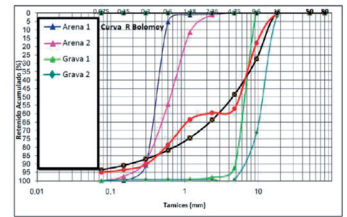


Diseño de hormigón autocompactante con aditivos sintéticos de 4ª generación



Design of self compacted concrete with 4th generation synthetic additives



M^a Paz Sáez-Pérez, Amparo Verdú-Vázquez y Mercedes Patón-Aguilera

Universidad de Granada. Dpto. Construcciones Arquitectónicas. Calle Dr. Severo Ochoa, s/n -18001 Granada (España).

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/9013> | Recibido: 2267/10/2018 • Inicio Evaluación: 06/11/2018 • Aceptado: 18/12/2018

ABSTRACT

- By definition, the self compacting concrete is recognized as a main characteristic is the capacity to flow and filling volume of poring concrete by the action of its own weight. The natural composition of the materials is the same for a conventional concrete (cement, aggregates, additions, additives and water). Its ability to be self compacting is due mainly to the high content in fines, to the low content in fine in thick granulometry and the high doses of additives. The present work tackles the research carried out on self-compacting concrete and the chemical additives used in its manufacture, specifically the so-called last generation or superplasticizers known as fourth generation additives or polycarboxylates. Differentiating theme, not depending on the brand or the manufacturer if not depending of their molecular structure, which it results to the creation of long chain additives or short chain additives. The key to obtaining a good HAC characterized by a high cohesion and with self-compacting properties lies in the correct optimization of the superplasticizer-additive combination (viscosity modifier). Therefore, the materials used have been the main part of the study to achieve the proposed objectives, guaranteeing the compatibility between them, the water/cement ratio and the achievement of established resistances stand out. The results obtained show the goodness of the 4th generation additives and show that the use of a correct granulometric curve together with the use of short chain or long chain additives gives us a significant variation in the strength of the concrete. Giving, sometimes, the option of dispensing with the use of different additions to obtain the improvement of results with the use of the additives tested.
- **Keywords:** Self-compacting concrete; additives-4th-generation, super plasticizer; superplasticizer, silica fume, fresh properties; mechanical properties.

RESUMEN

Por definición el hormigón autocompactante se reconoce como un hormigón cuya principal característica es la de fluir y rellenar el volumen a hormigonar por la acción de su propio peso, sin necesidad de vibrado. La composición material es la misma que para un hormigón convencional (cemento, áridos, adiciones, aditivos y agua). Su autocompactabilidad se debe principalmente al alto contenido en finos, al bajo contenido en gruesos y a las altas dosis de aditivos. El presente trabajo aborda la investigación sobre hormigón autocompactante y los aditivos químicos utilizados en su

fabricación, concretamente los llamados de última generación o superplastificantes conocidos como aditivos de cuarta generación o policarboxilatos. Diferenciándolos a estos, no en función de la marca o del fabricante sino en función de su estructura molecular, lo que da lugar a la creación de aditivos de cadena larga o aditivos de cadena corta. La clave para obtener un buen HAC radica en la correcta optimización de la combinación superplastificante-aditivo (modificador de viscosidad). Por ello los materiales empleados han sido la parte principal de este estudio para poder conseguir los objetivos propuestos, garantizando la compatibilidad entre ellos, la relación agua/cemento y la consecución de resistencias establecidas. Los resultados obtenidos ponen de manifiesto la bondad de los aditivos de última generación y demuestran que el empleo de una correcta curva granulométrica junto con el empleo de aditivos de cadena corta o cadena larga nos aporta una notable variación en la resistencia del hormigón. Dando, a veces, la opción de prescindir del uso de adiciones como el humo de sílice.

Palabras clave: hormigón autocompactante, aditivos de 4ª generación, superplastificantes, humo de sílice, propiedades frescas, propiedades mecánicas.

