

# HAC2018 | V Congreso Iberoamericano de Hormigón Autocompactante y Hormigones Especiales

Valencia, 5 y 6 de Marzo de 2018

## Dosificación robusta de autocompactantes con compuestos premezclados

J. Raúl Crespo <sup>(1)</sup> y J. Antonio Hurtado <sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup> Laboratorio de I+D, HeidelbergCement Hispania, España.

<sup>(2)</sup> Departamento de Innovación, Asistencia Técnica y Prescripción, HeidelbergCement Hispania, España.

DOI: <http://dx.doi.org/10.4995/HAC2018.2018.5462>

### RESUMEN

La dosificación correcta de los componentes, atendiendo a las características locales de las materias primas (áridos y cemento), es el punto clave para la fabricación de hormigones autocompactantes en las plantas de hormigón preparado y prefabricado.

HeidelbergCement Hispania ha diseñado un compuestos, formados por el conglomerante, los áridos finos, adiciones y aditivos en polvo, que permiten la obtención de un amplio abanico de prestaciones en los hormigones fabricados con ellos, utilizando como única variable de diseño la cantidad y el tamaño de grava local.

En este artículo se exponen los requerimientos especificados para uno de estos compuestos y los resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio para su uso como mortero de altas prestaciones MAP.

También se muestran la dosificación y resultados de un hormigón autocompactante (HAC) fabricado con dicho compuesto como base.

Los resultados de ambas pruebas han sido satisfactorios, cumpliéndose los requerimientos fijados para el compuesto como MAP y los límites especificados en la EHE-08 para un HAC.

Por último, se indican las futuras líneas de trabajo que se generan a partir de los resultados obtenidos.

**PALABRAS CLAVE:** autocompactante, robustez, premezclado, tracción.

### 1.- INTRODUCCIÓN

La dosificación correcta de los componentes, atendiendo a las características locales de las materias primas (áridos y cemento), es el punto clave para la fabricación de hormigones

## **Dosificación robusta de autocompactantes con compuestos premezclados**

*HAC2018 | V Congreso Iberoamericano de Hormigón Autocompactante y Hormigones Especiales*

autocompactantes en las plantas de hormigón preparado y plantas de prefabricados de hormigón.

Esta dosificación exige un estudio singular de cada fórmula y un exhaustivo control en su fabricación.

Esta dificultad es la causa principal de algunos resultados insatisfactorios en la fabricación de hormigones autocompactantes, especialmente en aquellos de los que se esperaban unas cualidades estéticas, hápticas y visuales, excepcionales, y probablemente el principal obstáculo para su eclosión definitiva.

Para superar esta barrera, HeidelbergCement Hispania ha diseñado una gama de compuestos, formados por el conglomerante, los áridos finos, adiciones y aditivos en polvo, que permiten la obtención de un amplio abanico de prestaciones en los hormigones fabricados con ellos, utilizando como única variable de diseño la cantidad y el tamaño de grava local.

La fabricación de los compuestos en una planta preparada para la mezcla de componentes finos en polvo, asegura la robustez de su fabricación y de esta manera garantiza las prestaciones físicas y las condiciones de autocompactabilidad en las circunstancias más adversas.

Estos compuestos también pueden usarse, sin el añadido de la grava, como MAP, alcanzando unas resistencias a edades tempranas muy elevadas y un acabado superficial sedoso.

El estudio de los MAP abre un camino inexplorado en el diseño de elementos estructurales innovadores. En HeidelbergCement Hispania nos resulta especialmente interesante estudiar la posibilidad de reducir la cuantía de acero de determinados elementos estructurales, para mejorar la durabilidad y sostenibilidad de dichos elementos.

La gama de compuestos, diseñada por HeidelbergCement Hispania, pretende trasladar este concepto, inicialmente desarrollado para los hormigones autocompactantes fabricados en amasadora fija, a distintos tipos de aplicaciones que necesiten de dosificaciones robustas.

En este trabajo se repasan los requerimientos de diseño y las prestaciones obtenidas en laboratorio.

