

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

Valencia, 5 y 6 de Marzo de 2018

## Diseño de mezclas de hormigones autocompactantes con alto contenido de adiciones minerales y áridos de diferentes naturaleza para desempeño en ambientes altamente agresivos

J. Puentes <sup>(1)</sup>, J.L. García Calvo <sup>(1)</sup> y M.C. Alonso <sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup> Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja (IETcc-CSIC), España.

DOI: <http://dx.doi.org/10.4995/HAC2018.2018.6324>

### RESUMEN

El presente estudio se centra en el desarrollo de dosificaciones de hormigones autocompactantes (HAC) para ser empleados en la construcción de infraestructuras de almacenamiento de energía térmica. En el estudio se han considerado tres aspectos básicos: 1) selección del cemento óptimo (Binario con 50% escorias de alto horno y ternario con 20% de escorias de alto horno y 20% de cenizas volantes), 2) áridos de altas prestaciones térmicas: calizo, basáltico y Clinker de cemento, y 3) combinación de aditivos para mejorar las características de trabajabilidad, fluidez y tiempo abierto. El diseño de los hormigones se ha realizado en dos etapas: i) utilizando el método de morteros equivalentes, ii) HAC de altas prestaciones térmicas. Se ha establecido el método de morteros equivalentes como una herramienta de apoyo en la fase preliminar del estudio, en el desarrollo del hormigón. La compatibilidad de los diferentes tipos de aditivos con los cementos binarios y ternarios con alto contenido en adiciones minerales ha sido comprobada en los morteros equivalentes. Siempre la cantidad del aditivo superplastificante / Reductor de agua (SP/RA) es menor que el aditivo para mejorar la trabajabilidad (SP/T) y complementado con la Nano-sílice (NS) usada además como modulador de viscosidad. El árido basáltico mejora la fluidez, aumenta la densidad y resistencia, pero complica la trabajabilidad. El árido calizo aporta docilidad y baja la densidad. El árido de clinker mejora la trabajabilidad y aumenta la densidad. El filler calizo (FC) mejora la compacidad aunque en detrimento de las resistencias.

**PALABRAS CLAVE:** Microestructura, Adiciones minerales, ambientes agresivos, Materiales cementicios suplementarios.

### 1.- INTRODUCCIÓN

El aumento en el uso del hormigón autocompactante (HAC) se debe a las prestaciones que este tipo de material ofrece en la puesta en servicio. Los avances en el desarrollo con HAC están dirigidos también a mejorar en la sostenibilidad del proceso de construcción promoviendo el uso de aglomerantes con adiciones minerales (AM) y filler, con el fin de

reducir el contenido total de cemento y las emisiones de CO<sub>2</sub> asociadas a su producción. Respecto a sus aplicaciones están, en general, directamente relacionadas con sus propiedades en estado fresco [1], ya que una de las características más interesantes del material a edades tempranas es su trabajabilidad [2]. Se obtiene a través de la incorporación de finos que además de producir un efecto de mayor fluidez, desencadena un refinamiento en la microestructura que da como resultado una menor cantidad de poros [3,4]. De esta manera el material ofrece una mayor durabilidad frente a las agresiones externas como consecuencia de la red de poros que comunican el exterior con el interior [5]. Por lo tanto, su uso no se limita a los escenarios habituales, sino también a entornos con condiciones de funcionamiento severas como es el caso de las infraestructuras de transporte de energía, a menudo ubicadas en lugares remotos y extremos

De manera paralela, las aplicaciones y uso de este tipo de hormigones se han visto incrementadas gracias a poder mantener la capacidad autonivelante sin segregación, junto a otros requisitos adicionales, además de poder cumplir con los requisitos específicos al material. Como consecuencia de estas circunstancias el hormigón HAC combina las características de un Hormigón de Altas prestaciones y autocompactante [6].

