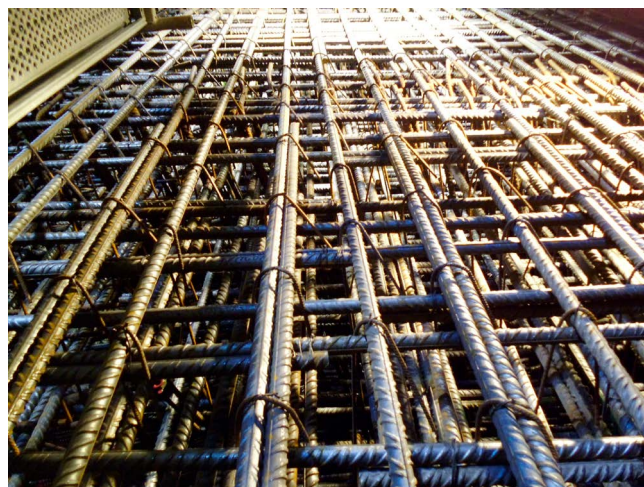


Figura 3. Armado de una de las dovelas.

la fabricación de hormigón autocompactante se decide buscar graveras en el río Guadiana y que estén localizadas lo más próximo a la traza. Finalmente se opta por la arena procedente de la gravera que la empresa CIMPOR tiene en Guareña (Badajoz) a 150 km de la localización de la obra.

Aditivo superfluidificante para la reducción de agua

Se estudian los diferentes productos suministrados por las únicas tres empresas proveedoras de aditivos, que tienen aditivos específicos para la fabricación de hormigones autocompactantes y de altas resistencias. Estas empresas son, BASF, SIKA y MAPEI.

Adición

Se estudian tres diferentes adiciones en las pruebas efectuadas en el laboratorio de FCC en Madrid. Estas son las cenizas volantes procedentes de la central térmica de Andorra y de la central térmica de Compostilla (León), humo de sílice y filler calizo.

3. ÁNÁLISIS DE CADA COMPONENTE

Cemento

Se contempla como primera opción el empleo de CEM I 52,5 R al ser este el cemento común con el que se fabrican hormigones de altas prestaciones.

Las primeras pruebas efectuadas en el laboratorio central de FCC Construcción indican que con una cantidad de 550 kg de cemento CEM I 52,5 R se obtienen hormigones que cumplen la autocompactabilidad y que se aproximan a las resistencias características requeridas. Como se puede ver, se demanda una gran cantidad de cemento, lo que puede comprometer el hormigón fabricado ya que no se conoce cómo puede evolucionar el hormigón con cantidades tan altas de cemento en cuanto a temperatura y fisuración, además la norma EHE-08 [2] recomienda no superar los 500 kg/m³ en la dosificación de cualquier tipo de hormigón.

Tras los resultados obtenidos en estas pruebas, realizadas en el laboratorio central de FCC, se toma la decisión de estudiar

una dosificación empleando CEM I 52,5 R ULTRAVAL, ya que con cantidades inferiores de cemento se consiguen las resistencias exigidas, minorando las temperaturas alcanzadas.

Tras 46 pruebas efectuadas con los diferentes cementos y demás componentes del hormigón mencionados anteriormente se proponen dos dosificaciones, una con cada tipo de cemento, para su fabricación y estudio a escala real y en la planta de obra.

Para comprobar el comportamiento del hormigón a escala real, se organizan una serie de pruebas a realizar en la planta de obra. Los días 14, 15 y 16 de noviembre de 2011 se realizan las pruebas en la planta de obra, con la dosificación correspondiente al CEM I 52,5 R. De igual manera, los días 21, 22 y 23 de noviembre de 2011, se realizaron el mismo tipo de pruebas en la planta de obra, pero esta vez con el cemento CEM I 52,5 R ULTRAVAL.

Se proponen como dosificaciones posibles, ambas objeto de estudio y pruebas hasta llegar a definir una dosificación óptima, las siguientes:

Dosificación tipo con cemento CEM I 52,5 R:

- Cemento CEM I 52,5 R: 550 kg.
- Cenizas volantes: 100 kg.
- Arena 0/4: 960 kg.
- Árido 6/12: 720 kg.
- Agua: 180 l.
- Aditivo: 2.1% SPC (sobre el peso de cemento)
- Estabilizante: cantidad a determinar en las pruebas y a proponer por cada suministrador de aditivos.

