

## **Fabricación, puesta en obra y control de calidad del HAC: experiencias en viaductos de líneas de alta velocidad ferroviaria española**

**L. Garrido Romero, J.M. Rivera Zafra, F.J. Ibáñez Luque**  
Área de Supervisión de Obras de Inf. de AYESA Ingeniería, España.

### **RESUMEN**

A pesar del impulso que ha supuesto la Instrucción de Hormigón Estructural EHE-2008 para la utilización del HAC en España, su empleo continúa siendo normalmente una necesidad en fase constructiva y no una decisión planificada en proyecto. Es por ello que los equipos de Dirección de Obra deben saber identificar inequívocamente aquellos casos de estructuras muy densamente armadas que requieren del empleo de esta tecnología, frente al riesgo que comporta la utilización de hormigones convencionales de consistencias fluidas o líquidas.

La presente Comunicación expone la experiencia acumulada por el equipo de Supervisión de Obras de AYESA Ingeniería en la producción, puesta en obra y control de ejecución de los hormigones autocompactantes (HAC) utilizados en determinados elementos de dos viaductos de alta velocidad: el viaducto de Archidona en la L.A.V. Antequera-Granada y el viaducto sobre el río Jauto en la L.A.V. Murcia-Almería.

Característica común en ellos es la alta densidad de armado, con elementos de cuantías de acero superiores a los 600 kg/m<sup>3</sup>. El trabajo muestra la sistemática de pruebas previas de fabricación y de robustez del HAC, así como los procedimientos de control y puesta en obra elaborados *ad hoc* en cada uno de ellos para la toma de decisiones del personal encargado de la ejecución. Asimismo, se describe un caso de incompatibilidad cemento-aditivo, recomendaciones prácticas encaminadas a optimizar la puesta en obra y el empleo de un sistema termopar para el control de fisuraciones de origen térmico.

**PALABRAS CLAVE:** Puesta en obra, robustez, control de la autocompactabilidad, readitivación en obra.

### **1.- INTRODUCCIÓN**

El auge experimentado durante los últimos años por el sector de las infraestructuras del transporte en España y, en particular, el gran esfuerzo inversor de la administración pública en la red de alta velocidad ferroviaria española, han determinado a su vez una creciente demanda de hormigones de prestaciones mecánicas elevadas y el empleo de tecnologías de puesta en obra del hormigón poco desarrolladas anteriormente. El uso de HACs, tanto en prefabricación de vigas como en la construcción de puentes in situ, se ha mostrado como una tecnología eficaz e imprescindible en la ejecución de elementos

## Experiencias en viaductos de líneas de alta velocidad ferroviaria española

muy densamente armados para satisfacer los estándares de calidad y durabilidad que requieren este tipo de construcciones.

La entrada en vigor de la “Instrucción de Hormigón Estructural EHE-2008” [1] ha supuesto un indudable impulso a la tecnología del HAC. Le precedieron en una etapa prenormativa otros documentos como, por ejemplo, las “Recomendaciones para la fabricación, transporte y puesta en obra del HAC” editadas por la Consejería de Obras Públicas y Transportes de la Junta de Andalucía [2], así como la publicación de numerosas investigaciones, guías, artículos y monografías especializadas. El equipo de Supervisión de Obras de AYESA Ingeniería tuvo la oportunidad de participar en la redacción de algunas de ellas [3,4 y 5] y transmitir consideraciones prácticas aprendidas durante la ejecución de actuaciones como el puente “El Guardián del Castillo” (Alcalá de Guadaíra, Sevilla. 2005) donde se emplearon hasta 1.100 m<sup>3</sup> de HAC-35 o el “Anillo interior de refuerzo de los túneles de Abdalajís” (L.A.V. Antequera-Málaga. 2005-2007) que demandó el uso de HACs de alta resistencia (HAC-55 y HAC-80, en este último caso con microsílíce) [6].

En el momento presente cabe afirmar que la industria del hormigón preparado, la industria del prefabricado y la universidad han desarrollado la tecnología de fabricación y las investigaciones necesarias sobre los materiales constituyentes para que pueda aplicarse el HAC en obra con absolutas garantías. La administración también ha actuado proactivamente reglamentando el material para impulsar su empleo. Superadas pues estas fases iniciales de normalización, investigación y desarrollo de la tecnología del HAC, actualmente es el sector de la ingeniería, y los prescriptores en general, quienes tienen por delante el reto de promover el uso de HAC desde el proyecto y que, con ello, deje de ser meramente una opción sobrevenida a los problemas constructivos de puesta en obra y, por tanto, una solución más costosa, peor planificada que desde la fase de diseño y, normalmente, deficientemente controlada.

Tanto ingenieros prescriptores, proyectistas, como aquellos que integran los equipos de Dirección de Obra deben saber identificar inequívocamente aquellos casos de estructuras muy densamente armadas que requieren indispensablemente del empleo de HAC, frente al riesgo que comporta la utilización de hormigones convencionales de consistencia líquida. En estas circunstancias el incremento de coste material o las particularidades de ejecución que comporta el uso de HAC en relación a las presiones sobre los encofrados y sus requerimientos de estanquidad son factores de orden menor en comparación con el coste de oportunidad que conllevaría el empleo de hormigón vibrado, derivado de su mayor necesidad de medios auxiliares, reducción de rendimientos y, fundamentalmente, de los costes derivados de una ejecución deficiente (reparación de coqueras, tareas de acabado superficial y retrasos en la planificación de las obras). En el peor de los casos las deficiencias serán indetectables porque permanecerán ocultas, con el consiguiente riesgo estructural y de durabilidad.

