

Evaluación del comportamiento de un hormigón autocompactante con árido reciclado grueso y fino

Performance assessment of a self-compacting concrete with coarse and fine recycled aggregate

Víctor Revilla-Cuesta^{*,a}, José Antonio Fuente-Alonso^b, Jorge Javier Hernández Bagaces^c,
José Antonio Chica Paez^d, Estibaliz Briz Blanco^e, Vanesa Ortega-López^f

^a Civil Engineer, PhD Student, Department of Civil Engineering, University of Burgos, FPU grant holder, vrevilla@ubu.es

^b Prof. Dr., Department of Construction, University of Burgos, Associate Professor, jafuente@ubu.es

^c Building Engineer, Department of Construction, University of Burgos, Laboratory Technician, jjhernandez@ubu.es

^d Dr., Digital Construction Area, Tecnalia Research & Innovation, Digital Construction Area Director, joseantonio.chica@tecnalia.com

^e Prof. Dr. Department of Mechanical Engineering, University of the Basque Country, Assistant Professor estibaliz.briz@ehu.com

^f Prof. Dr., Department of Civil Engineering, University of Burgos, Associate Professor, vortega@ubu.es

RESUMEN

La reutilización de residuos permite reducir el consumo de recursos naturales y las emisiones de CO₂ a la atmósfera causadas por la actividad extractiva, así como la ocupación de tierra en potenciales vertederos, fomentándose así una economía más circular. Acorde a esto, este artículo evalúa el comportamiento de un hormigón autocompactante elaborado con árido reciclado de hormigón. Los porcentajes de sustitución del árido natural por este residuo fueron del 100% para la fracción gruesa y del 50% en volumen para a fracción fina. Se analiza su validez para uso estructural tanto en estado fresco como en estado endurecido y su comportamiento con diferentes áridos naturales.

ABSTRACT

The use of waste enables to reduce the consumption of natural resources and CO₂ emissions released into the atmosphere because of the extractive activity, as well as to reduce potential landfills, thus contributing to a circular economy. According to this, this paper explores the development of self-compacting concrete made from recycled concrete aggregates. The replacement rates of the natural aggregate by this waste were 100% for the coarse fraction and 50% by volume for the fine fraction. Its suitability for structural use is evaluated, both in fresh and hardened state, as well as its performance with different kinds of natural aggregate.

PALABRAS CLAVE: sostenibilidad, árido reciclado, hormigón autocompactante, gestión de residuos

KEYWORDS: sustainability, recycled aggregate, self-compacting concrete, waste management

1. Introducción

Diferentes estudios, entre ellos el informe de 2014 del Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) [1], indican que el cambio climático y sus efectos son una realidad presente hoy en día. Cada uno de los diferentes sectores de actividad humana contribuyen en mayor o menor medida a este problema, incluyendo el sector de la construcción [2; 3]. Entre los diferentes impactos de este sector cabe destacar

su alto consumo de recursos naturales, especialmente áridos. Este consumo es tal que diferentes organizaciones, como ANEFA (Asociación Nacional de Empresarios Fabricantes de Áridos) y CESCE (Compañía Española de Seguros de Crédito a la exportación), estiman que, solo en España, se consumieron 112 millones de toneladas de este material en el año 2017 [4; 5]. El consumo es tan elevado debido a

su empleo en dos de los materiales más comunes y utilizados de este sector: el hormigón y las mezclas bituminosas.

Recientemente, motivado por la mayor conciencia medioambiental de la sociedad, han surgido varias líneas de investigación que tratan de minimizar este problema sustituyendo los áridos por residuos, como el caucho, el vidrio, la escoria o los Residuos de Construcción y Demolición (RCD) [6-9]. Este estudio evalúa el comportamiento de un hormigón autocompactante elaborado con un RCD específico, el árido de hormigón reciclado (Recycled Concrete Aggregate, RCA).

Las investigaciones con RCA hasta ahora se han centrado en hormigones vibrados, en los cuales diferentes porcentajes de las fracciones gruesa y fina del árido natural se sustituyen por dicho residuo. Estos estudios muestran que dichas sustituciones son factibles, aunque debe tenerse en cuenta el empeoramiento del comportamiento del hormigón cuanto mayor es el porcentaje de RCA, tanto en lo referente a las propiedades mecánicas como a las de durabilidad [10; 11].