1. INTRODUCCIÓN

Con carácter general y según establecen diversos autores [1, 2, 3, 4, 5], un hormigón autocompactante (HAC) desde el punto de vista composicional se equipara a un hormigón convencional (cemento, áridos, adiciones, aditivos, agua). Sin embargo su comportamiento es evidentemente diferente al tener la capacidad de fluir y rellenar todos los huecos existentes en una armadura, por la acción de su propio peso. Respecto a su ejecución y trabajabilidad distintos organismos y autores [6, 7], consideran que las cualidades más importantes que definen a este tipo de hormigón favorecen su utilización, destacando su durabilidad, fluidicidad y homogeneidad, puesta en obra de elementos de grandes dimensiones, además de contar con la posibilidad de utilizar aditivos que mejoren sus condiciones [8], lo que supone la mejora de otros aspectos como la reducción de costes y la eliminación de riesgos durante su puesta en obra [8, 9].

Evidentemente no todo son ventajas de manera que [10], determina como principales desventajas en las fases de producción y puesta en obra, la necesidad de realizar rigurosos estudios y un mantenimiento estricto del diseño de sus componentes para poder garantizar las propiedades del material. Así como controlar su puesta en obra ya que su consistencia líquida facilita la fuga por

	CEMENTO	ADICIÓN	GRAVA	ARENA	Agua	
SiO ₂	18,5	93,05	0,4	46,89	Ca	36
Al ₂ O ₃	4,6	0,20	0,16	6,93	Mg	15
CaO	64,8	0,50	--	18,72	CaCO ₃	170
MgO	1,87	0,30	0,35	1,04	HCO ₃	168
Na ₂ O	--	0,20	--	--	Cl-	<5
K ₂ O	0,82	0,40	0,03	1,06	SO ₄ -	12
Fe ₂ O ₃	3,33	0,10	0,02	11,99	NO ₃ -	<0,02
SO ₃	3,98	--	--	5,03	NO ₂ -	<0,02
CaCO ₃	--	--	96,41	--	NH ₄ +	<0,05
Pérdida al fuego	2,16	4,00	3,8	9,17	Fluoruros	<0,3
Densidad	3.150 gr/cm ³	225 gr/cm ³	2.690 gr/cm ³	2.670 gr/cm ³	Na	2
Absorción de agua			0,80%	0,40%	Al	123

Tabla 1: Composición química de los materiales (porcentajes en peso) y valores de absorción de agua y densidad y Composición química agua potable utilizada (mg/l) [25]

cualquier fisura eventual o hueco. A lo que se añade el control de la rigidez de los moldes, para que no sea un problema y deje avanzar al HAC más allá de las dimensiones proyectadas.

Tratando de garantizar la mejora del rendimiento y propiedades de este tipo de hormigones, se han llevado a cabo investigaciones recientes que someten a estudio el comportamiento de distintos aditivos y su dosificación. Su procedencia es variable siendo los más frecuentes los productos minerales [11, 12, 13, 14, 15], los residuos procedentes de prefabricados industriales [16, 17, 18], y las cenizas y escorias [18, 19, 20, 21].

En esa misma línea la presente investigación pretende como objetivo principal evaluar la efectividad de distintos tipos de aditivos de 4ª generación en diferentes dosificaciones (SikaViscocrete 7800, Mapei 677 Dynamon-SX, TecadAnax XT, TecadAnax WX), lo que permitirá establecer la idoneidad en cada tipo, realizando para ello ensayos de caracterización tanto del material aditivo como de las probetas de hormigón.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. MATERIALES

Los materiales utilizados en el diseño del hormigón autocompactante fueron los siguientes:

- Cemento CEM Tipo II 52,5R, cumpliendo con las especificaciones de la norma [22]. La composición química se incluye en la Tabla 1.
- Agua potable. Su inclusión se considera apta para la realización de los ensayos siguiendo las especificaciones de la norma [23] y otras investigaciones realizadas [11], [23, 24]. Su composición química se incluye en la Tabla 1 [25].
- Agregado fino, arena de origen silíceo, en dos tamaños fino (arena 1) y grueso (arena 2) de tamaño 2-8 mm, cumpliendo con la norma [26]. La composición química se incluye en la Tabla 1.
- Agregado grueso de origen calizo (grava de machaqueo), en dos tamaños (árido grueso 1: 3-4,75 mm y árido grueso 2:

5-18 mm), cumpliendo con la norma [26]. La composición química se incluye en la Tabla 1.