Una vez decidido el uso de HAC éste debe especificarse correctamente, estableciéndose una fluidez y viscosidad acordes a la aplicación a que se destina y seleccionando los materiales constituyentes idóneos. Usualmente el fabricante de hormigón es reacio al empleo de filleres, subproductos industriales y adiciones. La investigación en este campo es muy profusa pero la realidad demuestra que el uso de dichos materiales es muy residual, empleándose con carácter general cementos y áridos de características

estándar y comunes a los utilizados en el hormigón convencional. La gama de superfluidificantes y de cementos existentes en el mercado cubre con garantías cualquier necesidad en prestaciones y la compatibilidad del binomio cemento-aditivo debe quedar satisfactoriamente resuelta incluso con cementos sulforresistentes o blancos. Respecto al árido, los mayores problemas suelen tener su origen en la fluctuación de la granulometría y del contenido de finos de la arena.

En relación a la puesta en obra, el éxito de la misma estará ligado a la realización de pruebas previas y a la correcta planificación de cada una de sus fases en el correspondiente procedimiento de ejecución. En esa línea, sobre la base de dos nuevas experiencias con HAC en sendos viaductos de alta velocidad ferroviaria en zona sísmica durante el período 2010-2012, el presente trabajo muestra recomendaciones prácticas actualizadas encaminadas a optimizar el diseño y la puesta en obra de este material.

## **2.- EMPLEO DE HAC EN EL VIADUCTO DE ARCHIDONA (L.A.V. ANTEQUERA-GRANADA)**

### **2.1- Descripción del Viaducto**

El viaducto se localiza en el término municipal de Archidona (Málaga) y forma parte de la Línea de Alta Velocidad entre Antequera y Granada, actualmente en ejecución por el Administrador de Infraestructuras Ferroviarias, ADIF. Se encuentra terminado y su plataforma finalizada, a cota de subbalasto. Se trata de un viaducto mixto de 3.150 m de longitud, con tablero de disposición bífida de canto constante, materializado mediante doble viga metálica de 2,95 m de canto. Presenta la siguiente distribución de vanos (35m+30 vanos\*50m+2 vanos\*65m+29 vanos\*50m+35 m), estando situado su punto fijo entre los vanos de 65 m, haciendo que sea el viaducto mixto ferroviario con mayor longitud de dilatación libre en el mundo. Por condicionantes de índole administrativa se ha ejecutado en dos subtramos y por contratistas diferentes. Así, 575 m corresponden al subtramo Archidona-Arroyo de la Negra y 2.575 m al subtramo adyacente Peña de los Enamorados-Archidona, cuyo inicio fue posterior.

Respecto a las pilas existen dos tipologías claramente diferenciadas (Figura 1). Por un lado, la pila tipo está formada por dos fustes macizos de hormigón armado de sección rectangular, unidos en cabeza por un dintel horizontal también rectangular, continuando con la inclinación de las almas del cajón metálico. Estas pilas presentan alturas variables hasta un máximo de 24 m. Dada la vinculación existente con el tablero, materializada mediante apoyos POT y topes sísmicos, las pilas se consideran libres en sentido longitudinal y vinculadas al tablero en el sentido transversal. Por otra parte, la pila central en delta sirve como punto fijo de la estructura y se resuelve por medio de cuatro fustes de sección maciza cuadrada de 2,00 m de lado, formando un triángulo de 20 m de altura, y semiángulo en cabeza de 28°.

### **2.2.- Uso del HAC en el Viaducto de Archidona**

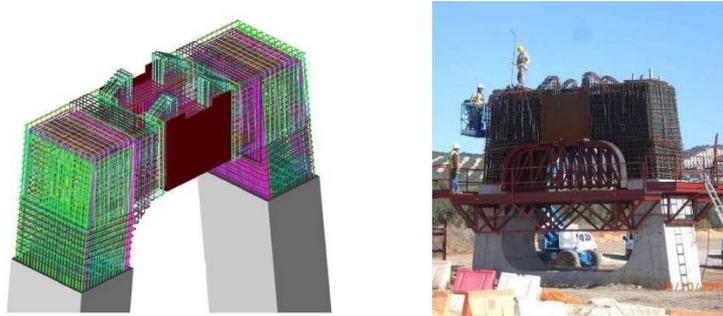
El uso de HAC vino motivado por la experiencia con hormigones vibrados convencionales durante la construcción del primer subtramo (Archidona-Arroyo de la Negra). Prácticamente en la totalidad de los dinteles (con cuantías de armado de 600

## Experiencias en viaductos de líneas de alta velocidad ferroviaria española

kg/m<sup>3</sup>) se produjeron coqueras y desperfectos de acabado (Figuras 2 y 3). También se apreciaron en parte de los alzados (con cuantías de 400 kg/m<sup>3</sup>) en los que la inclinación de los fustes dificultaba seriamente el vibrado de cada trepa. Para resolver estos problemas se había actuado sobre el HA-35 de proyecto reduciendo el tamaño máximo del árido y aumentando la consistencia del hormigón, pero siempre dentro del ámbito de los hormigones convencionales. Los resultados, a posteriori, demostraron que estas medidas fueron insuficientes.