Dosificación tipo con cemento CEM I 52,5 R ULTRAVAL:

- Cemento ULTRAVAL: 440 kg.
- Cenizas volantes: 125 kg.
- Arena 0/4: 1 015 kg.
- Árido 6/12: 735 kg.
- Agua: 172 l.
- Aditivo: 2.1% SPC.
- Estabilizante: cantidad a determinar en las pruebas y a proponer por cada suministrador de aditivos.

Se realizaron las pruebas en la planta de obra, con la dosificación por m³ correspondiente al CEM I 52,5 R. En estas pruebas, se destinó un día de los señalados anteriormente para el estudio de tres marcas distintas de aditivos: MAPEI, SIKA y BASF. Partiendo de la dosificación base antes descrita, cada marca comercial proponía una cantidad de aditivo a añadir a la fórmula, de manera que se pudiese optimizar al máximo la relación a/c con el empleo de sus aditivos, a fin de conseguir que el hormigón presentase las mejores condiciones posibles en cuanto a su fluidez o habilidad de fluir sin ayuda externa, resistencia al bloqueo o habilidad para pasar entre las barras de armadura, resistencia a la segregación, durabilidad en obra y resistencia del hormigón, comprobada mediante la fabricación de probetas. Ninguna de las marcas dada la cercanía de la planta de obra al punto de vertido consideró necesario el uso de estabilizantes.

Se realizaron ensayos de escurrimiento, caja en L y escurrimiento con anillo japonés para comprobar la autocompactabilidad durante un periodo de “tiempo abierto”; este mismo hormigón se llevó a obra para confirmar su bombeabilidad.

Durante estos días, también se probaron variantes de la dosificación inicial en cuanto a cantidad de CEM I 52,5 R, para tener un conjunto de datos lo más amplio posible.

De igual manera se realizaron el mismo tipo de pruebas en la planta de obra, pero esta vez con el cemento CEM I 52,5 R ULTRAVAL.

Se adjunta a continuación la tabla A.17.2 *Requisitos generales para la autocompactabilidad* del Anejo 17 de la norma EHE-08 [2] “Recomendaciones para la utilización del hormigón autocompactante”. (tabla 1)

TABLA 1
Requisitos generales autocompactabilidad

| ENSAYO | Parámetro medido | Rango admisible |
|----------------------------|------------------|----------------------------------|
| | T ₅₀ | T ₅₀ ≤ 8 seg |
| Escurrimiento | d _f | 550 mm ≤ d _f ≤ 850 mm |
| Caja en L | C _{bl} | 0,75 ≤ C _{bl} ≤ 1,00 |
| Escurrimiento con anillo J | D _f | ≥ d _f - 50 mm |

Donde,

T₅₀ es el tiempo en que se extiende la muestra.

d_f es el diámetro del flujo. Este y el valor anterior miden la fluidez de la muestra.

C_{bl} es el coeficiente de bloqueo y DJf es el indicador de la capacidad de paso del hormigón, ambos son los parámetros necesarios para conocer la resistencia al bloqueo de la muestra.

Se hicieron pruebas con 510, 530 y 550 kg de CEM I 52,5 R y con 440 kg de CEM I 52,5R ULTRAVAL.

A la vista de los resultados de resistencia obtenidos a 28 días, la cantidad de CEM I 52,5 R necesaria para no tener problemas de resistencia, sería superior a los 550 kg que marca la norma EHE-08 [2] como máximo recomendable; además, al ser una cantidad tan alta de cemento, no se tiene la seguridad de que este quedase totalmente hidratado.

Tras analizar estos datos, se decide inicialmente emplear el CEM I 52,5 R ULTRAVAL, ya que con cantidades de cemento menores a las máximas permitidas por la normativa se consiguen las resistencias exigidas, lo que beneficia en cuanto a que el hormigón desarrollará menor calor de hidratación y se minimizará el riesgo de fisuración, además de garantizar la hidratación del cemento.

Durante los meses de julio, agosto, septiembre y octubre de 2012, se realizan más pruebas con cemento CEM I 52,5 R, CEM I 52,5 N SR, CEM I 52,5 R ULTRAVAL, CEM I 52,5 R ULTRAVAL SR. Se empezó a utilizar el cemento sulforresistente (SR) debido a los incrementos de temperatura registrados y el posible riesgo asociado de formación de etringita diferida.