Las investigaciones publicadas hasta la fecha relativas a hormigones autocompactantes con RCA no son muy numerosas y se centran en el uso de la fracción gruesa [12; 13]. Los estudios que recogen el empleo de RCA fino en estos hormigones son muy pocos [14; 15]. De dichas investigaciones la conclusión principal es que es difícil obtener autocompactabilidad en estado fresco del hormigón por la elevada absorción de agua y porcentaje de caras de fractura del RCA.

En el presente estudio se analiza el comportamiento en estado fresco y endurecido (resistencia a compresión) de un hormigón autocompactante elaborado con un 100% de RCA grueso, un 50% en volumen de RCA fino y diferentes tipos de áridos finos naturales.

2. Materiales

En este segundo apartado se describen las principales características de los materiales

utilizados en el diseño y fabricación de los hormigones analizados en el presente estudio.

2.1 Cemento, agua y aditivos

El cemento empleado fue un cemento CEM I 52,5 R, con una densidad de 3,1 kg/dm³. El agua empleada se obtuvo de la red de abastecimiento de la ciudad de Burgos.

Para la obtención de la fluidez necesaria en un hormigón autocompactante es necesario el empleo de aditivos. En este caso se emplearon dos aditivos distintos: un agente regulador de la viscosidad [16], denominado aditivo 1 en el presente documento, y un superplastificante, denominado aditivo 2. Estos dos aditivos indicados se suelen emplear en una proporción de entorno al 0.5-1.5% del peso de cemento, siempre y cuando el contenido de agua de la mezcla sea el idóneo [17].

2.2 Áridos naturales

Como el 100% del árido grueso era RCA, solo se emplearon áridos naturales en la fracción fina (0/4 mm). En unas dosificaciones se empleó arena sílicea lavada (muy bajo contenido de finos), redondeada [18], con una densidad de 2.58 kg/dm³ y una absorción de agua en 24 h del 0.25%. En otras, en cambio, se empleó arena caliza procedente del machaqueo y un mayor contenido de finos, cuya densidad y absorción de agua en 24h fueron 2.62 kg/dm³ y 2.08% respectivamente.

Las fracciones finas empleadas para conseguir la autocompactabilidad [18] fueron filler calizo [19], con un tamaño menor de 0.063 mm y una densidad 2.77 kg/dm³, y arena caliza 0/1.2 mm [20], de densidad 2.62 kg/dm³ y una absorción de agua en 24 h del 2.53%.

2.3 Árido reciclado de hormigón

El RCA empleado procedía del machaqueo de elementos prefabricados de hormigón con una resistencia característica de 40-45 MPa, presentando un tamaño de 0/30 mm. Este tamaño era excesivo para la obtención de hormigón autocompactante, por lo que se tamizó