**Figura 1. Tipología de pilas en el Viaducto de Archidona. Izqda. Pila tipo. Dcha. Pila central en delta (punto fijo)**



**Figura 2. Diseño en 3D del armado del dintel y vista real durante el montaje**



**Figura 3. Coqueras y desperfectos de acabados en dinteles hormigonados con hormigón convencional**

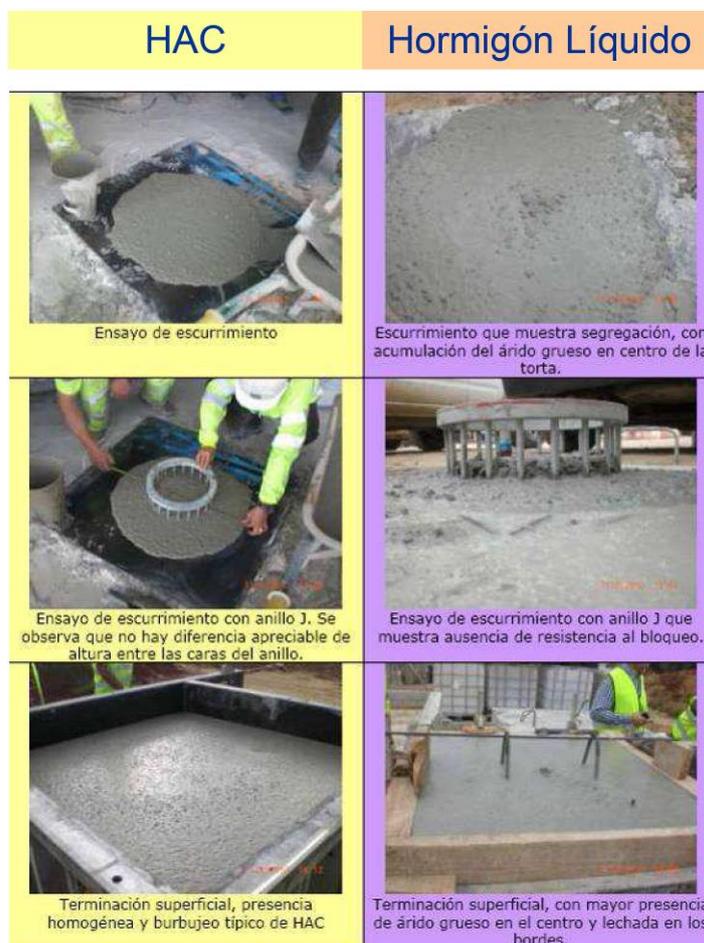
Por esta razón, una vez que emprendió la construcción el subtramo Peña de los Enamorados–Archidona, se decidió que para evitar los problemas anteriormente descritos se hormigonasen los elementos de mayor cuantía de armado con un HAC-35. De este modo, se utilizó en 51 dinteles de pilas y en la pila central, donde si bien la cuantía de armado era menor, se requería una resistencia característica superior (HA-40) que en el resto de las pilas, resistencia que quedaba asegurada con la dosificación del HAC usada en los dinteles.

### **2.3.- Diferencias de comportamiento entre un hormigón convencional de consistencia fluida/líquida y un HAC**

Inicialmente las dudas en la necesidad de adaptación de los encofrados para resistir el empuje del HAC en estado fresco y el desconocimiento sobre la velocidad de adquisición de resistencias a edades tempranas motivaron al Contratista a proponer una dosificación de hormigón de consistencia fluida/líquida (fluida si se considera respecto a EHE-98 [7] o líquida en caso de considerar EHE-2008 [1], pero en todo caso fuera del rango de ambas), buscando una consistencia en cono de Abrams de  $23 \pm 2$  cm. Se planificaron ensayos para conocer el comportamiento y puesta en obra de esa dosificación con los medios presentes en obra y se prepararon moldes simulando la concentración de armado que se iba a encontrar el hormigón en los paramentos de la pila. Se procedió entonces a su recepción en obra como hormigón convencional, con resultados no aptos, puesto que el asiento en cono Abrams superó las tolerancias establecidas. A título ilustrativo, a petición de AYESA Ingeniería, se ensayó como si se tratara de un HAC, realizando el ensayo de escurrimiento y escurrimiento con anillo. La Figura 4 deja patente la exudación de lechada y segregación del árido grueso, así como bloqueo en el ensayo con anillo. Este resultado confirmó que la fluidez era excesiva y que la mezcla no contaba con la viscosidad suficiente para que la pasta pudiera movilizar el árido grueso. Seguidamente, durante el relleno del molde, se pudo observar in situ, cómo se formaban puentes de grava entre las barras que impedían el paso del hormigón a través de ellas. Todos los resultados anteriores fueron argumentos más que suficientes para desestimar por parte de la Dirección de Obra el uso del hormigón fluido, e instándose pues al uso de HAC.

### **2.4.- Dosificación empleada**

En base a experiencias anteriores, en el diseño del HAC (tabla 1) se consideró que la fluidez debía estar en la frontera de las clases AC-E2 y AC-E3 definidas en el anejo 17 de EHE-2008 [1]. Concretamente se especificó un rango de  $720 \pm 50$ mm para el ensayo de escurrimiento, manteniendo dichas características tras el bombeo hasta una altura máxima de 24 m. El ensayo del embudo V a 5 minutos fue asimismo un elemento clave en la identificación de problemas de segregación en las pruebas previas.