- Adición mineral de microsílíce compactada (humo de sílice), procedente de la casa BASF, MasterLife SF 100 (0,1-2 mm), cumpliendo con las especificaciones de la norma [27]. Su composición figura en la Tabla 1.
- Aditivos: como componentes fundamentales del estudio realizado. Se propone el uso de 4 diferentes (2 de cadena larga y 2 de cadena corta). En todos los casos cumplen con la norma [28] y cuentan con el marcado CE. Las características indicadas han sido obtenidas de la ficha técnica del producto. En concreto se han ensayado los siguientes:
 - "Sika Viscocrete 7800" de cadena larga, de la empresa SIKA. Es un aditivo líquido, no clorado formado a base de policarboxilatos modificados. Tiene un Ph de 4,5 y una densidad de 1,12 gr/cm³.
 - "Mapei 677 Dynamon-SX, de cadena larga" de la empresa Mapei. Es un aditivo líquido de base acrílica, no clorado. Tiene un pH de 6,5 y una densidad de 1,07 gr/cm³.
 - "TecadAnax XT, de cadena corta" de la empresa Tecad. Es un aditivo líquido compuesto por polímeros metacrílicos. Tiene un pH de 6,5 y una densidad 1,02 gr/cm³.
 - "TecadAnax WX, de cadena corta": de la empresa Tecad. Es un aditivo líquido compuesto por polímeros metacrílicos. Tiene un pH de 6,5 y una densidad 1,02 gr/cm³.

La distribución del tamaño de partícula de los agregados fue determinada utilizando los métodos de cribado según la norma [29] y sus densidades aparentes fueron evaluadas de acuerdo con la norma [30]. La determinación del % de absorción de agua se realiza siguiendo el procedimiento establecido en la norma [31].

Las dosificaciones utilizadas en pastas y hormigones se muestran a continuación en las Tablas 2 y 3.

Componente	Cemento	Arena	Agua potable A/C = 0,5	Aditivo
cantidad	350	350	175	1,2%

Tabla 2: Dosificación de la pasta de mortero (kg/m³)

	Cemento 52,5 R	Arena 1	Arena 2	Grava 1	Grava 2	Adición (10%)	Agua A/C = 0,5	Aditivo 1,2%
s/ adición	450	610	375	350	420		225	5,40
c/ adición*	450	549	365	350	420	61	225	5,40.1.
* En esta dosificación la Arena 1 es sustituida por la adición de humo de sílice.								

Tabla 3: Dosificación del hormigón autocompactante (kg/m³)

2.2. MÉTODOS

Para verificar el comportamiento de los hormigones propuestos en el estudio se llevaron a cabo los siguientes ensayos.

2.2.1. Ensayos en pasta de mortero

En una primera fase se realizaron los ensayos para determinar las condiciones de las materias primas y de curado.

En el caso de los aditivos, estudios preliminares realizados con diferentes porcentajes (0,2% - 0,4% - 0,6% - 0,8% - 1% - 1,2% - 1,4% - 1,6%), todos ellos admitidos en los límites que determinan los fabricantes de los diferentes productos y siendo similares a los utilizados en otras investigaciones [14, 18], permitieron conocer el tiempo de caída y determinar el porcentaje de aplicación óptimo en la presente investigación, siendo este de 1,2%.

En la primera fase de la investigación los ensayos realizados fueron a) mesa de sacudidas, b) cono de Marsh y c) Porosímetro. Para ello se utilizaron pastas de mortero, cuya dosificación aparece en la Tabla 2. Se realizaron un total de 3 probetas por cada tipo de aditivo, siendo un total de 12 probetas.

El ensayo de la mesa de sacudidas [32], realizado para determinar la segregación de la pasta, utilizó para su realización una mesa de sacudidas manual de la marca Proetisa.

El ensayo del Cono de Marsh [33], determina la fluidez de la pasta de cemento. Se utilizó un embudo de plástico de la marca Proetisa, de 290 mm de altura, 9 mm de diámetro inferior y 155 mm de diámetro superior y diámetro de boca 60 mm., apoyado en soporte metálico.

Finalmente con el ensayo del porosímetro [34] se determina el contenido de aire en la pasta de cemento. Se utilizó un porosímetro marca Matest, modelo E027 y 1 litro de capacidad.