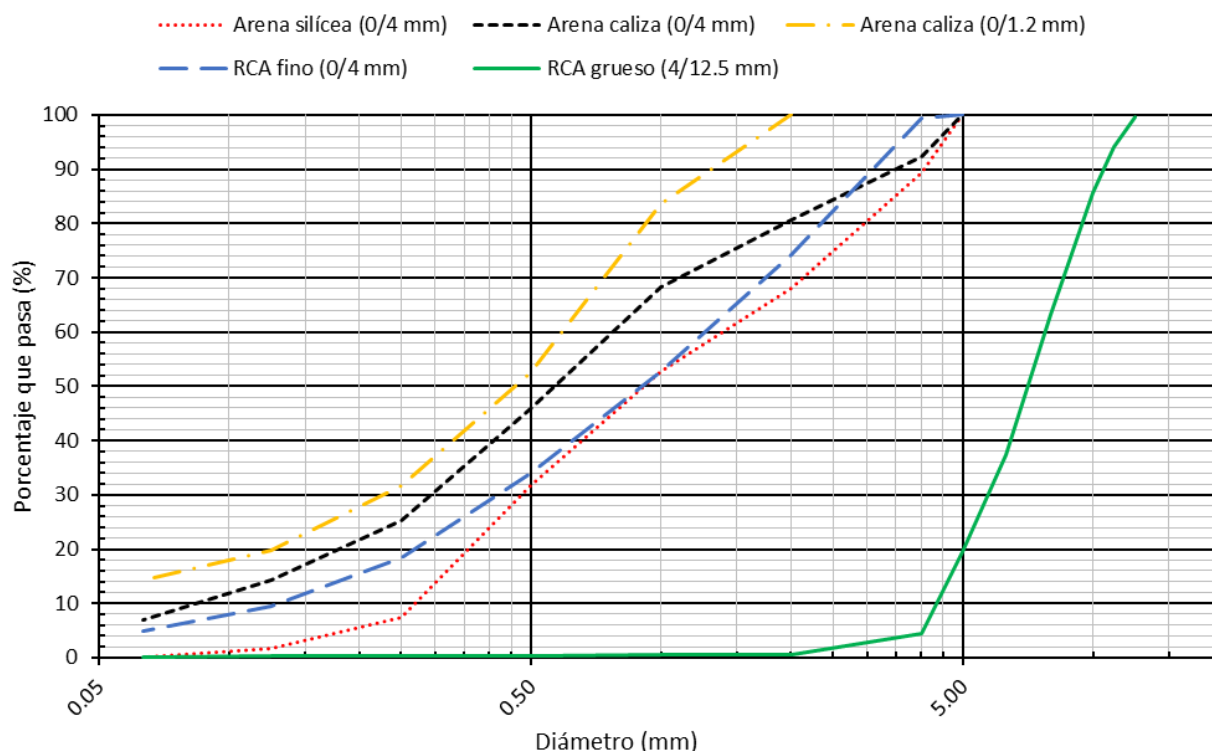


Figura 1. Curva granulométrica de todos los áridos empleados.

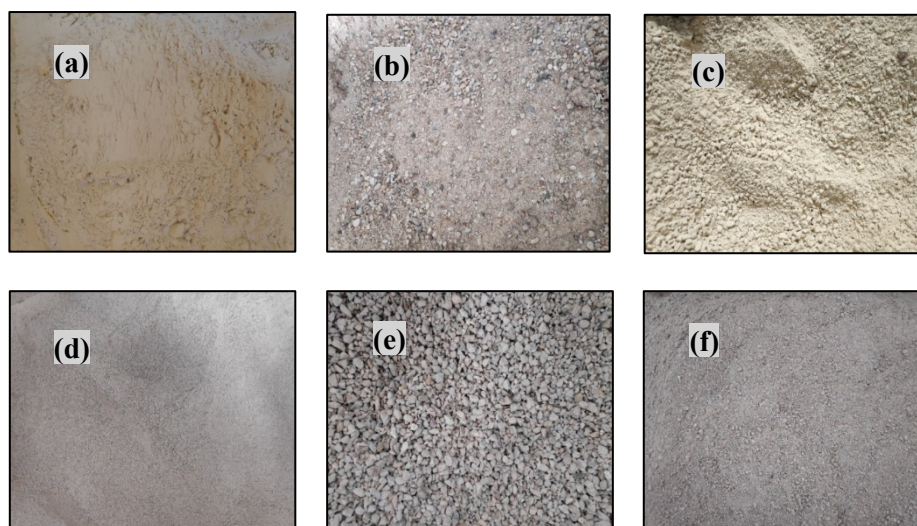


Figura 2. Áridos utilizados. a-Filler calizo (<math><0.063\text{ mm}</math>). b-Arena sílicea (0/4 mm). c-Arena caliza (0/4 mm). d-Arena caliza (0/1.2 mm). e- RCA grueso (4/12.5 mm). f-RCA fino (0/4mm)

en laboratorio, desechándose las partículas de tamaño superior a 12.5 mm, separándose además las fracciones gruesa (4/12.5 mm) y fina (0/4 mm). Las propiedades de la fracción gruesa (densidad de 2.42 kg/dm^3 , absorción de agua en 24 h del 6.25% y coeficiente de desgaste de Los Ángeles del 35%) eran similares a las expuestas en otros estudios [21] y se encontraban dentro de los límites establecidos por la EHE-08 [22]. Las propiedades del RCA fino (su empleo no está permitido en la EHE-08) fueron una densidad de 2.37 kg/dm^3 , una absorción de agua en 24h del

7.36% y una friabilidad del 16%. En la Figura 1 y en la Figura 2 se puede observar la granulometría y el aspecto de los diferentes áridos indicados.