**Figura 4. Comparativo del HAC con el hormigón líquido ensayado**

**Tabla 1. Dosificación inicial de HAC para los dinteles del Viaducto de Archidona**

<i>Áridos</i>	Árido 8/14	725 kg
	Árido 0/2	1.050 kg
<i>Cemento</i>	CEM II A-V 42,5 R	400 kg
<i>Agua</i>		160 litros
<i>Aditivos</i>	Sika Viscocrete – 5980	6,25 litros
	Sikament 175	3,0 litros
<i>Relación Agua-Cemento</i>		0,40
<i>Tiempo mínimo de amasado en planta</i>		120 segundos

### 2.5.- Medios de fabricación

Se dispuso de una planta de hormigón en la obra, propiedad de una de las empresas contratistas que conformaban la UTE constructora. Los áridos en su mayoría provenían del material calizo de la excavación del Túnel de Archidona, complementado con

arenas procedentes de cantera. La planta de hormigón (marca LEBLAN modelo CHAD-120-5<sup>a</sup>) tenía una producción nominal de 120 m<sup>3</sup>/h. La mezcladora (DKXS-3M3 BHS SENTHOFEN) era de doble eje horizontal, accionada por 2 motores de 50 kW/ud y 2 reductores de tornillo sinfín, pudiendo cargar en cada ciclo 3 m<sup>3</sup>, con un peso máximo por ciclo de 7.200 Kg. Contaba con sensor automático de la humedad de los áridos para la corrección del agua de amasado.

La disposición de esta planta en exclusiva para el suministro de hormigón para la obra, fue fundamental en el éxito obtenido. Gracias a ello se pudieron realizar todos los días ensayos en planta previos al suministro y contrastarlos con los resultados de la recepción en obra. De esta forma se calibró el tiempo abierto de la mezcla y la evolución de sus propiedades de autocompactabilidad.

## **2.6.- Control de la autocompactabilidad y de la resistencia a compresión**

Debido a la escasa experiencia específica con HAC del personal operario y técnico responsable de la ejecución, se diseñó un parte de control de la autocompactabilidad, distinguiendo en él el control a efectuar en planta y el control a realizar a pie de tajo. Se partió del principio básico de controlar todas y cada una de las amasadas. El ritmo de hormigonado era de 1 ó 2 dinteles al día, dependiendo de la programación de otros elementos estructurales, y en la primera amasada de cada dintel se realizaban ensayos en planta y en obra, llevando a cabo para el resto de amasadas sólo los ensayos en el tajo. El parte de recepción (Figura 5) abarcaba toda la posible casuística, de modo tal que los encargados de los tajos a la vista de los resultados pudiesen tomar decisiones rápidas y adecuadas sin retrasar el ritmo de ejecución u originar juntas frías en los elementos. La posibilidad de readitivar en obra estaba particularmente estudiada.

Respecto a las resistencias obtenidas, debido a la elevada cantidad de cemento y la contenida relación a/c, no se obtuvieron resistencias por debajo de los 40 N/mm<sup>2</sup>, siendo el valor medio de 49,64 N/mm<sup>2</sup> a 28 días.

## **2.7.- Control de la puesta en obra**

Se adoptó como norma de buena práctica el no comenzar el hormigonado hasta que no estuviesen presentes en el tajo al menos dos autohormigoneras esperando. En consecuencia, la primera amasada se podía ensayar a la salida de la bomba pero, a efectos de evitar interrupciones en la producción, el resto de amasadas se ensayaban antes del bombeo. La ejecución de los ensayos al ir cambiado de pila a pila planteaba el problema logístico de disponer en cada caso de una superficie plana y horizontal para no distorsionar los resultados. Esta apreciación, de no haberse tenido en cuenta, pudiera haber retrasado el ritmo del hormigonado entorpeciendo la producción. Cuando en el vertido entre camiones sucesivos se superaban los 30 min. se aplicaba una ligera vibración con pervibrador de 20 mm.

Las juntas de los encofrados metálicos no plantearon problema por pérdidas de lechada y en los primeros hormigonados sólo hubo que sellar con silicona alguna junta, siendo este sellado suficiente para detener el flujo. Como precaución ante eventuales exudaciones se dispusieron unos tubos de purga en la parte superior para eliminar la lechada de la capa superficial. No obstante, estos tubos demostraron ser ineficaces y en

## Experiencias en viaductos de líneas de alta velocidad ferroviaria española

algún caso se tomó la decisión de dejar rebosar una pequeña cantidad de hormigón por el encofrado, procediendo inmediatamente a su limpieza.



**Control de recepción en obra del HA-35/AC/12/IIb**

Fecha: \_\_\_\_\_ DINTEL N°: \_\_\_\_\_ Lote n°: \_\_\_\_\_

**Control en planta (primer camión)**

**Parámetros de aceptación:**  
 SF = 720 +/- 50mm y sin indicios de segregación/exudación, o en su defecto:  
 \* Si SF ≥ 770 mm o se aprecia segregación/exudación reamasar 15 minutos en camión a régimen lento y rechazar si no cumple  
 \* Si 50 < SF < 670 mm reamasar 5 minutos en camión a máxima velocidad y repetir SF, T50, V y J. Si no cumple, reactivar y reamasar a máxima velocidad durante 1 min/m3 de capacidad de la cuba y repetir SF, T50, V y J.  
 Recomendaciones de reactivación (l/m3 de Viscocrete 5983): Si SF ≥ 600 mm 0,5-1,0 l/m3; Si 500 mm < SF < 600 mm 1,0-2,0 l/m3  
 \* Si SF ≤ 500 mm rechazo automático