2.2.2. Ensayos en hormigón HAC

En la segunda fase se realizaron los ensayos para determinar la idoneidad de la dosificación del HAC, aplicando los aditivos anteriormente descritos en el porcentaje óptimo establecido, lo que permitió conocer las diferencias de comportamiento entre ellos.

En esta fase se realizaron un total de 48 muestras. De ellas, 24 probetas con adición. 6 probetas por cada tipo de aditivo de última generación (2 de cadena larga y 2 de cadena corta). Y 24 probetas sin adición. 6 probetas por cada tipo de aditivo de última generación (2 de cadena larga y 2 de cadena corta).

Los ensayos realizados fueron a) cálculo de curva granulométrica, b) cono de Abrams y c) resistencia a compresión.

El cálculo de la curva granulométrica de Bolomey permitió adecuar la dosificación de áridos del HAC. La norma de aplicación fue la [26]. La dosificación propuesta siguió las recomendaciones de [1], [35].

El ensayo del Cono de Abrams [36] tiene como objetivo determinar la consistencia del hormigón fresco. Se utilizó un cono de Abrams y accesorios (varilla, placa base y regla) de la marca Proetisa.

El ensayo de Rotura de probetas a compresión [37], determina la resistencia del HAC. Se utilizó una prensa automática de la marca Proetisa de 6000 kN de capacidad, controlada con ordenador con sistema ETIWIN.

Los hormigones se vertieron en moldes cúbicos normalizados de 15x15 cm. Todas las muestras se desmoldaron un día después, posteriormente las muestras se curaron a 22 ± 2 ° C con 100% de HR durante un período de 28 días. Los resultados muestran el valor promedio para cada aditivo y su desviación estándar.

A partir de las proporciones se realizaron los ajustes necesarios para la utilización de los materiales descritos. Una vez obtenidas las curvas granulométricas de los áridos, fue posible llevar a cabo

los ajustes granulométricos para la dosificación. Finalmente se realizaron probetas para determinar su resistencia a compresión (según se describe en la metodología de ensayo) y conocer así las diferencias mejoras y propiedades que puede aportar cada uno de los aditivos utilizados.

3. RESULTADOS

3.1. ENSAYOS CON ADITIVOS EN LA PASTA DE MORTERO

Los resultados de los ensayos realizados en la pasta de mortero se incluyen a continuación en la Tabla 4.

3.1.1. Mesa de sacudidas

En la tabla 4.1. se muestran los resultados del ensayo de la mesa de sacudidas.

El mayor diámetro (28 cm) se obtiene con los aditivos de cadena corta (ANAX XT y ANAX WX), lo que aporta mayor fluidez a las pastas y menor consistencia.

3.1.2. Cono de Marsh

En la Tabla 4.2. se recoge el tiempo de escurrimiento estabilizado de las pastas de cemento todas ellas con una adición del 1,2%.

Los resultados muestran que los aditivos de cadena larga: (Viscocrete de Sika y MapeiDynamon-SX), tienen mayor tiempo de escurrimiento que los de cadena corta (TecadAnax-XT y TecadAnax-WX).

3.1.3. Porosímetro

En la tabla 4.3 se muestran los resultados del ensayo del porosímetro.

El mayor volumen de oclusión se produce en los aditivos de cadena larga. Respecto del porcentaje más elevado (4.5% aditivo de cadena larga MAPEI DYNAMON-SX), los aditivos de cadena corta ocluyen un menor porcentaje, concretamente un 30% (TECAD ANAX-XT) y un 15% (TECAD ANAX-WX).

La Norma [38] establece como límite recomendado un 4% de aire ocluido, ya que se puede ver afectada la resistencia en el uso de dicho hormigón. En este caso excepto el aditivo MapeiDynamon-SX (cadena larga) todos los demás se encuentran dentro del límite establecido.

3.2. ENSAYOS PARA EL USO DEL HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE

Los resultados de los ensayos realizados en el hormigón autocompactante se incluyen a continuación en las Tablas 5, 6 y 7.

3.2.1. Cono de Abrams

En la Tabla 5 se muestran los resultados del ensayo de Cono de Abrams para los aditivos estudiados.

Puesto que [2] establece un límite comprendido entre 65 cm y 80 cm en el diámetro de un HAC para éste tipo de ensayo todos los aditivos son válidos al encontrarse dentro de las limitaciones establecidas.