3. Dosificación. Diseño de la mezcla

El hormigón autocompactante estudiado fue elaborado con un 100% de RCA grueso y un 50% en volumen de RCA fino. Dichos residuos además fueron combinados con áridos naturales, no reciclados, de diferente naturaleza. Se

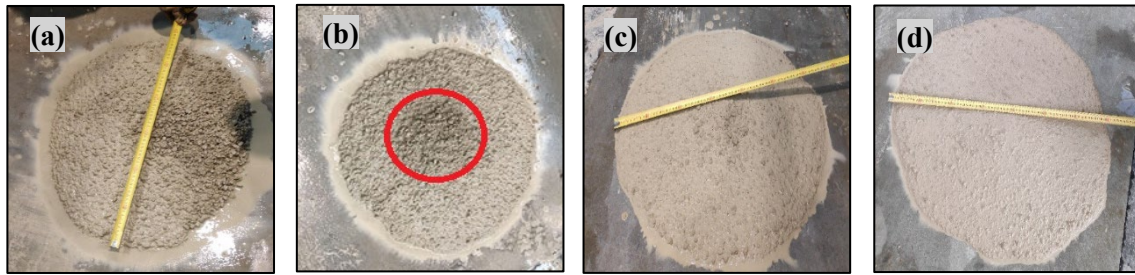


Figura 3. Etapas del diseño de SCC-100C-50F-M. a- Dosificación inicial con exceso de árido grueso. b- Dosificación con exceso de agua e importante segregación en la parte central. c- Dosificación con ligero exceso de agua y leve segregación en la parte central. d- Dosificación definitiva: SCC-100C-50F-M

elaboraron tres dosificaciones de hormigón autocompactante: SCC-100C-50F-M, SCC-100C-50F-S y SCC-100C-50F-L.

La dosificación SCC-100C-50F-M incorpora, además de las citadas cantidades de residuos, arena sílicea 0/4 mm. Las fracciones finas que aportan la autocompactabilidad son arena caliza 0/1.2 mm y filler calizo. El diseño de esta dosificación se realizó mediante el ensayo de escurrimiento de acuerdo con la norma EN 12350-8:2011, buscando las proporciones adecuadas de los diferentes componentes, de forma que en la realización del ensayo no existiese ningún tipo de segregación ni exudación. Se buscó además una clase de escurrimiento SF2, de acuerdo con las recomendaciones de la EFNARC, para lo cual el diámetro máximo en el ensayo de escurrimiento debe encontrarse entre 650 y 750 mm. La Figura 3 muestra cuatro etapas del diseño, siendo la última el resultado obtenido mediante la dosificación definitiva.

Con todo ello, la dosificación SCC-100C-50F-M estuvo compuesta por 296 kg/m³ de cemento, 122 kg/m³ de filler, 183 kg/m³ de agua, 522 kg/m³ de RCA grueso, 570 kg/m³ de RCA fino, 343 kg/m³ de arena sílicea 0/4 mm, 215 kg/m³ de arena caliza 0/1.2 mm, 2.20 kg/m³ de aditivo 1 y 4.35 kg/m³ de aditivo 2.

Obtenida la dosificación SCC-100C-50F-M se realizó la sustitución en volumen de la arena caliza 0/1.2 mm por otros componentes. En primer lugar, se sustituyó por arena sílicea 0/4 mm, dando lugar a la mezcla SCC-100C-50F-S, cuya dosificación fue idéntica a la SCC-100C-50F-M, pero sin arena caliza 0/1.2 mm y con un contenido de arena sílicea 0/4 mm de 555 kg/m³.

La forma redondeada de esta arena hizo que, a pesar de la disminución de partículas finas, el resultado del ensayo de escurrimiento fuese adecuado.