T50 ≤ 5 s o en su defecto:  
 \* T50 > 5s reamasar 5 minutos en camión a máxima velocidad y repetir SF, T50, V y J. Si no cumple, reactivar y reamasar a máxima velocidad durante 1 min/m3 de capacidad de la cuba y repetir SF, T50, V y J.  
 Recomendaciones de reactivación (l/m3 de Viscocrete 5983): Si SF ≥ 600 mm 0,5-1,0 l/m3; Si 500 mm < SF < 600 mm 1,0-2,0 l/m3

V < 15 s  
 SF-J < 50 mm

Matrícula camión 1:						Hora inicio ensayos:					
d1 (mm)	d2 (mm)	SF ((d1+d2)/2) (mm)	Segreg./exud.	T50 (s)	V (s)	d1 (mm)	d2 (mm)	J ((d1+d2)/2) (mm)	SF-J (mm)		
Reamasado:						Tiempo de reamasado:					
d1 (mm)	d2 (mm)	SF ((d1+d2)/2) (mm)	Segreg./exud.	T50 (s)	V (s)	d1 (mm)	d2 (mm)	J ((d1+d2)/2) (mm)	SF-J (mm)		
Readitivación y reamasado:						Dosisificación Viscocrete 5983 (lts.):					
d1 (mm)	d2 (mm)	SF ((d1+d2)/2) (mm)	Segreg./exud.	T50 (s)	V (s)	d1 (mm)	d2 (mm)	J ((d1+d2)/2) (mm)	SF-J (mm)		
Observaciones:						Hora fin ensayos:					
						Hora puesta en obra:					

**Control en tajo de hormigonado**

**Parámetros de aceptación:** (toma de muestras durante descarga del camión anterior y desechando 1/2 carretilla)  
 SF = 720 +/- 50mm y sin indicios de segregación/exudación, o en su defecto:  
 \* Si SF ≥ 770 mm o se aprecia segregación/exudación reamasar 15 minutos en camión a régimen lento y rechazar si no cumple  
 \* Si 500 < SF < 670 mm reamasar 5 minutos en camión a máxima velocidad y repetir SF, T50, V y J. Si no cumple, reactivar y reamasar a máxima velocidad durante 1 min/m3 de capacidad de la cuba y repetir SF, T50, V y J. **ADVERTIR A PLANTA.**  
 Recomendaciones de reactivación (l/m3 de Viscocrete 5983): Si SF ≥ 600 mm 0,5-1,0 l/m3; Si 500 mm < SF < 600 mm 1,0-2,0 l/m3  
 \* Si SF ≤ 640 mm **SISTEMÁTICAMENTE RECHAZAR**  
 \* Si SF ≤ 500 mm rechazo automático

T50 ≤ 5 s o en su defecto:  
 \* T50 > 5s reamasar 5 minutos en camión a máxima velocidad y repetir SF, T50, V y J. Si no cumple, reactivar y reamasar a máxima velocidad durante 1 min/m3 de capacidad de la cuba y repetir SF, T50, V y J. **ADVERTIR A PLANTA.**  
 Recomendaciones de reactivación (l/m3 de Viscocrete 5983): Si SF ≥ 600 mm 0,5-1,0 l/m3; Si 500 mm < SF < 600 mm 1,0-2,0 l/m3

V < 15 s SOLAMENTE CUANDO T50 > 5s  
 SF-J < 50 mm

**Cuando el vertido entre camiones sucesivos supere los 30 min. se debe aplicar una ligera vibración con pervibrador de 20 mm**

Matrícula camión "n":						Hora salida de planta:						Hora inicio ensayos:					
d1 (mm)	d2 (mm)	SF ((d1+d2)/2) (mm)	Segreg./exud.	T50 (s)	V (s)	d1 (mm)	d2 (mm)	J ((d1+d2)/2) (mm)	SF-J (mm)								
Reamasado:						Tiempo de reamasado:											
d1 (mm)	d2 (mm)	SF ((d1+d2)/2) (mm)	Segreg./exud.	T50 (s)	V (s)	d1 (mm)	d2 (mm)	J ((d1+d2)/2) (mm)	SF-J (mm)								
Readitivación y reamasado: (*)						Dosisificación Viscocrete 5983 (lts.):											
d1 (mm)	d2 (mm)	SF ((d1+d2)/2) (mm)	Segreg./exud.	T50 (s)	V (s)	d1 (mm)	d2 (mm)	J ((d1+d2)/2) (mm)	SF-J (mm)								
Observaciones:						Hora fin ensayos:											
						Hora puesta en obra:											

(\*) Advertir a planta

Figura 5. Parte de control de la autocompactabilidad en planta y a pie de tajo

### 2.8.- Estado final y problemática resuelta

De los 51 dinteles hormigonados y de los fustes de la pila central, sólo se abrió una No-Conformidad, por un problema de falta de recubrimiento. Sin embargo, cabe destacar que en el primer dintel hormigonado y durante el desencofrado que se realizó el día 3 de noviembre de 2010, se detectó la formación de fisuras en las esquinas del dintel y en las aristas superiores del mismo. Por lo demás el estado general de los paramentos era muy bueno (Figura 6). Una vez analizadas las fisuras se concluyó que su origen

radicaba en la conjunción de un fenómeno de fisuración por retracción plástica y de fisuración por contracción térmica inicial. La fisuración por retracción en las esquinas sin armadura y con un hormigón de alta cantidad de pasta justificaba la orientación paralela de las fisuras, su inclinación, proximidad y amplitud (Figura 7). Hay que tener en cuenta también que las esquinas quedaban fuera de la zona de purga de lechada exudada y, fundamentalmente, que la manguera de bombeo no se había llevado hasta las mismas esquinas, de tal modo que tenían más pasta y menos árido grueso.