## **2.- OBJETIVOS Y REQUERIMIENTOS**

### **2.1.- Objetivo**

Inicialmente el proyecto comienza con la idea de desarrollar un MAP de prestaciones mecánicas y estéticas medias. HeidelbergCement Hispania ya disponía de MAPs de altas resistencias y otros morteros de prestaciones estéticas, tanto visuales como hápticas muy elevadas.

Ambos tipos de morteros tienen un coste material alto y están pensados para usos específicos. Sin embargo, se detectaron posibles usos donde, si bien las ventajas de un hormigón/mortero de altas prestaciones siguen siendo muy interesantes, los requerimientos no son tan altos.

El primer uso que se identificó fue el de fabricar paneles de fachadas, tipo celosía, donde se requiere un hormigón que proporcione un acabado superficial bueno y unas resistencias moderadamente altas, especialmente a tracción, que permita la ejecución de piezas con un espesor inferior al de los paneles de hormigón arquitectónico tradicionales, pero aún importante como para que el coste material del hormigón tenga un peso sustancial en el coste de ejecución del elemento.

El objetivo original fue diseñar ese mortero que permitiese fabricar paneles de fachada con espesores entre 5 y 10 centímetros, con un buen acabado estético y una resistencia suficiente para la manipulación y ejecución en obra del elemento. Conforme se iba desarrollando el producto se amplió el objetivo final del proyecto, al verificarse que el producto puede ser usado no solo como mortero sino también como compuesto premezclado para fabricar hormigones autocompactantes, añadiendo y controlando únicamente el tipo y porcentaje de grava a añadir; por tanto, los usos podrían ser mayores, permitiendo no solo la ejecución de elementos estructurales sino, incluso, estudiar el reducir la cuantía de acero en el armado pasivo de determinados elementos gracias a las mejores prestaciones de resistencia a tracción proporcionadas por el uso de fibras estructurales y el diseño del esqueleto granular.

## 2.2.- Requerimientos

Como estaba previsto inicialmente para elementos arquitectónicos de fachada, se planteó el diseño de un mortero blanco que permitiese su pigmentación y una buena calidad superficial.

Se buscaba un material fácilmente colocable y que minimizase los defectos superficiales, por lo que se pensó en una consistencia autocompactante y un tamaño de árido pequeño.

Debido a que se diseñaba para espesores de elementos solo ligeramente inferiores al de un hormigón arquitectónico tradicional, la resistencia a compresión no tenía que ser excesivamente alta, aunque la condición de autocompactabilidad y sobre todo el requerimiento de un valor alto de resistencia a tracción imponen un valor mínimo.

El conjunto de requerimientos establecido fue:

- Color blanco
- Tamaño máximo de árido: 1 mm.
- Slump: entre 290 y 325 mm.
- Tiempo mínimo de trabajabilidad a 20°C: 30 minutos
- Resistencia mínima a compresión a 28 días: 70 MPa
- Resistencia mínima a flexión a 28 días: 9 MPa
- Mínima aparición de burbujas superficiales y sin fisuración.

- Coste material un 50% inferior a las soluciones actualmente disponibles en HeidelbergCement Hispania.

### 3.- DISEÑO, PRESTACIONES COMO MAP Y COMO HAC

#### 3.1.- Diseño y prestaciones como MAP

En el diseño se priorizó el uso de adiciones que no alterasen el color blanco deseado y que permitiesen sustituir parte del cemento blanco utilizado, de forma que se reduzca el calor de hidratación del mortero, pero sin penalizar económicamente el diseño.

La necesidad de reducir en lo posible el calor de hidratación tiene importancia puesto que el espesor de los elementos es considerable y por tanto las retracciones térmicas pueden ser elevadas.

Se buscó una granulometría continua hasta un tamaño máximo de 1 mm y el uso de microfibras para reducir la fisuración, sin perjudicar la fluidez del mortero.