El objeto del estudio propuesto ejemplifica la capacidad del HAC para ser aplicado en condiciones ambientales e infraestructuras especiales. Uno de los posibles usos es la utilización para infraestructuras de almacenamiento de energía térmica en centrales termosolares, que han de soportar ciclos térmicos a altas temperaturas [7,8]. El trabajo está enmarcado dentro del Proyecto Europeo LORCENIS [9]. Específicamente se busca diseñar mezclas de hormigón que tengan prestaciones de autocompactabilidad en estado fresco y con altas prestaciones termoestables en condiciones de servicio a partir de mezclas de diferentes tipos de cemento y áridos seleccionados por sus altas prestaciones de estabilidad frente a los cambios de temperatura. Ser capaces de soportar temperaturas superiores a los 500°C [10] durante largos periodos de servicio. El hormigón que se desea diseñar se espera que cumpla las siguientes características: resistencias mecánicas a compresión superior a los 40 MPa y valores de densidad entre 2300 y 2700 kg/m<sup>3</sup>. Mantener propiedades de autocompactabilidad y fluidez superiores a 30 min.

## **2.- MATERIALES y METODOS**

Los materiales de partida se han escogido en función de dos parámetros, estando el primero de ellos relacionado con un comportamiento térmico óptimo. El segundo obedece a la compatibilidad entre el cemento, adiciones minerales (AM), los áridos y los aditivos químicos necesarios para lograr la autocompactabilidad de las mezclas. Los ensayos preliminares se han realizado a partir del diseño de morteros equivalentes, es decir empleando las arenas con la granulometría controlada para emplear posteriormente en el desarrollo de los hormigones [11]. Bajo condiciones de fatiga térmica, la estabilidad química y física de los áridos es fundamental. Por ello, teniendo en cuenta la bibliografía existente, se preseleccionaron áridos que pudieran cumplir los requisitos solicitados. Se estableció el uso de áridos con una composición química de elementos que pudieran mejorar la capacidad calorífica y el calor específico aportados en el resultado final del

hormigón [12,13]. Se buscaron, por tanto, áridos y materiales cementantes con propiedades térmicas. Teniendo en cuenta que el contenido del árido supone entre un 50 y 60% del total de materiales en peso del hormigón, por lo que influye de manera significativa en las propiedades termo-físicas finales [14]. El tamaño máximo del árido utilizado fue de 12 mm por considerarlo el más adecuado para producir un HAC con los requisitos solicitados [10].

Dentro de los áridos para hormigón se ha establecido un mejor comportamiento de los áridos de origen calizo por encima de los áridos de origen silíceo, y de los dolomíticos o basálticos frente a los anteriores [7]. En el presente estudio se utilizaron áridos de naturaleza basáltica tamaño 0-4 mm y 6-12 mm. Este tipo de áridos al tener un coeficiente de dilatación térmica bajo, junto a una buena conducción térmica, buena resistencia al fuego (estabilidad volumétrica), buena impermeabilidad y alta densidad, han sido considerados para aportar las características solicitadas al hormigón final [14]. Adicionalmente se propuso el uso de clinker como árido [14], suministrado por la empresa Dyckerhoff. También se consideró la incorporación de árido calizo, suficientemente estudiado e identificada su temperatura de degradación [7]. El árido calizo contribuye a complementar la docilidad de la mezcla equilibrándola. Se han escogido finalmente tres tipos de áridos, un calizo (CA), un basalto (BA) y árido clinker (CK), y se han realizado ensayos de compatibilidad y comportamiento para establecer la viabilidad de cada una de las mezclas.

Los aditivos usados han sido una combinación de un superplastificante de alto rendimiento (SP/RA), Sika Viscocrete-20HE, junto con un superplastificante que mantiene la trabajabilidad Sika Viscoflow 3100 (SP/T). Para mejorar la cohesión interna se utilizó un aditivo con, nanosilica en suspensión acuosa que además funciona como aditivo modulador de la viscosidad, Sikatell 250 (NS).