Árido Grueso

Las mayores exigencias en cuanto a materiales para la confección de hormigón autocompactante están en este árido. A pesar de que no existe limitación en cuanto a su naturaleza, sí existen limitaciones con el tamaño máximo y el coeficiente de forma.



Figura 4. Acopio AG 6/12 O.

El tamaño máximo del árido es preferible limitarlo a 20 mm. Evidentemente, el tamaño máximo deberá guardar relación con la distancia entre armaduras, pero dado el caso que fuera posible trabajar con tamaños superiores a 20-25 mm, no deberá excederse este tamaño ya que implica un elevado riesgo de bloqueo y segregación de la masa. De todas formas, los mejores resultados globales se consiguen empleando tamaños máximos entre 12-16 mm.

En principio, se plantea el empleo del AG 6/12 O, [figura 4](#), árido de naturaleza ofítica que se está empleando en la fabricación del resto de los hormigones de la obra. Para descartar la influencia del árido en la resistencia del hormigón, se realizan pruebas en el laboratorio central de FCC con un árido de Madrid, llegándose a la conclusión de que la calidad del árido de la obra es suficiente para alcanzar las resistencias que buscamos.

Por otro lado, este árido AG 6/12 O tiene una densidad elevada, lo que plantea posibles problemas de segregación en el hormigón, unido al hecho de tener que bombear el hormigón a 200 metros de distancia y 70 metros de altura. Para evitar este problema se propone el empleo de una arena de río “correctora”, la cual nos permitiría alcanzar el % de finos necesarios y mejorar las propiedades del hormigón, en cuanto a escurrimiento, bloqueo, fluidez y colocación en obra.

Árido fino

Para la fabricación del hormigón autocompactante se requiere una arena de calidad con unas determinadas características:

- Granulometría continua.
- Equivalente de arena alto (>80) según NLT 113/87 [\[3\]](#).



Figura 5. Acopio Arena Cantera de Guareña.

- Bajo contenido en finos.
- Tamaño máximo no superior a 4 mm y un % de pasa entorno al 95 y en la que más del 75% pase por el tamiz 1 mm.
- Árido redondeado que facilite el deslizamiento del conjunto de la mezcla y la ausencia de segregación y bloqueo.

El motivo de la utilización de una arena de este tipo es garantizar la autocompactabilidad de la mezcla. Se visita y toma muestras de las canteras que en el estudio de materiales del proyecto se afirma son válidas para la fabricación de hormigón. Desgraciadamente no se consigue localizar en ninguna de las graveras y canteras que el proyecto indica en su anejo nº 4, Estudio de materiales, una arena que cumpla las características necesarias para poder utilizarla en la confección del hormigón autocompactable. Por ello, se decide visitar graveras del río Guadiana que históricamente han presentado áridos adecuados a este tipo de prescripciones.

Todas las graveras visitadas se encuentran en un radio inferior a los 150 km desde la obra.

Así se localiza la gravera de la empresa CIMPOR que presenta arenas síliceas de gran calidad con equivalentes de arena altos (82), con granulometrías continuas y excelente comportamiento en los ensayos de escurrimiento, anillo japonés y caja L. Posee graveras en los términos municipales de Lobón a 133 km de la obra pero que tienen comprometida la producción para otros clientes, Guareña a 135 km de la obra que dispondrían de reservas suficientes para la obra y entre Badajoz y Olivenza, a 140 km de la obra que se descarta por distancia. Finalmente es la instalación de Guareña la elegida, [figura 5](#).

Existen otras graveras que finalmente se descartan al estar a distancias superiores de la obra.

Aditivos

El aditivo superplastificante es imprescindible para la confección de hormigón autocompactante. No todos los tipos son utilizables. Los aditivos basados en naftalen sulfonatos o condensados de melamina no ofrecen suficiente poder reductor de agua y en consecuencia, los únicos tipos utilizables son los basados en éter policarboxílico modificado.

Se estudian en el laboratorio central de FCC diferentes dosificaciones con las diferentes empresas que muestran ex-

perencia en este tipo de hormigones en el mercado nacional, concluyéndose que los tres, MAPEI, SIKA Y BASF, presentan parecidas características a confirmar durante los ensayos a ejecutar en obra.