Posteriormente, se sustituyó en volumen la arena sílicea 0/4 mm de la dosificación SCC-100C-50F-S por arena caliza 0/4 mm. A pesar de que esta presentaba un mayor contenido de finos, su forma angular hizo que el resultado no fuese el esperado, produciéndose una segregación en la parte central del árido grueso. Por ello fue necesario un reajuste de la dosificación, reduciéndose la cantidad de árido grueso e incrementando el contenido de filler (en la Figura 4 se pueden ver los estados inicial y final). La mezcla SCC-100C-50F-C se compuso finalmente de 296 kg/m³ de cemento, 176 kg/m³ de filler, 185 kg/m³ de agua, 470 kg/m³ de RCA grueso, 570 kg/m³ de RCA fino, 563 kg/m³ de arena caliza 0/4 mm, 2.20 kg/m³ de aditivo 1 y 4.35 kg/m³ de aditivo 2.

En todas las dosificaciones elaboradas el proceso de amasado fue siempre el mismo, realizándose 3 etapas. En primer lugar, se amasó el RCA fino y grueso, la arena correspondiente (arena sílicea 0/4 mm, arena caliza 0/4 mm y arena caliza 0/1.2 mm) y la mitad del agua durante 30 segundos. Posteriormente se

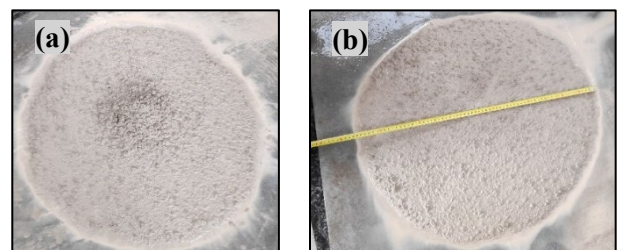


Figura 4. SCC-100C-50F-L. a- Estado inicial (segregación de árido grueso en la parte central). b- Estado final (mezcla homogénea sin segregación)

añadieron el cemento, el filler y el resto del agua, amasándose nuevamente durante 30 segundos. Por último, con todos los áridos saturados, se añadieron los aditivos, dejándose actuar durante otros 30 segundos.

4. Estado fresco. Fluidiez

En el apartado anterior se ha indicado que el ensayo de escurrimiento fue el que se tomó como referencia para efectuar el diseño de la dosificación. Sin embargo, no es suficiente con que el hormigón autocompactante presente una adecuada fluidez en el ensayo de escurrimiento, sino que también debe presentar una adecuada viscosidad, habitualmente medida con el ensayo del embudo en V (EN 12380-9), una correcta capacidad de paso, en este caso evaluada con el ensayo de caja en L (EN 12380-10), y una alta resistencia a la segregación, la cual se mide fácilmente con el ensayo de segregación en tamiz (EN 12380-11). Los resultados de estos ensayos para las tres dosificaciones estudiadas pueden observarse en la Tabla 1.

Los tres hormigones estudiados presentaron una clase de escurrimiento SF2, una viscosidad VF1 (salvo SCC-100C-50F-L, de clase VF2), una capacidad de paso PA1 y una resistencia a la segregación SR2. Esto se debió a que los hormigones cumplen los requisitos establecidos en las recomendaciones de la EFNARC para ello.

- Clase de escurrimiento SF2: diámetro en el ensayo de escurrimiento entre 650 y 750 mm.
- Viscosidad VF1: resultado en el ensayo del embudo en V menor de 8 s. Si está entre 8 y 25s es de clase VF2.

- Capacidad de paso PA1: resultado del ensayo de caja en L de dos barras entre 0.80 y 1.
- Resistencia a la segregación SR2: segregación en tamiz menor del 15%.

