

HAC2018 | V Congreso Iberoamericano de Hormigón Autocompactante y Hormigones Especiales

Valencia, 5 y 6 de Marzo de 2018

Caracterización mecánica y reológica de un hormigón autocompactante elaborado con finos de recuperación procedentes de la fabricación de mezclas asfálticas

Castillo Mingorance, J.M.⁽¹⁾, Martínez-Echevarría Romero, M.J.⁽¹⁾,
Rodríguez Montero, J.⁽¹⁾ y López Alonso, M.⁽¹⁾

⁽¹⁾ Departamento de Ingeniería de la Construcción y Proyectos de Ingeniería, E.T.S. Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos de Granada, España.

DOI: <http://dx.doi.org/10.4995/HAC2018.2018.5320>

RESUMEN

En el trabajo que se presenta se estudia la valorización de un filler de recuperación, procedente de una planta de fabricación de aglomerados asfálticos, para su uso en la elaboración de hormigones autocompactantes (HAC) con aplicaciones estructurales. En primer lugar, se ha caracterizado el filler para determinar su potencial aplicabilidad en este tipo de hormigones. Posteriormente, se ha diseñado y confeccionado un hormigón autocompactante con las prescripciones impuestas para una clase IIB de exposición ambiental, partiendo del método de dosificación de Okamura y ajustando mediante amasadas de prueba las proporciones hasta cumplir los requisitos normalizados de autocompactabilidad. Una vez logradas, el trabajo se ha centrado en la evaluación de las características mecánicas y reológicas del hormigón seleccionado, determinando su comportamiento en cuanto a su resistencia a compresión y tracción, módulo de deformación, coeficiente de Poisson, retracción por secado y fluencia. Los resultados obtenidos han confirmado que con este filler de recuperación se pueden satisfacer plenamente los requisitos de autocompactabilidad exigidos por la normativa actual, si bien este hormigón exige una mayor dosis de aditivo superplastificante para lograrlos. Asimismo, el hormigón ha alcanzado valores en las propiedades mecánicas adecuados para su aplicación estructural aunque se ha observado mayor deformabilidad que en el hormigón de referencia.

PALABRAS CLAVE: Hormigón autocompactante, filler de recuperación, fluencia, retracción.

1.- INTRODUCCIÓN

El hormigón es uno de los materiales con el que se construyen la gran mayoría de las obras civiles, de hecho, solamente en España se produjeron en torno a 16 millones de metros cúbicos el último año registrado [1]. Esto supone un fuerte coste medio ambiental debido al empleo de gran cantidad de recursos naturales y a la liberación a la atmósfera de grandes

cantidades de CO₂ durante la fabricación del cemento, en donde se genera el 5% del total emitido [2]. Debido a esto, las industrias relacionadas con el hormigón están en constante desarrollo de tecnologías más eficientes intentando optimizar los recursos existentes. Desde hace tiempo se vienen aprovechando residuos de todo tipo, tras un estudio exhaustivo de sus propiedades, para la elaboración de hormigones. Incluso están apareciendo artículos técnicos sobre la posibilidad de emplear cenizas de biomasa procedente de aceituna [3] o de adicionar recortes de bolsas de plástico a la mezcla [4].

Como es conocido, el HAC requiere mayores dosis de finos en las mezclas. Existen multitud de subproductos industriales con gran potencial para su empleo como material fino con esta finalidad. Uno de ellos podría ser el filler de recuperación procedente de las plantas de fabricación de mezclas asfálticas, como han confirmado Martín et al. [5] y Romero et al. [6]. Estos autores han estudiado con gran profundidad las características de los filleres y las dosificaciones más convenientes para obtener los requisitos de autocompactabilidad, pero no han llegado a completar el estudio de las propiedades mecánicas y reológicas de los HACs confeccionados con ellos.