3.2.2. Curva granulométrica

Curva granulométrica con adición

Después de ajustar la curva granulométrica y obtener su dosificación óptima, siendo esta la que más se aproxima a la curva de origen de Bolomey, los porcentajes de los áridos utilizados han sido:

- Arena 1 + adición >> 10 %
- Arena 2 >> 20 %
- Grava 1 >> 35 %
- Grava 2 >> 35 %

	Aditivo	Relación A/C	Dosificación (%)	Diámetro (cm)	Std.
4ª generación Cadena larga	VISCOCRETE DE SIKA	0,5	1,2	27	1,0
	MAPEI DYNAMON-SX	0,5	1,2	26	0,58
4ª generación Cadena corta	TECAD ANAX-XT	0,5	1,2	28	0,51
	TECAD ANAX-WX	0,5	1,2	28	0,58

Tabla 4.1: Resultados promedio y desviación estándar del ensayo de mesa de sacudidas
Diámetro de torta para aditivos de 4ª generación

	Aditivo	Relación A/C	Dosificación (%)	Tº escurrimiento (s)	Std.
4ª generación Cadena larga	VISCOCRETE DE SIKA	0,5	1,2	20	0,5
	MAPEI DYNAMON-SX	0,5	1,2	23	0,58
4ª generación Cadena corta	TECAD ANAX-XT	0,5	1,2	18	0,29
	TECAD ANAX-WX	0,5	1,2	18	0,50

Tabla 4.2: Resultados promedio y desviación estándar del ensayo de tiempo de escurrimiento del cono de Marsh para la dosificación óptima de aditivo

	Aditivo % de poros	Dosificación (%)	Peso total pasta (gr)	Oclusión de aire (%)	Std.
4ª generación Cadena larga	VISCOCRETE DE SIKA	1,2	2.390	4.0	0,36
	MAPEI DYNAMON-SX	1,2	2.365	4.5	0,29
4ª generación Cadena corta	TECAD ANAX-XT	1,2	2.403	3.1	0,40
	TECAD ANAX-WX	1,2	2.396	3.8	0,21

Tabla 4.3: Resultados promedio y desviación estándar del ensayo con porosímetro (% aire ocluido) según el tipo de aditivo y peso de la muestra

	Aditivo % de poros	Dosificación (%)	Torta (cm)
4ª generación Cadena larga	VISCOCRETE DE SIKA	1,2	65
	MAPEI DYNAMON-SX	1,2	66
4ª generación Cadena corta	TECAD ANAX-XT	1,2	65
	TECAD ANAX-WX	1,2	65

Tabla 5: Resultados del ensayo con el Cono de Abrams

4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

4.1. DISCUSIÓN

Tal y como se aprecia en los resultados de los ensayos realizados en las pastas de mortero (Tabla 4), los aditivos de cadena larga aportan mayor fluidez a las pastas a lo que se une un menor porcentaje de aire ocluido y menor tiempo de escurrimiento, lo que proporcionará al hormigón mayor trabajabilidad.

En relación con el porcentaje de aire ocluido [24] indica que el comportamiento de un hormigón cuyo porcentaje sea <5% ofrece un material resistente al hielo/deshielo, ya que un mayor contenido puede producir un aumento de la resiliencia. Los aditivos utilizados en la presente investigación garantizan el correcto comportamiento ante esas condiciones.

Tras observar los resultados obtenidos en el ensayo de rotura a compresión y para las mismas condiciones de ensayo y dosificación, todos los aditivos cumplen con las condiciones de resistencia establecidas en el diseño (52,5 MPa), pasados los 28 días desde su vertido, por lo que inicialmente no es descartable ningún aditivo.

Respecto de la inclusión de la adición en los HAC diseñados, destaca como hecho diferencial, el comportamiento de estos en función de la inclusión de adición o no. Concretamente y coincidiendo con [16], [18], [39], su inclusión supone el aumento de resistencia en hormigones de la misma consistencia, siempre que se utilice el aditivo especificado y la dosificación correcta.

Analizado el resultado se confirma que el comportamiento para el porcentaje de adición utilizado en la presente investigación, 10% confirmando así los resultados de investigaciones similares, en las que no se recomienda el uso de porcentajes superiores al 35%, tal es el caso de [16], [40].