Las propiedades en estado fresco y endurecido son las que se indican en la Tabla 1 y las prestaciones mecánicas a distintas edades se pueden observar en la Tabla 2. Todos estos valores medios se han obtenido para una relación agua/producto del 11,5%. Los valores mostrados corresponden a los resultados obtenidos en el ensayo de tipo inicial para el Marcado CE.

**Tabla 1.** Propiedades en estado fresco y endurecido

| <i>Parámetro (unidad)*</i>                     | <i>Valor</i>         | <i>Norma</i>   |
|--|----------------------|----------------|
| Consistencia (mm)**                            | 318                  | UNE-EN 1015-3  |
| Aire ocluido en estado fresco (%)***           | <3%                  | UNE-EN 1015-7  |
| Permeabilidad al vapor de agua (kg/s·Pa)       | 1.19e <sup>-12</sup> | UNE-EN 1015-19 |
| Densidad aparente en seco (kg/m <sup>3</sup> ) | 2.359                | UNE-EN 1015-10 |

\*\*Los ensayos han sido realizados a la relación agua/producto indicada.

\*\*El ensayo se realiza sobre una plancha plana de dimensiones 500x500 mm, utilizando el molde indicado en la norma, pero rellenándolo por vertido y sin compactación. Una vez rellenado, se levanta el molde y sin sacudidas se deja que el mortero fluya, tomándose la medida cuando termina de fluir o a los 30s después de levantar el molde.

\*\*\*El recipiente del aerómetro se rellena por vertido en una sola vez y se golpea ligeramente con una masa de goma para permitir que posibles bolsas de aire puedan ser desalojadas.

**Tabla 2.** Prestaciones mecánicas a distintas edades

| <i>Prestación (UNE-EN 1015-2)</i>             | <i>Edad (días)</i> |          |          |           |
|---|--------------------|----------|----------|-----------|
|   | <i>1</i>           | <i>2</i> | <i>7</i> | <i>28</i> |
| Resistencia a Flexión (N/mm <sup>2</sup> )    | 7,7                | 7,8      | 10,3     | 11,8      |
| Resistencia a Compresión (N/mm <sup>2</sup> ) | 44,3               | 58,7     | 69,3     | 80,6      |

Como se puede observar en las Tabla 1 y 2, se cumplen los requerimientos técnicos especificados en el apartado 2.2

En la Tabla 3 podemos ver los resultados medios del cemento blanco de clase resistente 52,5 R utilizado para la formulación del producto.

**Tabla 3.** Prestaciones mecánicas del cemento BL 52,5 R

| <i>Prestación (UNE-EN 196-1)</i>              | <i>Edad (días)</i> |      |
|---|--------------------|------|
|   | 2                  | 28   |
| Resistencia a Flexión (N/mm <sup>2</sup> )    | 6,8                | 9,7  |
| Resistencia a Compresión (N/mm <sup>2</sup> ) | 44,1               | 68,8 |

Como podemos observar las prestaciones del MAP son, para la cantidad de agua de amasada recomendada, mejores que las prestaciones normalizadas del cemento.

En la Fig. 1 se puede observar el escurrimiento obtenido mediante el uso del cono de la norma EN 1015-3.



**Figura 1.** Escurrimiento MAP

### 3.1.1.- Ensayos a tracción directa

Puesto que el resultado a flexión obtenido es muy bueno, se trabajó con expertos en estructuras de hormigón armado de la ETS de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad de Granada (equipo de D. Manuel Rojas Fernández-Figares) la posibilidad de considerar las prestaciones a flexión del MAP en el cálculo estructural, con el objetivo de estudiar su contribución frente a dichos esfuerzos y deducir la potencial minoración en la cuantía de acero. Para alcanzar esta meta es necesario determinar la carga máxima soportada a tracción y el módulo de elasticidad del MAP, puesto que son los parámetros de diseño necesario.