El objetivo de este estudio es, pues, la evaluación desde un punto de vista mecánico y reológico, de un filler de recuperación procedente de las plantas de fabricación de mezclas asfálticas para su uso en la elaboración de hormigones autocompactantes con aplicaciones estructurales. Por otro lado, la EHE-08 [7] recomienda que cuando una propiedad sea un parámetro significativo para la función estructural se deberá evaluar mediante ensayos específicos de laboratorio. Correspondiendo a tales indicaciones, el presente estudio se ha orientado a evaluar el filler de desecho a través de las propiedades del hormigón fabricado con él (REC), generalmente en comparación con las previstas para un hormigón convencional (vibrado) y también comparadas con un HAC de referencia (REF), confeccionado con un filler comercial. Tales propiedades han sido su resistencia a compresión y a tracción, módulo de elasticidad, coeficiente de Poisson, así como la evolución de su fluencia y retracción. Para cumplir este objetivo, tras la caracterización del filler de recuperación y el diseño del hormigón con propiedades autocompactantes, se pusieron a punto los métodos de ensayo para la determinación de las propiedades citadas y se elaboraron las probetas correspondientes, tanto del hormigón objeto de estudio como de otro hormigón de referencia.

2.- MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se ha centrado en el estudio de las propiedades mecánicas y reológicas de un hormigón autocompactante elaborado con este fino de recuperación dosificado tanto con las recomendaciones de Okamura [8], como con los requerimientos mínimos que exige la Instrucción de hormigón estructural, EHE-08 para la clase de exposición ambiental de la ciudad de Granada.

2.1.- Filler de recuperación y de referencia

El filler de recuperación objeto de estudio procede de la planta de aglomerados de la empresa “HORMACESA” en Atarfe (Granada). De acuerdo con los resultados obtenidos

mediante difracción de rayos X se puede afirmar que es mayoritariamente dolomítico con pequeñas cantidades de calcita y de clorita (Fig.1). Su densidad media ha sido 2.840 kg/m^3 (UNE-EN 1097-7:2009) y su granulometría utilizando corriente de aire (UNE-EN 933-10) y mediante láser se muestran en la Figura 2. Se ha determinado su superficie específica BET que ha resultado ser de $3,187 \text{ m}^2/\text{g}$.

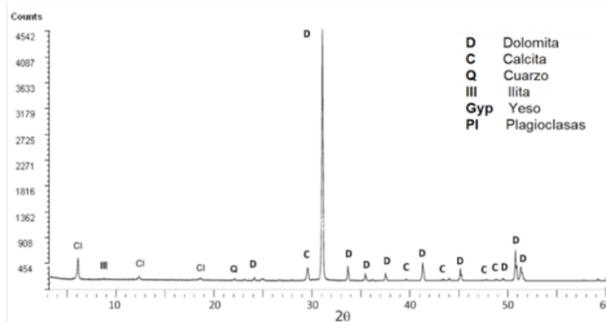


Figura 1. Difracción de rayos X del filler de recuperación.

El filler comercial empleado en la elaboración del hormigón de referencia es un material triturado también de naturaleza caliza-dolomítica suministrado por la empresa “Triturados Puerto Blanco” de Huetor Santillán (Granada) cuya densidad es de 2.830 kg/m^3 . Su granulometría se muestra en la Figura 2 y su superficie específica BET ha mostrado un valor de $0,700 \text{ m}^2/\text{g}$.

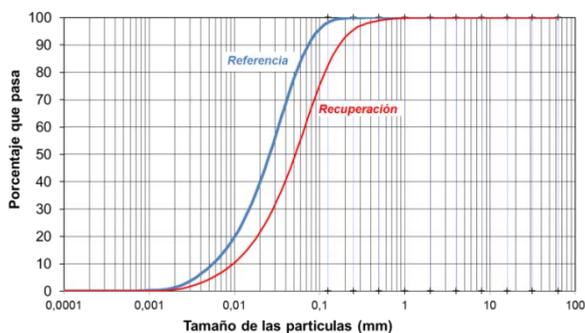


Figura 2. Granulometría láser del filler de recuperación y del filler de referencia

2.2.- Otros componentes del hormigón

El cemento empleado en la fabricación de ambos hormigones ha sido un CEM II/A-V 42,5R y el agua de amasado procede de la red de abastecimiento de la ciudad de Granada.