En las pruebas realizadas en obra los días 14,15 y 16 de noviembre de 2011 (con la dosificación correspondiente al CEM I 52,5 R) y los días 21, 22 y 23 de noviembre de 2011 (con la dosificación correspondiente al CEM I 52,5 R ULTRAVAL) se destinó un día de los señalados anteriormente para el estudio de las tres marcas distintas de aditivos.

Partiendo de una dosificación base, cada marca de aditivo proponía una cantidad de aditivo a añadir a la fórmula, de manera que se pudiese optimizar al máximo la relación a/c con el empleo de sus aditivos, a fin de conseguir que el hormigón presentase las mejores condiciones posibles en cuanto a su fluidez o habilidad de fluir sin ayuda externa, resistencia al bloqueo o habilidad para pasar entre las barras de armadura, resistencia a la segregación, durabilidad en obra y resistencia del hormigón, comprobada mediante la fabricación de probetas.

Se realizaron ensayos de escurrimiento, caja en L y escurrimiento con anillo japonés para comprobar la autocompatibilidad durante un periodo de “tiempo abierto”; este mismo hormigón se llevó a obra para confirmar la bombeabilidad del mismo.

El aditivo seleccionado será de la marca BASF, en concreto, GLENIUM TC 1425, ya que es el que mejor se ha comportado en las pruebas.

Adiciones

El empleo de adiciones es imprescindible para satisfacer la demanda de finos que requiere el hormigón autocompactante.

En la fase de estudio previo desarrollada en el laboratorio de FCC se procedió a utilizar humo de sílice, filler calizo y cenizas volantes como adiciones que nos permitirían elevar la resistencia final del hormigón y mejorar las condiciones de consistencia.

El humo de sílice en las diferentes pruebas aportó condiciones de trabajabilidad malas ya que segregaba el hormigón y escasas resistencias con dosificaciones de cemento y árido similares.

El filler calizo proporcionó buenas resistencias pero hormigones con escasa trabajabilidad debido a la granulometría del mismo y que no rellenaban correctamente los moldes por lo que se descartó su utilización.

Las cenizas volantes presentaron hormigones con una correcta compactabilidad y resistencias adecuadas por ello, se escogió este producto.

En general, las cenizas ofrecen grandes resultados en aplicaciones donde se requiera elevado mantenimiento de la consistencia. El empleo de cenizas permite trabajar con cantidades de cemento más ajustadas debido a su puzolanidad. Las cenizas a emplear serán unas cenizas volantes procedentes de la central térmica de Compostilla (León), ya que le incorpora menor % de aire al hormigón, hecho que favorece la resistencia del hormigón.

Se ha estudiado el empleo de otras cenizas procedentes de la central térmica de Andorra, desechándose al final por su aportación de porcentaje de aire al hormigón y por no cumplir con el índice de actividad, según UNE-EN 196-1 [4].

4.

ENSAYOS CARACTERÍSTICOS

Los ensayos característicos, celebrados una vez se había determinado qué materiales eran los mejores para conseguir el objetivo, tienen la finalidad de comprobar la idoneidad de los materiales componentes, las dosificaciones y las instalaciones a emplear en la fabricación del hormigón, en relación con su capacidad mecánica y su durabilidad. Para ello, se realizan ensayos de resistencia a compresión del hormigón autocompactante HA-80/AC/12/IIb, fabricado en las mismas condiciones de la central y con los mismos medios de transporte con los que se hará el suministro a la obra.

El objetivo es demostrar mediante ensayos, que se efectuarán en laboratorio sobre hormigones fabricados, que con los materiales, dosificación y proceso de ejecución previstos es posible conseguir un hormigón que posea las condiciones de resistencia (80 MPa) y durabilidad (ambiente IIb) que se le exigen en el proyecto.

Se procedió a realizar los ensayos característicos del hormigón HA80/AC/12/IIb a emplear en la ejecución del arco del viaducto sobre el río Almonte, empleando para ello los componentes en las cantidades expresadas en la tabla 2, como resultado del estudio previo de materiales a emplear y que se ha explicado en el apartado anterior:

TABLA 2
Dosificación propuesta

| COMPONENTE | CANTIDAD POR m ³ |
|---------------------------|-----------------------------|
| CEMENTO I 52,5 R ULTRAVAL | 440 kg |
| CENIZAS VOLANTES | 125 kg |
| ARENA 0/4 SL | 1 022 kg |
| ARIDO 6/12 O | 743 kg |
| TC-1425 BASF | 12.43 l |
| AGUA | 155 l |

Los ensayos se llevan a cabo a los 28 días de edad sobre probetas procedentes de seis amasadas diferentes.