**Figura 6. Detalle de acabado del hormigonado en los dinteles**



**Figura 7. Detalle de las fisuras aparecidas tras el primer desencofrado**

Sin duda el fenómeno principal era de origen térmico, siendo las esquinas y las aristas superiores puntos especialmente vulnerables. Al tratarse de un elemento de gran espesor el gradiente térmico entre el interior de la masa y el exterior podía haber sido importante. Las esquinas, sin armadura, eran el punto débil, en ellas el grado de madurez del hormigón era inferior, e incluso pudiera ya hallarse iniciada cierta fisuración por retracción plástica. Si bien este tipo de fisuras de origen térmico suelen aparecer a partir de las primeras 24 h, la prematura retirada del encofrado aceleró su aparición. Posteriormente, se comprobó en obra que las fisuras no profundizaban más de 3 cm por el interior del hormigón siendo, por tanto, superficiales y no afectando a la durabilidad de la estructura, debido al mayor recubrimiento de hormigón existente en las esquinas y en la superficie superior del dintel.

Aun careciendo esta fisuración de trascendencia estructural, se modificó el procedimiento de puesta en obra con las siguientes medidas que ayudaron a que el problema no volviera a reproducirse en el resto de dinteles:

- Se disminuyó la fluidez reduciendo la dosificación de aditivo polifuncional para minimizar los problemas de retracción. Esta medida aceleró asimismo el proceso de endurecimiento.

## Experiencias en viaductos de líneas de alta velocidad ferroviaria española

- Durante la descarga del hormigón se debía asegurar la entrada de árido grueso en las esquinas acercando la manguera a éstas.
- En las esquinas y donde los recubrimientos fueran muy amplios se dispuso de una leve armadura de cosido para evitar la aparición de fisuras.
- Mediante la disposición de un sistema termopar con sondas de temperatura en el interior del dintel y en una esquina, se monitorizó la evolución de los gradientes internos de temperatura del elemento y se limitó el gradiente máximo a 20°C. Para ello, cuando fue preciso se calefactaron mediante focos las aristas del encofrado. Otra sonda reprodujo la temperatura de la esquina del dintel en el recipiente con agua donde se ubicaban las probetas a fin de igualar su grado de madurez y con ello poder analizar el momento en que se alcanzaba la resistencia mínima a tracción indirecta especificada para la retirada de las mesas de encofrado del dintel.

### 3.- EMPLEO DE HAC EN EL VIADUCTO SOBRE EL RÍO JAUTO (L.A.V. MURCIA-ALMERÍA)

El Viaducto Río Jauto forma parte del tramo Los Gallardos–Sorbas del Corredor Mediterráneo de Alta Velocidad, en la provincia de Almería. Su singularidad estriba en su tipología, arco bicelular de hormigón armado de 90 m de luz y flecha de 16 m, con sección variable desde 2 m en arranques hasta 1,50 m en clave. Sobre dicho arco apoyan seis pares de pilas y sobre éstas el tablero, mediante vigas artesa prefabricadas de 15 m de longitud y 90 cm de canto. El punto fijo del tablero se materializa en la clave del arco. Dicho punto fijo está formado por dos partes diferenciadas. Por un lado, dos tetones que reciben las fuerzas transmitidas por las vigas y las transmiten a la clave del arco y, por otro, el diafragma que sirve de unión entre los pares de vigas y que materializan el punto fijo mencionado.

Como consecuencia de los esfuerzos previstos en esta parte de la estructura, tanto los tetones como el diafragma tienen una cuantía de armadura que ha condicionado el uso de HAC (HA-50/AC/12/IIb) para su ejecución (Figura 8).



**Figura 8. Estado de los tetones previo a su hormigonado**

#### 3.1.- Estudio de dosificación: un ejemplo de incompatibilidad cemento-aditivo

Con carácter previo al hormigonado de los elementos descritos en el apartado anterior, se realizaron distintas pruebas sobre dosificaciones propuestas por el Contratista de las obras. Éstas tenían como objetivo la caracterización y validación del HAC a utilizar con

el fin de minimizar los problemas durante la ejecución, más aún cuando estos elementos son inaccesibles una vez ejecutado por completo el tablero.

La primera dosificación propuesta fue la mostrada en la Tabla 2. Los ensayos de escurrimiento con y sin anillo japonés evidenciaban exudación segregación y bloqueo, mientras que en ensayo de embudo en V mostraba la incapacidad del hormigón de mantener el árido en suspensión dentro de la pasta.