Los áridos utilizados en la confección del hormigón presentan un tamaño máximo de 16 mm y sus granulometrías se muestran en la Figura 3. La arena es de naturaleza caliza-dolomítica y se encuentra prácticamente exenta de finos. La grava total se ha obtenido mezclando una gavilla 4/8 y una grava 8/16 al 50%, siendo ésta la proporción con la que se obtuvo una mayor densidad de relleno (2.057 kg/m^3) según el procedimiento indicado en la norma ASTM C29/C29M-09.

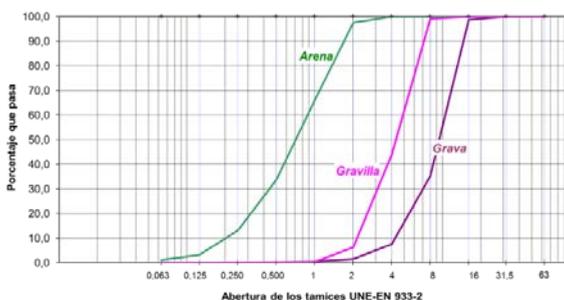


Figura 3. Granulometría de los áridos empleados en la confección del HAC

Se ha empleado un aditivo reductor de agua de alta actividad (MasterEase 3850 de Basf), indicado para la producción de hormigones de reología mejorada con un mantenimiento de consistencia. En las amasadas de prueba se ha podido observar la dosis de aditivo más conveniente para conseguir los parámetros de autocompactabilidad fijando la cantidad óptima de aditivo en un 2,4% con respecto al peso del cemento para HAC objeto de estudio. Para el hormigón de referencia la dosis de este aditivo ha sido del 1,8%.

2.3.- Hormigón autocompactante

La dosificación del hormigón autocompactante se ha realizado teniendo en cuenta las prescripciones de la EHE-08 para una clase de exposición ambiental IIB y siguiendo las indicaciones del método de Okamura et al. [8] con algunas modificaciones propuestas por otros investigadores como Marín et al [5]. Se ha empleado una dosis de cemento de 300 kg/m³ y una relación a/c de 0,55 como prescribe dicha normativa para ambos hormigones.

El hormigón se ha elaborado en una hormigonera planetaria de eje vertical. Una vez obtenida la cantidad de superplastificante óptima, se han realizado cuatro amasadas de 50l para determinar los parámetros de autocompactabilidad prescritos: de escurrimiento (UNE 83.361), de embudo en V (UNE 83.364), de caja en L (UNE 83.363) y de escurrimiento con anillo japonés (UNE 83.362). Como ensayos previos, se determinó también en ellas la resistencia a compresión.

Además, en estado fresco, el estudio se complementó con la determinación del aire ocluido (UNE-EN 12350-7:2010) y de su densidad (UNE-EN 12350-6:2009).

En estado endurecido se determinó la resistencia a compresión (UNE-EN 12390-3:2009) a 7 y 28 días sobre probetas cúbicas (150 mm) y la resistencia a tracción (UNE-EN 12390-6:2010) sobre probetas cilíndricas (300 x 150 mm) mediante el conocido como “ensayo brasileño” y aplicando el coeficiente de 0,9 como indica la EHE-08.

El módulo de elasticidad (según UNE-EN 12390-12:2014) y el coeficiente de Poisson se han determinado sobre probetas cilíndricas (300 x 150 mm). Para medir las deformaciones longitudinales se ha empleado un compresómetro con LVDTs. Las deformaciones transversales se han medido con galgas extensiométricas.

La fluencia se ha evaluado hasta la edad de 195 días sobre probetas cilíndricas (300 x 150 mm) con galgas extensiométricas embebidas en su interior siguiendo el procedimiento de la norma ASTM C512. El equipo se ha situado en la zona exterior del laboratorio con el fin de simular las condiciones ambientales en las que se encontraría una estructura real. Asimismo, se ha determinado la retracción por secado de unas probetas expuestas a las mismas condiciones ambientales para ser descontadas de los valores medidos con el equipo de fluencia. De acuerdo con el procedimiento dicho procedimiento, las probetas se han sometido a una carga de 10,5 MPa, menor al 40% de la resistencia a compresión del hormigón para la edad de ensayo.