Se han considerado dos tipos de conglomerantes. 1) cemento tipo III/52.5 HS/NA, con 50% de escorias de alto horno (BFS) y, 2) cemento tipo II/ 52.5 B-S, también con 20% escoria, al que se adicionaron cenizas Volantes (CV) en un 20% en peso del cemento. Los cementos usados fueron también aportados por la empresa Dyckerhoff. Para aumentar la cantidad de finos en las mezclas de hormigón se utilizó un FC con un 99% de pureza.

Los ensayos para caracterizar las muestras, determinando los parámetros de control del hormigón son ensayos de consistencia y en relación con el mantenimiento en el tiempo, aire ocluido, densidad en estado fresco. Para el estado endurecido, se han establecido inicialmente ensayos de resistencia, densidad, porosidad abierta.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los primeros diseños se realizaron en morteros equivalentes para, posteriormente, seleccionar las mezclas más adecuadas y pasar al diseño de los hormigones. En la Tabla 1 se presentan algunas de las dosificaciones más representativas en el desarrollo de los morteros equivalentes. Como se puede apreciar se ha analizado tanto el comportamiento aislado de cada árido como de mezclas binarias y ternarias de áridos. Las mezclas incluían

## Diseño de mezclas de hormigones autocompactantes con alto contenido de adiciones...

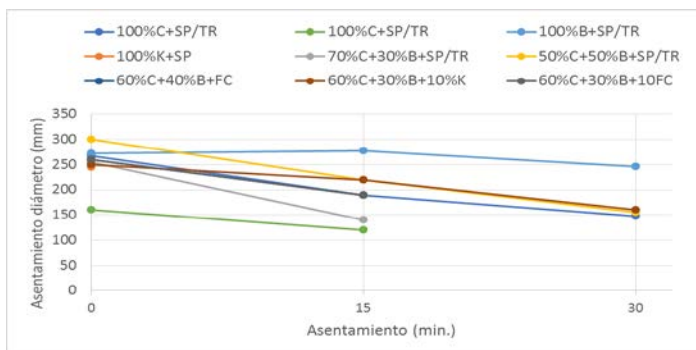
HAC2018 | V Congreso Iberoamericano de Hormigón Autocompactante y Hormigones Especiales

los aditivos con las variaciones buscando la compatibilidad y mantenimiento de propiedades.

**Tabla 1.** Diseño de morteros

Composición. Kg/m <sup>3</sup>	100%CA	100%BA	100%CK	70%CA+30%BA	50%CA/BA	100%CA + NS
CEM III/A 52.5 HS/NA	760	800	800	780	780	760
Calizo (0-6mm)	1330	-	-	918	655	1329
Basalto (0-6mm)	-	1465	-	415	692	-
Clinker (0-6mm)	-	-	1385	-	-	-
w/b	0.25	0.31	0.26	0.30	0.30	0.32
Aditivo.SP/RA(%)	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
Aditivo. SP/T(%)	0.8	0.8	-	0.8	0.8	0.8
Aditivo. NS(%)	-	-	-	-	-	2.5
Cono: 0/15/30min (mm)	267.5	272.5	245	255.0	>300	160.0
	190.0	277.0	-	140.0	220	120.0
	147.5	246.5	-	-	155	-
Dens.(kg/m <sup>3</sup> )	2180	-	-	-	-	2160
Poros. Abierta. (%)	11.91	-	-	-	-	11.29
f <sub>ck</sub> 7d(MPa)	97.3	128.3	124.0	110.2	108.8	96.4

Como aspectos a destacar el árido basáltico (BA) presentó un problema de mezclado por su naturaleza y forma, sin embargo se observó que aporta a la consistencia el comportamiento esperado. Como último punto del proceso de diseño fue el efecto de la adición de FC para modificar la trabajabilidad, buscando un aumento de finos para lograr un HAC [15], adicionalmente se ha estudiado el efecto de disminución de la resistencia.



**Figura 1.** Resultados de la variación de la consistencia a 0 min, 15 min y 30 min de las dosificaciones de mortero estudiadas.