Para la resistencia a compresión, se calcula el valor medio correspondiente a cada amasada a partir de los resultados individuales de rotura, lo que permite obtener una serie de serie resultados medios:

$$X_1 \leq X_2 \leq \dots \leq X_6 \quad (1)$$

Se aceptará la dosificación y el proceso de ejecución correspondiente, a los efectos de resistencia, cuando se cumpla:

$$X_6 - 0,8 (X_6 - X_1) \geq f_{ck} \quad (2)$$

Donde,

X_1, \dots, X_6 , son los resultados medios obtenidos
 f_{ck} es la resistencia característica especificada en el proyecto.

Cabe destacar que para la ejecución de estos ensayos se preparó una dovela de prueba.



Figura 6. Cono de Abrams.



Figura 7. Ejecución de ensayo de caja en L.



Figura 8. Ejecución de ensayo de escurrimiento con anillo japonés



Figura 9. Ensayo de aire ocluido.

Se diseña una dovela tipo que se arma siguiendo la cuantía dispuesta en la dovela más armada de las 33 que componen el arco, dovela 1. Dicha dovela tendrá sección rectangular de 6.00x4.80 metros con espesores de muro de 1 metro y una longitud de 2 metros.

Para comprobar la necesidad de la utilización de empalmes mecánicos y así minimizar un posible exceso de presencia de barras de armado que impidan la correcta compacidad del hormigón, se procederá a solapar barras según la normativa actual en parte de la sección, mientras que en el resto de la misma se procederá a colocar el armado sin solapes.

Se modifica la geometría octogonal de la dovela del arco por una geometría rectangular que empeora las condiciones de puesta en obra ya que evita la presencia de planos inclinados que siempre serán más favorable al deslizamiento del hormigón por las paredes del encofrado que en planos ortogonales donde el hormigón no encuentra dichos planos favorables para el deslizamiento y por lo tanto para la puesta en obra.

Para asemejar la inclinación que las dovelas van a presentar cuando se ejecute el arco se decide ubicar la dovela de prueba en una plano de 20 grados de inclinación.

Se realiza una amasada de 2 m³ de prueba, para comprobar el aspecto de hormigón en cuanto a fluidez y segregación y asimismo, ejecutar un dado de hormigón, con el fin de estudiar la evolución de temperatura de una masa de hormigón lo más similar posible a los volúmenes a ejecutar en obra. A este dado, se le equipa de un termopar que transmitirá la temperatura del hormigón al baño de agua que lleva asociado, donde se introducirán probetas para romper a edades tempranas (6, 12 horas). También se equipa este dado con un *data logger* que nos permitirá registrar las temperaturas que se vayan dando en el bloque de hormigón

A continuación, se fabrican 6 amasadas de 2 m³ para la ejecución de los ensayos. A estas amasadas, cada laboratorio le hace probetas y ensayos de escurrimiento, caja en L y anillo japonés, figuras 6 a 9.

Además, se hacen ensayos de % de aire ocluido a 2 amasadas.

Una vez realizados los ensayos característicos, el hormigón restante se envía a la obra para el hormigonado de la parte inferior de la dovela de prueba, donde se comprueba el comportamiento del mismo.

TABLA 3
Resultado de los ensayos obtenidos

| | ESCURRIMIENTO | | CAJA EN L | ESCURRIMIENTO CON ANILLO | AIRE |
|----------------|---------------------|-------------------------|------------------------------|-----------------------------|------|
| | $T_{50} \leq 8$ seg | $550 \leq d_f \leq 850$ | $0,75 \leq C_{br} \leq 1,00$ | $\geq d_f - 50$ | % |
| IL-CAC-HA 1414 | 7 | 660 | 94 | 585 | 6.5 |
| IL-CAC-HA-1415 | 8 | 585 | 80 | 580 | 7.2 |
| IL-CAC-HA-1416 | 9 | 550 | 79.2 | | 6.3 |
| IL-CAC-HA-1417 | 4 | 665 | 89.5 | 680 | 7.6 |
| IL-CAC-HA-1418 | 7 | 555 | 61 | | - |
| IL-CAC-HA-1419 | 6 | 595 | 79.2 | 570 | 7.4 |