**Tabla 2. Primera dosificación propuesta de HA-50/AC/12/IIb  
(valores por m<sup>3</sup> de hormigón)**

<b>Áridos:</b>	<b>Cemento:</b> I 52,5 R/SR
0/4: 910 kg (16% finos)	Dosificación de Cemento: 480 kg
6/12: 770 kg	Relación agua/cemento: 0,38
<b>Aditivos:</b>	
Plastificante Pozzolith 607N (BASF): 0,3% sobre peso de cemento	
Superfluidificante Glenium C303 SCC (BASF): 2% sobre peso de cemento	

En primera instancia, se llegó a la conclusión de que la cantidad de aditivo era demasiado elevada y estaba haciendo perder estabilidad a la mezcla, tanto más a mayor tiempo desde la fabricación, cuestión ésta que se ensayó específicamente. Además, la pasta no era lo suficientemente viscosa para mantener la estabilidad de los componentes del hormigón fresco. Se propusieron entonces cuatro dosificaciones más en las que se aumentó el contenido de arena del hormigón hasta los 940 kg/m<sup>3</sup> (disminuyendo la grava hasta los 730 kg/m<sup>3</sup>) y se hizo variar el porcentaje de aditivo superfluidificante desde el 1,70% al 1,95%. En el conjunto de los ensayos realizados, aun habiendo obtenido algún resultado satisfactorio, se evidenció la falta de robustez de la mezcla ya que, ante la más mínima variación del porcentaje de aditivo (en torno a 5 centésimas), las características reológicas del hormigón eran muy diferentes, apareciendo segregación, exudación y bloqueo, lo que se veía agravado por las altas temperaturas de la época estival. De esta forma, se puso de manifiesto un cierto grado de incompatibilidad química entre el aditivo superfluidificante y el cemento, lo que se veía acentuado por las características sulforresistentes de éste último. Se recomendó entonces la necesidad de cambiar el aditivo superfluidificante por otro de similares prestaciones o, en su defecto, incorporar un aditivo modulador de la viscosidad con el fin de controlar la exudación y segregación. Siguiendo las instrucciones dadas, se sustituyó el aditivo superfluidificante por otro de la misma marca comercial, disminuyendo también la dosificación hasta el 1,6% y, además, se aumentó en una centésima la relación agua/cemento, hasta 0,39. Se realizaron siete amasadas de prueba sobre esta sexta dosificación, arrojando todas ellas resultados satisfactorios en los ensayos realizados. Los valores promedio obtenidos eran aceptables, la robustez estaba lograda y el tiempo abierto del hormigón llegaba hasta su tiempo límite de uso.

Posteriormente, por causas ajenas al Contratista de la obra, hubo que cambiar de suministrador de hormigón. Afortunadamente, debido a que el nuevo fabricante utilizaba exactamente el mismo cemento comercial y el mismo superfluidificante, la experiencia acumulada en las pruebas anteriores pudo aprovecharse. La primera dosificación propuesta por este nuevo suministrador –séptima-, si bien arrojaba valores aceptables en los ensayos y no aparecían signos de inestabilidad en la mezcla, tenía relación arena/grava de 3,79 a todas luces excesiva y se recomendó disminuir la

## Experiencias en viaductos de líneas de alta velocidad ferroviaria española

cantidad de arena y centrar esa relación en la línea habitual de este tipo de hormigones, es decir, en un rango 1,1-1,3. Así, la última dosificación –octava- tenía la composición mostrada en la Tabla 3 y los valores, obtenidos en distintos ensayos realizados (Tabla 4), eran aceptables para su uso, con ausencia de exudación, segregación y bloqueo.

**Tabla 3. Octava y última dosificación propuesta de HA-50/AC/12/IIb (valores por m<sup>3</sup> de hormigón)**

<b>Áridos:</b> 0/4: 948 kg 6/12: 800 kg	<b>Cemento:</b> I 52,5 R/SR Dosificación de Cemento: 460 kg Relación agua/cemento: 0,40
<b>Aditivos:</b> Plastificante Pozzolith 390GV (BASF): 0,4% sobre peso de cemento Superfluidificante Glenium ACE 324 (BASF): 1,2% sobre peso de cemento	

**Tabla 4. Resultados medios obtenidos en ensayos sobre octava dosificación**

<i>Ensayo</i>	<i>Parámetro</i>	<i>Valor obtenido</i>
Escurrecimiento (SF)	Diámetro (mm)	710
	T <sub>50</sub> (s)	1,4
Escurrecimiento con anillo japonés (SF <sub>J</sub> )	Diámetro (mm)	660
	T <sub>50J</sub> (s)	2,0
Embudo en V (V)	T <sub>V5MIN</sub> (s)	5,2

En cuanto a la resistencia obtenida, en ninguna ocasión hubo problema para alcanzar la especificada según Proyecto (50 N/mm<sup>2</sup>). De este modo, esta octava dosificación fue la propuesta a la Dirección de Obra y finalmente utilizada para los hormigonados.

### 3.2.- Medios de fabricación y puesta en obra de HAC

Para la fabricación de HAC utilizado en los tetones se empleó mezcladora fija en planta ajena a la obra. Los áridos usados en la mezcla eran de naturaleza caliza. El tiempo de transporte desde la planta a la obra estaba en torno a 25 min. y el acceso a ésta era muy bueno, así como la situación de la bomba necesaria para elevar el hormigón hasta unos 50 m sobre la vaguada que salva el Viaducto Río Jauto.



**Figura 9. Acabado de diafragma de punto fijo**

El control de la autocompactabilidad se llevó a cabo tanto en la propia planta (Tabla 5), tras el amasado, como a pie de tajo mediante la ficha de recepción preparada al efecto – similar a la descrita en 2.6-, en la que se incluían los parámetros de aceptación y

rechazo en los ensayos a realizar, así como recomendaciones en caso de no obtener los valores necesarios. En días posteriores se hormigonaron también los diafragmas de punto fijo, siguiéndose el mismo protocolo en cuanto a la recepción del HAC y obteniéndose resultados satisfactorios en el acabado, como se puede apreciar en la Figura 9.