## Dosificación robusta de autocompactantes con compuestos premezclados

HAC2018 | V Congreso Iberoamericano de Hormigón Autocompactante y Hormigones Especiales

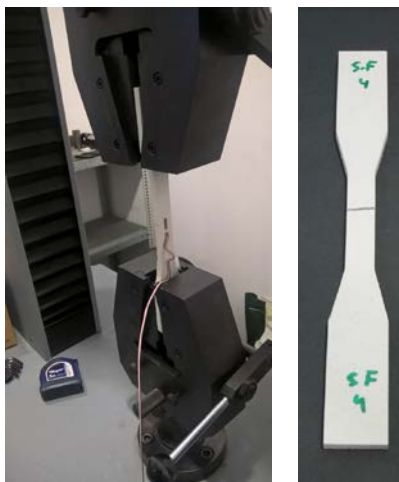
Se consideró interesante estudiar un método que permitiese obtener el valor de resistencia a tracción de forma directa y no a través del ensayo normalizado de flexotracción. El primer paso fue diseñar una probeta que permitiese, de una manera fiable, obtener dichos resultados. Para ello se tomó como base el tipo de probeta utilizado por el WG1 del CEN TC250/SC2 [1].

Se decidió fabricar una placa plana de MAP que sería pulida a dos caras y de la que se tallarían, mediante máquina de chorro de agua, las probetas. Un ejemplo de ellas aparece en la Fig. 2. Las zonas de cambio de sección se diseñaron con un radio suficiente (85 mm) para evitar la concentración de tensiones, según el criterio del Departamento de Ingeniería Civil, de Materiales y Fabricación de la Universidad de Málaga. Dicho Departamento supervisó la fabricación de las piezas y realizó su acondicionamiento y preparación para el ensayo.

En la Tabla 4 se pueden observar los resultados medios obtenidos. El módulo de elasticidad se calculó mediante la aplicación de dos galgas extensiométricas situadas en la parte central de la probeta (ver Fig. 2).

**Tabla 4.** Ensayo de tracción directa y módulo de elasticidad

| <i>Parámetro</i>                            | <i>Valor</i> | <i>Desv. típica</i> | <i>Unidades</i> |
|---|--------------|---------------------|-----------------|
| Resistencia a tracción directa ( $\sigma$ ) | 6,6          | 0,7                 | MPa             |
| Módulo de Elasticidad (E)                   | 47,9         | 0,8                 | GPa             |



**Figura 2.** Probeta y equipo de ensayo

En la Fig. 3 se puede observar un ejemplo de las curvas obtenidas.



## Dosificación robusta de autocompactantes con compuestos premezclados

HAC2018 | V Congreso Iberoamericano de Hormigón Autocompactante y Hormigones Especiales

**Tabla 6.** Resultados obtenidos (Según Anejo 17 EHE-08)

| <i>Parámetro (unidad)</i>                            | <i>Valor</i>          |                         |
|--|-----------------------|-------------------------|
| Escurrimiento (mm)                                   | 680 [ $\sigma = 35$ ] |                         |
| Escurrimiento anillo japonés – anillo 20 barras (mm) | 680 [ $\sigma = 33$ ] |                         |
| Caja en L – 3 barras (%)                             | 91 [ $\sigma = 4,6$ ] |                         |
| Embudo en V (s)                                      | 18 [ $\sigma = 2$ ]   |                         |
| Rotura a compresión (MPa)                            | R1d                   | 45,1 [ $\sigma = 2,1$ ] |
|  | R7d                   | 51,8 [ $\sigma = 1,5$ ] |
|  | R28d                  | 63,4 [ $\sigma = 1,9$ ] |
| Rotura a flexión (MPa)                               | R7d                   | 7,0 [ $\sigma = 0,6$ ]  |
|  | R28d                  | 9,1 [ $\sigma = 1,1$ ]  |

Estos resultados cumplen los límites especificados por la EHE para un HAC, siendo las prestaciones mecánicas obtenidas muy interesantes, especialmente la resistencia a flexión.

El HAC se puede clasificar en función de las prestaciones obtenidas como AC-E2+AC-V1+AC-RB2.