TABLA 4
Resistencia a compresión de las amasadas

| Nº | ESCURRIMIENTO (mm) | ROTURA A 7 DÍAS (MPa) | ROTURA A 28 DÍAS (MPa) |
|----|--------------------|-----------------------|------------------------|
| 1 | 660 | 60.8 | 71.5 |
| 2 | 585 | 65.1 | 74.5 |
| 3 | 550 | 68 | 78.5 |
| 4 | 665 | 63.9 | 73.5 |
| 5 | 555 | 66.9 | 78.2 |
| 6 | 595 | 59.7 | 70 |



Figura 10. Frente dovela de prueba.



Figura 11. Dovela de prueba tras desmolde.

Los ensayos realizados a las amasadas fabricadas son los que se pueden ver en la [tabla 3](#).

Las resistencias a 7 días obtenidas por los distintos laboratorios participantes en las pruebas presentaban bastante dispersión augurando que a 28 días y probablemente debido a la presencia de aire ocluido no se alcanzasen los 80 MPa necesarios.

Los resultados obtenidos en las seis amasadas son los que aparecen en la [tabla 4](#).

Según lo expuesto en el cuadro anterior, y siguiendo la fórmula contenida en EHE-08 los resultados obtenidos los ensayos se consideraron no aptos.

El motivo por el cual estos ensayos no resultaron satisfactorios se encuentra en el alto porcentaje de aire ocluido que

se registra en el hormigón, con valores en torno al 7%, lo que hace que baje la densidad de las probetas (con valores inferiores a 2.40 g/cm³, alrededor de 2.28-2.30) y en consecuencia la resistencia a compresión también sea menor.

La prueba no cumple en cuanto a resistencia a compresión, debido a la presencia de aire ocluido, superior al 2%, pero sí cumple en cuanto al resto de parámetros exigidos y al desmoldar la dovela de prueba se comprueba que el aspecto es bastante correcto como puede observarse en las [figuras 10 y 11](#)

A la vista de los datos de temperatura del hormigón y de porcentaje de aire ocluido registrados en los ensayos realizados se decide hacer una prueba con otra dosificación, para ver la evolución de las temperaturas pues estas son también demasiado altas.

La dosificación empleada es la siguiente, ver [tabla 5](#):

TABLA 5
Nueva dosificación

| COMPONENTE | CANTIDAD POR m ³ |
|---------------------------|-----------------------------|
| CEMENTO I 52,5 R ULTRAVAL | 400 kg |
| CENIZAS VOLANTES | 165 kg |
| ARENA 0/4 SL | 1 022 kg |
| ARIDO 6/12 O | 743 kg |
| TC-1425 BASF | 13.60 l |
| AGUA | 170 l |

Se obtienen los siguientes datos, sobre una primera amasada, ver [tabla 6](#).

TABLA 6
Resultados sobre la amasada

| | ESCURRIMIENTO | | AIRE | DENSIDAD |
|----------------|---------------|----------------|------|-------------------|
| | T50 ≤ 8 seg | 550 ≤ df ≤ 850 | % | g/cm ³ |
| IL-CAC-HA-1424 | 4 | 665 | 5.8 | 2.31 |

Se confirman los valores de temperatura obtenidos en los días anteriores durante la jornada y a la vista de los resultados de temperatura y porcentaje de aire ocluido registrados durante las pruebas realizadas los días anteriores, por un lado, y los datos de resistencia a 7 días de los ensayos característicos, por otro lado, los cuales auguraban que no se conseguirían los 80 MPa a 28 días, se decide realizar más pruebas probando diferentes dosificaciones con contenidos de cementos distintos, arenas de la misma procedencia llegadas a obra en fechas distintas e incluso diferentes cantidades y tipos de aditivo, para intentar determinar la causa que produce un contenido de aire ocluido en el hormigón tan elevado, lo que penaliza la resistencia a 28 días y también para analizar las temperaturas alcanzadas tan elevadas.