El hormigón con mejores resultados en los ensayos fue el SCC-100C-50F-M. La arena caliza 0/1.2 mm supuso una mayor proporción de finos, originando una masa muy homogénea. Este hormigón fluyó óptimamente en todas las situaciones (ensayos) y con una muy baja segregación. La eliminación de parte de la fracción fina (caliza 0/1.2 mm) empeoró el comportamiento. Su sustitución por arena sílicea 0/4 mm disminuyó fundamentalmente la capacidad de paso, pues la proporción de pasta de cemento fue menor, dificultándose el arrastre de las partículas de árido. Sin embargo, la forma redondeada de la arena sílicea hizo que el hormigón fluyese adecuadamente, conservando una buena viscosidad. La sustitución por arena caliza 0/4 mm tuvo el efecto contrario. La capacidad de paso no se vio afectada (la proporción entre la pasta de cemento y árido no se vio alterada, pues esta arena presentaba un mayor contenido de finos). Sin embargo, la forma rugosa e irregular de las partículas de esta arena hizo que estas deslizasen con mayor dificultad, originando una mayor viscosidad. La resistencia a la segregación empeoró de forma muy ligera por la eliminación de fracciones finas, lo cual disminuyó la compacidad de la pasta de cemento.

Tabla 1. Ensayos en estado fresco

| | SCC-100C-50F-M | SCC-100C-50F-S | SCC-100C-50F-L |
|--|----------------|----------------|----------------|
| Ensayo de escurrimiento. T500 (s) | 4 | 4 | 5 |
| Ensayo de escurrimiento. Diámetro máximo (mm.) | 720 | 690 | 730 |
| Ensayo del embudo en V. Viscosidad (s) | 7 | 8 | 12 |
| Ensayo de caja en L. Capacidad de paso (H2/H1) | 0.97 | 0.86 | 0.94 |
| Segregación en tamiz (%) | 0.41 | 0.86 | 0.61 |

5. Estado endurecido.

Resistencia a compresión

La resistencia a compresión, desde el punto de vista estructural, es la propiedad mecánica más importante. Esta debe ser adecuada para las solicitaciones que actúan sobre la estructura en la que se emplee. Esta propiedad fue analizada para estos hormigones a diferentes edades de curado (1 día, 7 días y 28 días) sobre probeta normalizada (cilíndrica 15x30 cm) según la norma EN 12390-3. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 5. Además, en dicha figura la pendiente de las rectas representadas muestra la velocidad de adquisición de resistencia (MPa/día).

Esta Figura 5 muestra que la mezcla SCC-100C-50F-M fue la que presentó una mayor resistencia a compresión a los 28 días, llegando a los 45 MPa, siendo este hormigón válido para aplicaciones de pretensado. El hormigón con arena caliza 0/4 mm ocupó una posición intermedia y el hormigón SCC-100C-50F-S fue el de menor resistencia. Los valores de resistencia a compresión obtenidos fueron acordes al contenido global de finos de la mezcla, de forma que un mayor contenido de finos implicó una mayor resistencia. A edades distintas la situación es diferente:

- A la edad de 1 día, el hormigón con más finos (SCC-100C-50F-M) fue el que presentó una mayor resistencia, no existiendo una diferencia apreciable entre la resistencia del hormigón elaborado con arena silíceo 0/4 mm y la del elaborado con arena caliza 0/4 mm.
- A los 7 días, el hormigón con menor contenido de finos (SCC-100C-50F-S) alcanzó prácticamente el 100% de la resistencia a compresión a 28 días. Los otros dos hormigones mantienen la situación que se observa a las 24 h (1 día).

La resistencia a diferentes edades permite extraer conclusiones en relación a la velocidad de adquisición de resistencia. Un alto contenido de finos implicó una mayor velocidad inicial de adquisición de resistencia (1 día), mientras que, a pesar de que la resistencia fue mayor, estas fracciones finas hicieron que la adquisición de resistencia a edades posteriores fuese más lenta (hasta los 7 días). La adquisición de resistencia después de los 7 días solo se mantuvo para los hormigones con alto contenido de finos. Los hormigones SCC-100C-50F-M y SCC-100C-50F-C no tienen una diferencia notable de velocidad de adquisición de resistencia (rectas paralelas).