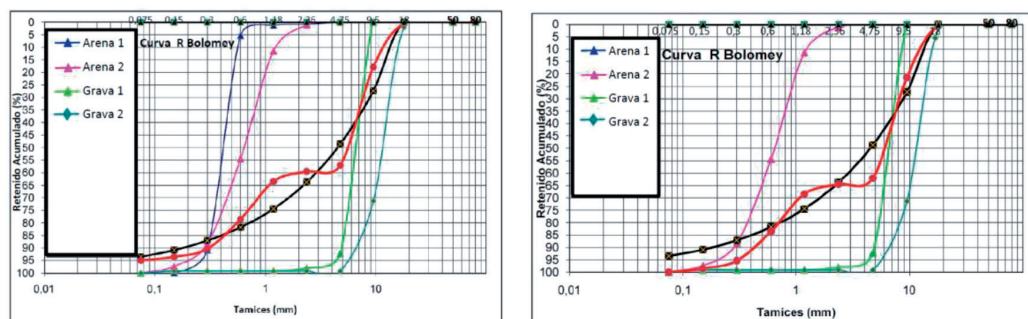


Fig. 1: Curva granulométrica con adición ajustada por Bolomey. Distribución de tamaño de partícula de los agregados utilizados en los hormigones diseñados. Izquierda: con adición. Derecha: sin adición

Curva granulométrica sin adición

Después del ajuste de la curva granulométrica, la dosificación óptima, siendo la que más se aproxima a la curva de origen de Bolomey, fue de:

- Arena 1 >> 0%
- Arena 2 >> 35 %
- Grava 1 >> 35 %
- Grava 2 >> 30 %

En la Figura 1 se muestran las curvas de los distintos agregados utilizados, según indica la leyenda de colores, para aproximarse a la curva de Bolomey (curva color negro).

3.2.3. Rotura de probetas a compresión

En las Tablas 6 y 7 se recogen los resultados de la rotura del ensayo a compresión de las probetas para los 4 aditivos ensayados, con adición y sin adición.

4.2. CONCLUSIONES

Se demuestra que las proporciones de las pastas y mezclas satisfacen los requisitos de rendimiento para el hormigón fresco, así como el requisito de rendimiento establecido inicialmente para el hormigón endurecido, confirmando la utilidad de los aditivos y la necesidad de utilización de estos para la obtención de mejores resultados, así como las diferencias que resultan de la utilización de cada uno de ellos (cadena corta y cadena larga).

Los objetivos propuestos han obtenido respuesta en los resultados presentados tras el desarrollo de una metodología experimental que ha permitido evaluar el comportamiento de los HAC con el uso de superplastificantes de 4ª generación y la inclusión de adición mineral en dosificaciones concretas, permitiendo la sustitución de esta por árido fino, eliminando una mayor segregación.

Tras los ensayos realizados y los materiales utilizados, se puede confirmar que en el caso de los hormigones realizados con adición y con las mismas dosificaciones, empleando aditivos poliméricos de cadena larga, ofrecen una menor resistencia mecánica como consecuencia del aumento de la viscosidad de dichos hormigones y por lo tanto presentan una peor compactación.

Partiendo de la misma dosificación de aditivos sometidos a ensayo, dos de cadena corta y dos de cadena larga se confirma que los aditivos de cadena corta ofrecen mejores resultados tanto por su comportamiento y condiciones de puesta en obra, como por los resultados obtenidos en su capacidad resistente, siendo mayores inclusive con la presencia de adición en la mezcla, para el porcentaje utilizado en la presente investigación.

Finalmente indicar que a pesar de la similitud de los resultados obtenidos en el presente estudio y la necesidad del empleo de una correcta curva granulométrica para la formulación de dichos hormigones, se destaca que en la fabricación con aditivos superplastificantes sintéticos de 4ª generación, con adición de humo de sílice, los de cadena corta obtienen un mejor rendimiento de las mezclas para este tipo de hormigones.

REFERENCIAS

[1] EFNARC. (2002). Specification and Guidelines for Self compacting Concrete. EFNARC, Farnham, Reino Unido.

[2] Okamura, H., Ouchi, M. "Self-Compacting Concrete". *Journal of Advanced Concrete Technology*. 2003. Vol. 1-1, p. 5-15.