Después de realizar los ensayos durante varias semanas se concluye que:

1. La temperatura alcanzada, tanto con el cemento tipo I-52,5 R y el cemento tipo I52, 5 R ULTRAVAL, supera ampliamente los 80°C, llegando a valores de 92°C con dosificaciones de 440 kg de Ultraval, 90.3°C con dosificaciones de 400 kg de Ultraval y 95.4°C con 530 kg de cemento tipo I-52,5 R.

La temperatura de fabricación en el caso de la prueba de 440 kg de Ultraval es de 33°C.

La temperatura de fabricación en el caso de la prueba de 400 kg de Ultraval es de 39.2°C.

La temperatura de fabricación en el caso de la prueba de 530 kg de I-52,5 R es de 37.2°C.

Por tanto se puede concluir que el cemento tipo Ultraval provoca un ascenso de la temperatura de aproximadamente 1,3°C/10 kg de cemento, mientras que con el cemento I-52,5 R el ascenso es de 1.1°C/10 kg de cemento.

2. La temperatura alcanzada en la prueba efectuada con cemento tipo I-52,5 N SR fue de 83.3°C siendo

la temperatura de fabricación de 38.1°C, por lo que el cemento sulforresistente provoca una subida de 0.82°C /10 kg de cemento para una dosificación de 550 kg/m³.

3. En las diferentes pruebas efectuadas tras los ensayos característicos no se ha podido determinar la causa que ha provocado el aumento del % de aire ocluido.

5. PRUEBAS CON CEMENTO I 52,5 R ULTRAVAL SR

Después de las pruebas realizadas con cemento CEM I 52,5 ULTRAVAL R en las cuales, se obtienen incrementos de temperatura del orden de 60°C sobre la temperatura inicial del hormigón, llegándose a máximas superiores a los 95°C, dentro del equipo de desarrollo del hormigón se generan dudas acerca del posible riesgo de formación de etringita diferida que puede conllevar temperaturas tan altas alcanzadas en el núcleo del elemento hormigonado. La etringita diferida son sales provenientes de los aluminatos tricálcicos que contiene el cemento y que se crean en la estructura del hormigón cuando el fraguado alcanza altas temperaturas, su formación es un proceso expansivo y puede comprometer la vida de la estructura. Estas sales aparecen a tiempo diferido de ahí su nombre.

Todo ello crea la necesidad de realizar nuevas pruebas y estudios para controlar dicho riesgo. Por otro lado, dada la bonanza en cuanto a resistencias que el cemento ULTRAVAL presenta, se realizan nuevas pruebas utilizando el cemento CEM I 52,5 R ULTRAVAL SR, ya que durante las pruebas del mes de julio realizadas con CEM I 52,5 N SR, el incremento de temperatura ha sido del orden de 47°C sobre la temperatura de fabricación del hormigón, lo que lleva a pensar que la utilización de un cemento tipo SR (sulforresistente) puede presentar ventajas tanto a la hora de prevenir temperaturas excesivamente altas en la mezcla, ya que desarrolla un menor calor de hidratación, como para prevenir la posible formación de etringita diferida debido a un muy bajo contenido de aluminatos, álcalis y SO₃.

El 1 de agosto de 2012 se lleva a cabo la ejecución de pruebas con CEM I 52,5 R ULTRAVAL SR, con dosificaciones de 440 kg/m³ y 460 kg/m³, fabricándose dados similares a los ejecutados en pruebas anteriores comprobar la evolución de la temperatura.

Se obtienen incrementos de temperatura inferiores a 40°C, llegándose a temperaturas máximas del orden de 75°C en ambos casos.

Con las resistencias obtenidas a 28 días los valores están en el entorno de 88 MPa, un 10% más de lo exigido al hormigón del arco.

Ante estos resultados se concluye que el uso de cemento SR es conveniente de cara a su utilización en la fabricación del hormigón HA80/AC/12/IIb del arco del viaducto del Almonte, ya que debido a su bajo contenido en aluminatos, sulfatos y álcalis se garantiza la no formación de etringita diferida que pueda comprometer la durabilidad del elemento y además permite garantizar temperaturas no excesivamente altas, en el entorno de 70°C.