La retracción por secado se ha evaluado, en ambiente de laboratorio, sobre probetas cilíndricas (300 x 150 mm) tras 28 días de curado en agua (UNE-EN 12390-2:2009) embebiendo galgas extensiométricas en el interior del hormigón. La temperatura, medida con un termohigrómetro, ha sido tenida en cuenta en la deformación total registrada por el equipo.

3.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1.- Evaluación del filler de recuperación

De acuerdo con la difracción de rayos X, se trata de un material de naturaleza dolomítica con ligeras impurezas de clorita y calcita. Según puede observarse, la granulometría del filler de recuperación ha resultado ser ligeramente más gruesa que la que recomienda la EHE-08, aunque se entiende que los límites granulométricos impuestos por esta normativa están basados más en razones comerciales que técnicas. Dejando aparte esta disconformidad, que no se considera determinante para excluirlo de su uso en HACs, no se han encontrado otros indicios de que este filler pueda ser inadecuado para dicha aplicación.

3.2.- Dosificación del hormigón autocompactante

Se ha dosificado con los valores límites de cemento y de relación a/c establecidos por la EHE-08, como se ha indicado anteriormente. Según la experiencia de otros estudios realizados en el laboratorio [5], la dosificación adecuada del HAC con este material se encuentra algo distante de la que se obtiene aplicando rigurosamente el método de Okamura [8]. La que aporta mejores propiedades de autocompactabilidad es la que contiene un 45%

de arena en el mortero y un 42% de grava respecto a su densidad de relleno. Las dosis de los distintos componentes se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Dosificación de los HACs elaborados tanto con filler de recuperación como con filler comercial.

<i>Dosificación en kg/m³</i>					
<i>Cemento</i>	<i>Agua</i>	<i>Grava</i>	<i>Arena</i>	<i>Filler</i>	<i>Superplastificante*</i>
300,0	169,1	864,0	792,6	342,6	7,2

* Con el filler comercial la dosis de aditivo ha sido de 5,4 kg/m³

3.3.- Ensayos previos de autocompactabilidad y resistencia

Los resultados de los ensayos de autocompactabilidad de las cuatro amasadas del HAC con la dosificación definitiva, considerados como ensayos previos se muestran en la Tabla 2, en la que también se incluyen los del HAC de referencia y los valores de las resistencias.

Tabla 2. Resultados de los ensayos previos

<i>Amasada</i>	<i>Escurrimiento</i>		<i>Escur. con anillo</i>		<i>Embudo en V</i>	<i>Caja en L</i>	<i>Res. compresión</i>	
	<i>d_f</i> [mm]	<i>T₅₀</i> [s]	<i>d_{if}</i> [mm]	<i>d_r d_{if}</i> [mm]	<i>T_v</i> [s]	<i>C_{bl}</i>	<i>7 días</i>	<i>28 días</i>
REC 1	760	2,2	730	30	8,1	1,00	33,93	39,96
REC 2	767	2,6	736	31	5,2	0,84	31,74	38,22
REC 3	743	3,3	710	33	9,0	0,94	29,06	38,87
REC 4	798	1,2	768	30	5,4	1,00	37,69	40,67
REF	795	2,25	765	30	7,47	1,00	37,48	45,01

Como se puede observar empleando el filler recuperado de las plantas de fabricación de aglomerados bituminosos, es posible obtener un hormigón autocompactante que cumpla con todos los requisitos establecidos en la normativa.

Con estos valores de resistencia a compresión es perfectamente posible alcanzar una f_{ck} de 30MPa, coherente con los requisitos de la relación a/c y de la dosis de cemento impuestos por durabilidad.

3.3.- Otras propiedades ensayadas

El aire ocluido y la densidad en estado fresco han resultado ser, para el hormigón de estudio, de 6,75 % y 2.336 kg/m³ respectivamente y 4,55 % y 2.317 kg/m³ para el hormigón

de referencia. Destaca la mayor presencia de aire en el HAC estudiado, probablemente causada por la mayor dosis de superplastificante requerida, consecuencia de la mayor superficie específica.