[3] Vargas Salazar, R.; Sciaraffia Pérez, R. "Diseño y evaluación de hormigones autocompactantes (HAC). Design and evaluation of Self-consolidating Concrete (SCC)". *Revista Ingeniería de Construcción*. 2006 Vol. 21-1, Abril de 2006 www.ing.puc.cl/ric 57

[4] ACHE (2008). Monografía nº 13. Hormigón autocompactante: Diseño y aplicación. ACHE, Madrid, España.

[5] España. Instrucción Española de Hormigón Estructural (EHE-08). Anejo 17 de recomendaciones para el hormigón autocompactante.

[6] Gaywala, D. B Rajiwala. "Self compacting concrete: a concrete of next decade 1N R.". *Journal of Engineering Research and Studies*. 2011. Vol. II-IV/October-December, p. 213-218.

[7] Savaris, G., Pinto, R.C.A.. "Influence of coarse aggregate on shear resistance of self-consolidating concrete beams". 2017. *Rev. IBRACON Estrut. Mater.* vol.10-1 São Paulo Jan./Feb. 2017. <https://doi.org/10.1590/s1983-41952017000100003>

[8] Rakesh Kumar, D. "Self-Compacted Concrete Mix Design and its Comparison with Conventional Concrete (M-40)". 2015. *Journal Civil & Environmental Engineering* Vol 5-3.176. doi: <http://dx.doi.org/10.4172/2165-784X.1000176>

[9] Vilanova, A. "Cementos para elaborar hormigón autocompactante. Primeras aplicaciones de hormigón autocompactante en el mundo. Origen del hormigón autocompactante". 2015. Blog Tecnología Hormigón. Recuperado de: http://tecnologiahormigon.blogspot.com.es/2015_07_01_archive.html

[10] Seddik, A., Beroual, A., Zergua, A., Nacer, M. "Self Compacting Concrete Under Local Conditions". Constantine 1 University, Constantine, Algeria. *Scientific Research*. 2013. Recuperado de: <http://www.scirp.org/journal/33064.html>

[11] Uysal, M., Tanyildizi, H. "Predicting the core compressive strength of self-compacting concrete (SCC) mixtures with mineral additives using artificial neural network". 2011. *Construction and Building Materials* 25, p. 4105-4111.

[12] Mansoor, J., Raheel Shah, M., Muneer Khan, A. Naveed Sadiq, M. Kashif Anwar, Usman Siddiq, M., Ahmad, H. "Analysis of Mechanical Properties of Self Compacted Concrete by Partial Replacement of Cement with Industrial Wastes under Elevated Temperature". 2018. *Applie Sciences*, 8-364; doi: <http://dx.doi.org/10.3390/app8030364>

[13] Rampradheep G S, Sivaraja, M. "Experimental Investigation on Self-Compacting Self-Curing Concrete Incorporated with the Light Weight Aggregates". 2016. *Brazilian Archives Of Biology And Technology. An International Journal*. 59:Spec Iss 2. e16161075, January-December 2016 <http://dx.doi.org/10.1590/1678-4324-2016161075>.

[14] Mawo, N.S., Richard O. Onchiri, R.O., Shitote, S.M. "Performance of self-compacting concrete made with hydraulic lime as filler". 2017. *Journal of Civil Engineering and Construction Technology*. Vol. 8-3, p. 20-25. DOI: <http://dx.doi.org/10.5897/JCECT2016.0425>

[15] Nepomuceno, M., Oliveira, L., Lopes, S.M.R. "Methodology for mix design of the mortar phase of self-compacting concrete using different mineral additions in binary blends of powders". 2012. *Construction Building Materials*, 26, p. 317-326.

[16] Tang P., Brouwers, H.J.H. "The durability and environmental properties of self-compacting concrete incorporating cold bonded lightweight aggregates produced form combined industrial solid wastes". 2018. *Construction and Building Materials*, 167, p. 271-285.

[17] 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". 2017. *Materials*, Vol. 10, 904.

[18] Pereira P., Evangelista L, De Brito J. 2012. "The effect of superplasticizers on the mechanical performance of concrete made with fine recycled concrete aggregates". 2012. *Cement & Concrete Composites*. Vol. 34, p. 1044-1052.