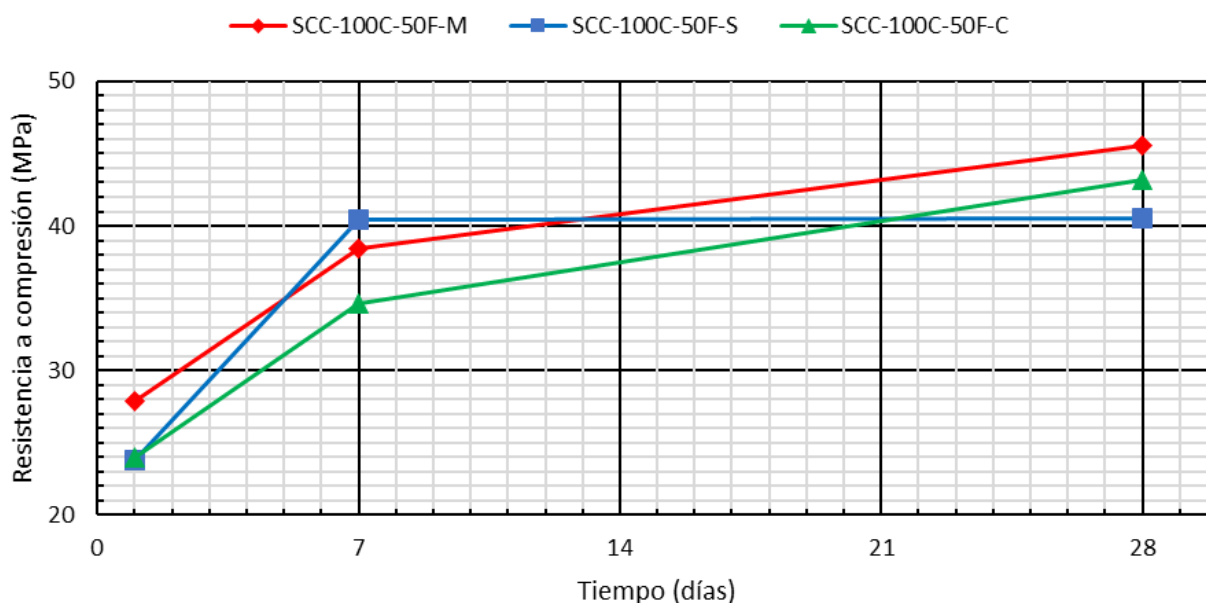


Figura 5. Resistencia a compresión de los hormigones estudiados a diferentes edades

6. Conclusiones

A partir de todo lo comentado se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- Se puede elaborar un hormigón autocompactante con una óptima fluidez en estado fresco empleándose elevadas cantidades de RCA tanto grueso como fino.
- Para la obtención de un hormigón autocompactante la dosificación debe adaptarse a los componentes del mismo. Se ha podido ver que no es lo mismo emplear arena silícea que arena caliza. El adecuado contenido de finos de la mezcla es fundamental, además de una correcta proporción de árido grueso, pues si este presenta una forma angulosa se pueden producir segregaciones, por ejemplo durante el ensayo de escurrimiento.
- El empleo de RCA disminuye la resistencia a compresión. Sin embargo, pueden obtenerse valores altos de resistencia a compresión utilizando dicho residuo. Estos hormigones incluso pueden ser aptos en estructuras pretensadas (resistencia mínima de 45 MPa).
- Las modificaciones en la dosificación realizadas para obtener un buen comportamiento en estado fresco, en este caso fundamentalmente el contenido de finos, afectan también a las propiedades en estado endurecido. Por ello, la dosificación del hormigón debe realizarse teniéndose en cuenta el comportamiento deseado en ambos estados.

Agradecimientos

Los autores desean expresar su gratitud a: el Vicerrectorado de Investigación de la Universidad de Burgos (ayuda SUCONS); la Junta de Castilla y León por fundar y reconocer la Unidad de Investigación Consolidada UIC-

parcialmente financiado por fondos FEDER; al Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades (MICINN) y a FEDER (European Regional Development Funds) por los proyectos y la financiación FPU17/03374.