En estado endurecido, los hormigones confeccionados presentan las características mecánicas y reológicas que se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Otras propiedades de los HACs endurecidos

<i>Propiedad</i>	<i>REC</i>	<i>REF</i>	<i>Observaciones</i>
Resistencia a compresión (MPa)			
A 7 días	33,11	37,48	
A 28 días	39,43	45,01	
Resistencia a tracción (MPa)	2,9	2,9	
Módulo de elasticidad (GPa)			
Inicial	31,09	37,70	
Estabilizado	40,89	46,65	
Coefficiente de Poisson	0,24	-	
Fluencia específica ($\mu\text{m}/\text{m}/\text{MPa}$)	130	60	A 195 días (53, según EHE-08)
Retracción por secado ($\mu\text{m}/\text{m}$)	306,2		A 30 días

El valor de la resistencia a tracción es prácticamente el mismo que podría estimarse por la EHE-08 para un hormigón convencional con una resistencia a compresión de 39,43 MPa.

El módulo de elasticidad arroja unos resultados ligeramente inferiores a los que les corresponderían en el caso de un hormigón convencional (34,72 GPa), como era previsible, por el mayor contenido de pasta de cemento que tiene el HAC. El coeficiente de Poisson determinado ha sido ligeramente superior al establecido de 0,20 por la normativa española probablemente debido a la mayor deformabilidad que presenta este aglomerado.

Destacan los altos valores de fluencia que presenta este hormigón (Fig. 4), muy superiores a los estimados utilizando la formulación del articulado de la EHE-08, y también superiores a los obtenidos en el hormigón de referencia, lo que evidencia la importancia de determinarla

mediante los ensayos específicos de laboratorio para evitar patologías de relevancia como las que aparecieron en el puente de Veudre de Eugene Freyssinet [9].

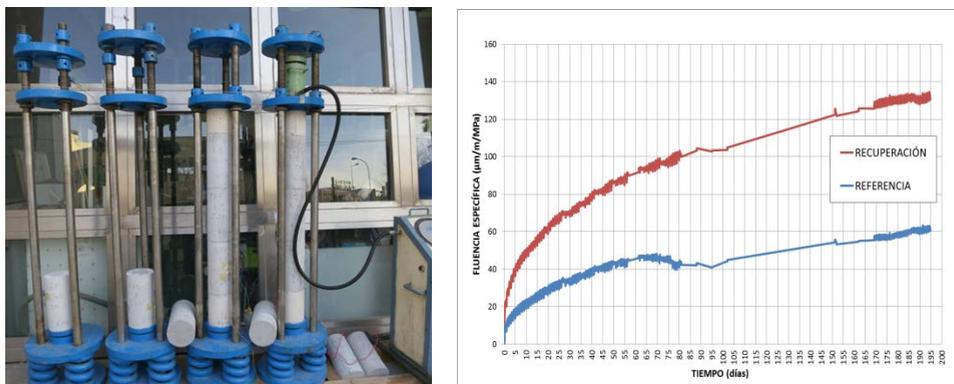


Figura 4. Dispositivo para la determinación de la fluencia (izq.) y evolución de la misma (dcha.)

Sobre este parámetro no existe unanimidad en cuanto a los valores que debería presentar el hormigón autocompactante respecto al convencional. Fernández et al. [10] indican, de 52 tipos de hormigones autocompactantes, un valor medio de fluencia específica de 57 $\mu\text{m}/\text{m}/\text{MPa}$ y de 14 hormigones convencionales un valor de 85 $\mu\text{m}/\text{m}/\text{MPa}$, contrario a lo señalado en algunas investigaciones y documentos [11, 12, 13, 14] en las que se afirma que la fluencia en el caso del hormigón autocompactante es mayor que el convencional. Parapinski et al. [15], obtuvieron para una edad de 100 días valores entre 80 y 110 $\mu\text{m}/\text{m}/\text{MPa}$ de fluencia específica, más cercanos a los obtenidos en el presente trabajo.

La retracción por secado a la edad de 30 días ha resultado ser análoga a la que estima la normativa para hormigones convencionales, como consecuencia de que se contrarrestan dos efectos significativos de este tipo de aglomerados: la mayor cantidad de pasta que aumentaría la deformabilidad, y el mayor refinamiento de la estructuras de poros, que dificultaría el secado.