[19] Siddique R., Kunal (2015) "Design and development of self-compacting concrete made with coal bottom ash". 2015. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, Vol. 4:3-4, p. 225-237, DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/21650373.2015.1004138>

[20] Siddique R., Aggarwal P. & Aggarwal Y. (2012) "Mechanical and durability properties of self-compacting concrete containing fly ash and bottom ash". 2012. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, Vol. 1:3, p. 67-82, DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/21650373.2012.726820>

[21] Raj, J. Rex Dhivakar Arockia; Arunachalam, K.; Mohandas, K. (2018). "Self Compacting Concrete with Copper Slag as Partial Substitute for Sand". 2018. *Journal of Computational and Theoretical Nanoscience*. Vol. 15-3, p. 977-981(5). DOI: <https://doi.org/10.1166/jctn.2018.7186>

[22] AENOR. UNE-EN 197-1:2011. Cemento. Parte 1: Composición, especificaciones y criterios de conformidad de los cementos comunes.

[23] AENOR. UNE-EN 1008:2007. Agua de amasado para hormigón.

[24] Hirschi, T., Knauber, H.; Lanz, M.; Schlumpf, J.; Schrabback, J.; Spirig, C.; U. Waeber, U. (2010). *Sika Manual del Hormigón*. Sika SAU. Ed. GRÁFICAS COUCHÉ, S.L. Madrid. España.

[25] <https://www.emasagra.es/control-calidad-del-agua>

[26] AENOR. UNE-EN 12620:2003+A1:2009. Áridos para hormigón.

[27] AENOR. UNE-EN 13263-1:2006+A1:2009. Humo de sílice para hormigón. Parte 1: Definiciones, requisitos y criterios de conformidad.

[28] AENOR. UNE - EN 934-2: 2010 + A1: 2012 Aditivos para hormigón, morteros y pastas - Parte 1: definiciones, requisitos y conformidad. Madrid, 2010.

[29] AENOR UNE-EN 933-2/1M: 1999. Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 2: Determinación de la granulometría de las partículas. Tamices de ensayo, tamaño nominal de las aberturas.

[30] AENOR UNE-EN 1097-3:1999. Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 3: Determinación de la densidad aparente y la porosidad.

[31] AENOR UNE-EN 1097-6:2014. Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 6: Determinación de la densidad de partículas y la absorción de agua.

[32] AENOR UNE EN 12350-5. Ensayos de hormigón fresco. Parte 5: Ensayo de la mesa de sacudidas.

[33] AENOR UNE-EN 445:2009. Lechadas para tendones de pretensado. Métodos de ensayo.

[34] ASTM C138/C138M-09. Historical Standard: Método de Ensayo Normalizado de Densidad (Peso Unitario), Rendimiento, y Contenido de Aire (Gravimétrico) del Concreto

[35] RILEM TC 188 - CSC. (2006). *Casting of Self Compacting Concrete - Final Report of RILEM TC*. Edited by: Skarendahl, A., Billberg, P.

[36] AENOR UNE 83-313-90. Ensayo de la consistencia del hormigón. Mediante el Cono de Abrams.

[37] AENOR UNE-EN 12390-3:2009. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 3: Determinación de la resistencia a compresión de probetas.

[38] AENOR UNE-EN 12350-7:2010. Ensayos de hormigón fresco. Parte 7: Determinación del contenido de aire. Métodos de presión.

[39] Youngsu Shin; Kyuhun Kim; Soowon Cha (2013). "Combined effects of recycled aggregate and fly ash towards concrete sustainability". 2013. *Construction and Building Materials*. Vol. 48, p. 499-507. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.07.014>

[40] Bharath, E.; Prakash, P.; Srishaila, J. M.; Prema Kumar Woody Puttiah. (2015). "Effect of Partial Replacement of Cement in Self-Compacting Concrete by Fly Ash and Metakaolin". 2015. *International Journal of Engineering and Technical Research* Vol. 4-07. DOI: <http://dx.doi.org/10.17577/jjertv4is070346>.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece la colaboración especial del laboratorio "Technologie Adjuvants" de Rabat por poner a disposición de la presente investigación todo el material y su equipo técnico y al grupo Nextgen. Igualmente se agradece a los revisores que evaluaron el artículo en versión anterior.