**Tabla 5. Resultados de ensayos previos a la puesta en obra del HAC en los tetones del Viaducto Río Jauto**

<i>Ensayos en planta</i>	<i>Parámetro</i>	<i>Valor</i>
Escurrimiento (SF)	Diámetro (mm)	710
	T <sub>50</sub> (s)	1,4
	Exudación/Segregación	No
Escurrimiento con anillo japonés (SF <sub>J</sub> )	Diámetro (mm)	655
	T <sub>50J</sub> (s)	2,5
	Exudación/Segregación/Bloqueo	No
<i>Ensayos en obra</i>	<i>Parámetro</i>	<i>Valor</i>
Escurrimiento (SF)	Diámetro (mm)	670
	T <sub>50</sub> (s)	1,5
	Exudación/Segregación	No
Escurrimiento con anillo japonés (SF <sub>J</sub> )	Diámetro (mm)	675
	T <sub>50J</sub> (s)	2,0
	Exudación/Segregación/Bloqueo	No

#### 4.- CONCLUSIONES

1.- Se ha constatado que a partir del umbral de cuantía de armado de 400 kg/m<sup>3</sup> el hormigón convencional fluido/líquido es claramente ineficaz y el número de no-conformidades por aparición de coqueas y desperfectos de acabado se incrementa sustancialmente. Es importante que tanto ingenieros proyectistas como supervisores de obra adquieran noción de ello y prescriban la utilización de HAC en dichos casos.

2.- La fabricación del HAC con medios industriales y en las condiciones climatológicas que se vayan a presentar en obra, suele precisar de retocar en mayor o menor grado el diseño de la dosificación obtenida previamente en laboratorio. La Dirección Facultativa y/o su Asistencia Técnica deben promover, diseñar y supervisar las pruebas previas y ensayos característicos en planta para que el producto que se obtenga sea robusto, tenga un tiempo abierto suficiente y sea bombeable, si es el caso.

3.- Son frecuentes los casos de falta de robustez en las mezclas de HAC. En algunas ocasiones el problema se debe a la incompatibilidad cemento-aditivo, especialmente cuanto la relación agua/cemento es reducida o a causa del contenido y reactividad del C<sub>3</sub>A del cemento. Se manifiesta mediante alteraciones de la fluidez, segregaciones, retrasos del fraguado o un excesivo burbujeo. Por otra parte, el ensayo del embudo en V a 5 minutos, si bien no está considerado en las recomendaciones del Anejo 17 de EHE [1], constituye un test exigente y adecuado durante esta etapa preliminar de pruebas para verificar la estabilidad de la mezcla.

## Experiencias en viaductos de líneas de alta velocidad ferroviaria española

4.- De cara a la ejecución, el procedimiento ha de ser sencillo y ofrecer instrucciones precisas al personal encargado de la puesta en obra, que rara vez contará con experiencia y conocimientos específicos de este tipo de hormigón. La posibilidad de readaptar en obra debe estar particularmente estudiada, principalmente en zonas de clima cálido. La realización de los ensayos de autocompactabilidad ha de ser cuidadosa, efectuándose siempre sobre superficie plana, con los dispositivos de ensayo limpios y sin agua libre, para no desvirtuar los resultados. Siendo éstas cuestiones obvias, los errores de ejecución son muy habituales.

Bajo este esquema organizativo y de recomendaciones generales, puede decirse que las experiencias del uso de HAC en elementos de densidades de armado superiores a los  $600 \text{ kg/m}^3$  en los viaductos de Archidona y del río Jauto han resultado plenamente satisfactorias.

### REFERENCIAS

[1] COMISIÓN PERMANENTE DEL HORMIGÓN. - Instrucción de Hormigón Estructural (EHE-2008), Real Decreto 1247/2008, de 18 de julio. ISBN. 978-84-498-0825-8.

[2] CONSEJERÍA DE OBRAS PÚBLICAS Y TRANSPORTES DE LA JUNTA DE ANDALUCÍA - Recomendaciones para la fabricación, transporte y puesta en obra del HAC. Sevilla, 2006.

[3] FERNÁNDEZ, J. y BURÓN, M. - Guía práctica para la utilización del HAC. IECA, 2005. ISBN 84-89702-21-7.

[4] BURÓN, M., FERNÁNDEZ, J. y GARRIDO, L. - HAC: criterios para su utilización. CEMENTO-HORMIGÓN. N°887. Madrid, abril 2006. pp. 52-64. ISSN: 0008-8919.

[5] ACHE (Asociación Científico-Técnica del Hormigón Estructural). – Monografía M-13. HAC: Diseño y Aplicación. 2008. ISBN 978-84-89670-61-7.

[6] HURTADO, J.A. – Desarrollo y caracterización de HACs de alta resistencia. Proceedings del 1<sup>er</sup> Congreso Español sobre HAC (HAC-2008). Ed. B.Barragán, A. Pacios, P. Serna: Valencia, 2008. 773 p. ISBN978-84-612-2373-2.

[7] COMISIÓN PERMANENTE DEL HORMIGÓN. - Instrucción de Hormigón Estructural (EHE-1998), Real Decreto 2662/1998, de 11 de diciembre. ISBN. 84-498-0396-9.