4.- CONCLUSIONES

De los resultados obtenidos en el presente estudio se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- Se confirma que es posible conseguir un hormigón autocompactante con este filler de recuperación, si bien se requiere una mayor cantidad de superplastificante y ocluye una proporción de aire superior.

- Las resistencias a compresión y a tracción son coherente con la dosificación empleada en la fabricación del hormigón y plenamente satisfactorias para su empleo estructural.
- El hormigón elaborado con filler de recuperación, tal y como era previsible para un HAC por su mayor cantidad de pasta, ha presentado un módulo de elasticidad inicial solo un 10% inferior al que se obtiene a través del cálculo que propone la EHE-08.
- La fluencia del HAC de estudio ha sido superior a la que le correspondería según la formulación de la normativa española para los hormigones convencionales, aunque comparable con los valores obtenidos por otros autores.
- La retracción por secado ha resultado ser análoga a la que estima la normativa para hormigones convencionales.

Por todo ello, el filler de recuperación puede considerarse un material adecuado para alcanzar las propiedades de autocompactabilidad del hormigón, permitiendo la consecución de unas propiedades mecánicas acordes a su dosificación y perfectamente satisfactorias con fines estructurales; su empleo supondría una importante contribución a la sostenibilidad.

REFERENCIAS

- [1] Asociación Nacional Española de Fabricantes de Hormigón Preparado, AHEFHOP; Datos estadísticos del sector 3º Trimestre, año 2016
- [2] C. Meyer; “The greening of de concrete industry”. Dept. of Civil Engineering, Columbia University, New York, NY 10027, SA. 2008
- [3] Cuenca, J; Rodríguez, J; Martín-Morales, Sánchez-Roldan, Z; Zamorano, M. Effects of olive residue biomass fly ash as filler in self compacting concrete. *Construction and Building Materials*. 40 (2013) 702-709
- [4] Ghernouti, B; Rabehi, T; Bouziani, H; Ghezraoui, A; Makhloufi. Fresh and hardened properties of self-compacting concrete containing plastic bag waste fibers. *Construction and Building Materials*. 82 (2015) 89-100
- [5] Marín, J; Rodríguez, J; Moreno, F; Piqueras, J.L; Rubio, M.C. Feasibility analysis of reuse of waste filler of bituminous mixtures for the production of self-compacting concrete. *Material and Design*, 46 (2012) 372-380
- [6] Romero, A; Ramos, C; Jiménez, J; de Brito, J; Mechanical behavior of self-compacting concrete made with recovery filler from hot-mix asphalt plants. *Construction and Building Materials*, 131 (2017) 114-128

- [7] EHE-08, Instrucción de Hormigón Estructural. R.D. 1247/2008. España. 2008
- [8] Okamura, H; Ouchi, M; Self-Compacting Concrete. Journal of Advanced Concrete Technology, 1, N° 1 (2003) 5-15
- [9] Fernández, J; Eugène Freyssinet. Editorial Xarait. 1978
- [10] Fernández, J; Agranati, G; Evaluación de las deformaciones por fluencia en los hormigones autocompactantes. IV Congreso de Asociación científico-técnica del hormigón estructural (ACHE). Valencia. 2008
- [11] Viera, M; Bettencourt, A. Deformability of Hardened SCC. RILEM Proceedings PRO 33 (2003) 606-618
- [12] Assie, S; Escadeillas, G; Marchese, G. Durability of self-compacting concrete. RILEM Proceedings PRO 33 (2003) 655-662
- [13] Leemann, A; Hoffmann, C. Properties of self-compacting and conventional concrete-differences and similarities. Mag. of Concrete Research, 57, N° 3 (2005) 315-319
- [14] ACI 237R-07. American Concrete Institute Committee 237, Self-Consolidating Concrete, 2007
- [15] Parapinski, A; Aguado de Casa, A; Agullo, L; Caracterización de las propiedades del hormigón autocompactante asociadas al esqueleto granular. Tesis doctoral. Universidad de Cataluña. Junio 2010