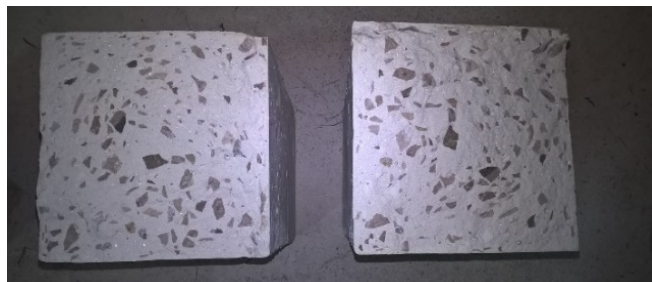
El valor de viscosidad obtenido, en el límite superior de la categoría AC-V1, indica una alta estabilidad del hormigón tanto dinámica como estática, lo cual es muy interesante para absorber pequeñas variaciones en la dosificación de agua por errores de la planta. Por el contrario, limita la fluidez del hormigón, pero el balance entre ambos comportamientos se considera positivo para el objetivo de dotar a las plantas de hormigón preparado de una dosificación robusta.

En las Fig. 5 se puede observar el frente de avance del hormigón en el ensayo de escurrimiento y en la Fig. 6 la sección de la probeta prismática una vez realizado el ensayo.



**Figura 5.** Frente de avance del HAC





**Figura 6.** Detalle de la sección de rotura de la probeta prismática

#### 4.- CONCLUSIONES

El comportamiento como MAP ha cumplido los requisitos especificados en el apartado 2.2, por lo que el diseño se considera validado para los objetivos del estudio. Destaca principalmente por el resultado a tracción directa obtenido, gracias al diseño del esqueleto granular y las características de las fracciones granulométricas utilizadas, que forman parte esencial del conocimiento tecnológico generado por esta investigación para la empresa.

Los siguientes pasos a estudiar relativos al MAP son:

- Estudiar las posibilidades de seguir incrementando el valor de resistencia a tracción directa.
- Introducción de fibras no metálicas estructurales, con el objetivo de mejorar la ductilidad del material y/o asegurar la integridad del elemento frente a una rotura, impidiendo la caída de fragmentos, por ejemplo en aplicaciones para fachadas.

En cuanto al comportamiento como HAC, se ha comprobado la posibilidad de realizar un hormigón autocompactante a partir del producto usado como binder.

Los resultados, donde los parámetros a determinar han sido la cantidad de árido grueso a emplear y el agua de amasado necesaria para el escurrimiento deseado, demuestran que se puede fabricar en laboratorio sin dificultades un HAC que cumple con los límites de la EHE y con unas excelentes prestaciones mecánicas.

Los siguientes pasos son:

- Estudiar más dosificaciones que permitan establecer unas recomendaciones sobre la cantidad máxima de árido grueso a emplear.
- De la misma forma fijar un rango recomendado de dosificación de agua, que complete la información necesaria para la planta para la formulación de su HAC.

## **Dosificación robusta de autocompactantes con compuestos premezclados**

*HAC2018 | V Congreso Iberoamericano de Hormigón Autocompactante y Hormigones Especiales*

### **AGRADECIMIENTOS**

Agradecemos la colaboración de D. Germán Castillo López de la U.D. Mecánica de Medios Continuos y Teoría de estructuras, del Departamento de Ingeniería Civil, de Materiales y Fabricación de la Universidad de Málaga y D. Manuel Rojas Fernández-Figares del Departamento de Ingeniería de la Construcción y Proyectos de Ingeniería de la ETS de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad de Granada.

### **REFERENCIAS**

- [1] Di Prisco, M. Department of Civil and Environmental Engineering Politecnico di Milano. “Fiber Reinforced Concrete in Eurocode 2: basic assumptions for structural design”. Conference at Instituto Eduardo Torroja de Ciencias de la Construcción, Taking occasion of the 14<sup>th</sup> Meeting of CEN TC250/SC2/WG1 (Revision of Eurocode2) / TG2 (Fiber Reinforced Concrete) in Madrid, Spain