Por otro lado, para conseguir con un cemento I 52,5 N SR estándar la resistencia característica del hormigón a emplear en

el arco (80 MPa), sería necesario aumentar la cantidad del cemento a valores que superarían los 600 kg/m³ lo que implicaría segregaciones no deseadas en el hormigón autocompactable y previsibles fenómenos de retracción plástica en el mismo.

Debido a todos estos motivos finalmente se recomienda el uso del cemento CEM I 52,5 R Ultraval SR en la confección del HA-80/12/IIb ya que garantiza las resistencias exigidas para cantidades de cemento inferiores a 500 kg/m³ y permite obtener junto a los demás elementos un hormigón con buenas características de trabajabilidad, autocompactabilidad, durabilidad y prestaciones mecánicas.

El 03 de octubre de 2012, y tras más de cuatro meses desde que se iniciaron las pruebas en obra y casi un año después del inicio del estudio de este hormigón, se procedió a realizar los ensayos característicos del hormigón HA- 80/AC/12/IIb a emplear en la ejecución del arco del viaducto sobre el río Almonte, empleando para ello los siguientes componentes en las cantidades expresadas en la [tabla 7](#):

TABLA 7
Nueva dosificación propuesta con cemento Ultraval SR

| COMPONENTE | CANTIDAD POR m ³ |
|-------------------------------|-----------------------------|
| CEMENTO I 52,5 R ULTRAVALE SR | 460 kg |
| CENIZAS VOLANTES | 105 kg |
| ARENA 0/4 SL | 992 kg |
| ARIDO 6/12 O | 723 kg |
| TC-1425 BASF | 13 l |
| AGUA | 180 l |

Los resultados obtenidos en las seis amasadas efectuadas fueron los que se observan en la [tabla 8](#):

TABLA 7
Nueva dosificación propuesta con cemento Ultraval SR

| Nº | ESCURRIMIENTO (mm) | ROTURA A 7 DÍAS (MPa) | ROTURA A 28 DÍAS (MPa) |
|----|-----------------------|--------------------------|---------------------------|
| 1 | 680 | 76.9 | 94.3 |
| 2 | 690 | 78.5 | 96.0 |
| 3 | 685 | 76.8 | 93.1 |
| 4 | 675 | 80.1 | 100.5 |
| 5 | 675 | 78.7 | 93.4 |
| 6 | 690 | 80.1 | 98.2 |

Tras los resultados obtenidos por los distintos laboratorios la dirección de obra dio por válida la dosificación propuesta.

Durante el desarrollo de la obra, el hormigón se comportó correctamente dentro de lo esperado sin aparecer ningún tipo de incidencia.

6. CONCLUSIONES

La fabricación y puesta en obra de un hormigón tan específico, como el necesario para ejecutar el arco del viaducto de Almonte, debe ser realizada tras un exhaustivo estudio de los materiales, aditivos y cementos que han de componerlo, pero además cuando las condiciones de puesta en obra son tan singulares, presentando una alta densidad de armado, fuerte inclinación de las piezas, una distancia de bombeo considerable en longitud y altura, solicitando altas resistencias a las pocas horas y muy altas a 28 días, es completamente necesario hacer pruebas a escala real y localizar en el mercado los productos de última generación que permitan conseguir las prestaciones solicitadas dentro de los más altos estándares de calidad, muchas veces trabajando con productos aún en fase de desarrollo e invirtiendo muchas horas de esfuerzo e imaginación.

7. AGRADECIMIENTOS

El autor del artículo quiere agradecer a Agustín Álvarez, Carlos Velázquez, Fernando Cimorra, y en especial a Emilio Martín por su dedicación y profesionalidad y a todos los componentes del equipo de obra quienes durante más de un año investigaron, ensayaron y vivieron pensando en cómo conseguir que el hormigón del arco del viaducto de Almonte fuese una realidad.

Referencias

- [1] Advanced Concrete Technology. Processes. Self-compacting concrete (Chap. 9), Gaimster R. and Dixon N., ELSEVIER, 2003.
- [2] Instrucción de hormigón estructural (EHE-08), Ministerio de Fomento, Secretaría General Técnica, Madrid, 2008.
- [3] Norma del Laboratorio de Transporte (NLT) 113/87 Equivalente de Arena, CEDEX, Madrid, 1987.
- [4] UNE 196-1:2018 Métodos de ensayo de cementos. Parte 1: Determinación de resistencias, AENOR, Madrid, 2018.