Referencias

- [1] IPCC. Climate Change 2014: Synthesis Report. 2014: 176 p.
- [2] Arenas Cabello, F.J. El impacto ambiental en la construcción industrial: Criterios para una construcción sostenible. Tesis. 2007: 330 p.
- [3] Buyle, M., Braet, J., Audenaert, A., Life cycle assessment in the construction sector: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 26 (2013) 379-388.
- [4] ANEFA, Informe de situación económica sectorial, (2018).
- [5] CESCE, Informe sectorial de la economía española: Materiales de construcción, (2018).
- [6] Basic, R., Milicevic, I., Sipos, T.K., Strukar, K., Recycled Rubber as an Aggregate Replacement in Self-Compacting Concrete- Literature Overview, *Materials*. 11 (2018).
- [7] Chandra Paul, S., Šavija, B., Babafemi, A.J., A comprehensive review on mechanical and durability properties of cement-based materials containing waste recycled glass, *Journal of Cleaner Production*. 198 (2018) 891-906.
- [8] Skaf, M., Manso, J.M., Aragón, Á., Fuente-Alonso, J.A., Ortega-López, V., EAF slag in asphalt mixes: A brief review of its possible re-use, *Resources, Conservation and Recycling*. 120 (2017) 176-185.
- [9] Tam, V.W.Y., Soomro, M., Evangelista, A.C.J., A review of recycled aggregate in concrete applications (2000–2017), *Construction and Building Materials*. 172 (2018) 272-292.
- [10] Guo, H., Shi, C., Guan, X., Zhu, J., Ding, Y., Ling, T.C., Zhang, H., Wang, Y., Durability of recycled aggregate concrete – A review, *Cement and Concrete Composites*. 89 (2018) 251-259.

- [11]Silva, R.V., De Brito, J., Dhir, R.K., The influence of the use of recycled aggregates on the compressive strength of concrete: A review, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*. 19 (2015) 825-849.
- [12]Fiol, F., Thomas, C., Muñoz, C., Ortega-López, V., Manso, J.M., The influence of recycled aggregates from precast elements on the mechanical properties of structural self-compacting concrete, *Construction and Building Materials*. 182 (2018) 309-323.
- [13]Grdic, Z.J., Toplicic-Curcic, G.A., Despotovic, I.M., Ristic, N.S., Properties of self-compacting concrete prepared with coarse recycled concrete aggregate, *Construction and Building Materials*. 24 (2010) 1129-1133.
- [14]Carro-López, D., González-Fonteboa, B., De Brito, J., Martínez-Abella, F., González-Taboada, I., Silva, P., Study of the rheology of self-compacting concrete with fine recycled concrete aggregates, *Construction and Building Materials*. 96 (2015) 491-501.
- [15]Santos, S.A., da Silva, P.R., de Brito, J., Mechanical performance evaluation of self-compacting concrete with fine and coarse recycled aggregates from the precast industry, *Materials*. 10 (2017).
- [16]Barbudo, A., De Brito, J., Evangelista, L., Bravo, M., Agrela, F., Influence of water-reducing admixtures on the mechanical performance of recycled concrete, *Journal of Cleaner Production*. 59 (2013) 93-98.
- [17]Ouchi, M., Hibino, M., Okamura, H., Effect of superplasticizer on self-compactability of fresh concrete, *Trans. Res. Record*. (1997) 37-40.
- [18]Ghoddousi, P., Shirzadi Javid, A.A., Zareechian, M., Habibnejad korayem, A., Physical and chemical effects of siliceous particles at nano, micro, and macro scales on properties of self-consolidating mortar overlays, *Construction and Building Materials*. 189 (2018) 1140-1154.
- [19]Okamura, H., Ouchi, M. Self-compacting concrete. Development, present use and future. Vol. 7. 1999: 3-14 p.
- [20]Zhang, J., An, X., Nie, D., Effect of fine aggregate characteristics on the thresholds of self-compacting paste rheological properties, *Construction and Building Materials*. 116 (2016) 355-365.
- [21]Martín-Morales, M., Zamorano, M., Ruiz-Moyano, A., Valverde-Espinosa, I., Characterization of recycled aggregates construction and demolition waste for concrete production following the Spanish Structural Concrete Code EHE-08, *Construction and Building Materials*. 25 (2011) 742-748.
- [22]EHE-08, Instrucción de Hormigón Estructural EHE-08, Structural Concrete Regulations, Ministerio de Fomento, Gobierno de España. (2010).