Durante esta etapa se han realizado las variaciones en los aditivos, el objetivo fue obtener un HAC que mantuviera la trabajabilidad durante más de 30 minutos. Los resultados de los ensayos se observan en la figura 1, el árido basáltico mantiene la fluidez por tiempos más prolongados, frente al calizo (CA) que la pierde más fácilmente y el menos óptimo es el árido de clinker. Para mantener la trabajabilidad y la docilidad de las mezclas con cada tipo de árido se optó por realizar mezclas de ellos haciendo mezclas binarias y ternarias de áridos. En la tabla 2 se recogen las dosificaciones óptimas con mezclas de áridos ternarios y cemento binario con adición de 50% de escorias de alto horno. Con todas las mezclas se consiguen valores que cumplan las prestaciones mecánicas en la tabla 3. Se confirma una pérdida de resistencia al reemplazar con FC hasta un 30% de cemento, para aumentar el contenido en finos y reducir el consumo de cemento. En las dosificaciones de las mezclas con los tres tipos de áridos y FC no se mantienen las medidas de consistencia en comparación con la que no tiene filler, pero el uso del FC es necesario aportando otras propiedades a la mezcla.

**Tabla 2.** Diseño de morteros equivalentes con tres tipos de áridos y filler calizo.

Composición. Kg/m <sup>3</sup>	60%Cal+30%bas +10%k	60%Cal+30%bas +10%k+filler	60%Cal+40%bas +filler
CEM III/A 52.5 HS/NA	780	546	546
Filler calizo	-	234	234
Calizo (0-6mm)	800	800	918
Basalto (0-6mm)	400	400	415
Clinker (0-6mm)	133	133	-
w/b	0.3	0.43	0.43
Aditivo. SP/RA(%)	0.8	0.8	0.8
Aditivo. SP/T(%)	0.8	0.8	0.8

Se ha establecido la eficacia de los aditivos en estado fresco como la reducción de agua y el aumento de la fluidez. También se ha podido comprobar la compatibilidad entre ellos. Los resultados de la cantidad de aditivo incorporada en los morteros equivalentes, fue la base de referencia y punto de partida para las primeras dosificaciones de hormigón.

**Tabla 3.** Propiedades de morteros equivalentes AC con tres tipos de áridos y filler calizo.

	60%Cal+30%bas +10%k	60%Cal+30%bas +10%k+filler	60%Cal+40%bas +filler
Cono: 0/15/30min (mm)	250	260	260
	220	190	190
	160	-	-
Densidad(kg/m <sup>3</sup> )	2312	2225	2274
Porosidad Abierta. (%)	5.5	7.4	7.0
f <sub>ck</sub> C 7days(MPa)	120	96	79

Se establecieron unas dosificaciones teóricas de HAC a partir de la siguiente dosificación: cemento 10%, agua 18%, Aire 2%, Finos 8%, Áridos finos 26% y Áridos gruesos 36%. Partiendo de la combinación estudiada en morteros equivalentes de 60% calizo, 30% basáltico y 10% de clinker más el FC. A partir de esta composición se realizaron las primeras dosificaciones de HAC. Se incluyeron los diferentes tamaños de árido y las proporciones de los componentes. Con los áridos calizo y basáltico se realizó una combinación de cada uno de estos con los dos tamaños disponibles, 0-6 mm y 6-12mm. Esta combinación de los porcentajes fue variando en función de los resultados obtenidos en la evaluación de las propiedades. En la tabla 4 se muestran algunas de las dosificaciones más relevantes y las diferentes composiciones con los porcentajes de las diferentes naturalezas de áridos. En la tabla 5 se incorporan los resultados de algunas de las propiedades de referencia del hormigón. Se ha escogido el ensayo J-ring por considerarlo el que puede evaluar el escurrimiento, el tiempo de flujo y el coeficiente de bloqueo al mismo tiempo. Basados en los resultados de propiedades en estado fresco, se realizaron cambios en la dosificación. Se buscaba como objetivo las características de autonivelante sin segregación por encima de un diámetro de 620 mm en J-ring. Para los resultados de resistencia no se consideró un problema alcanzar la resistencia característica de 40 Mpa, según los datos obtenidos durante el desarrollo del estudio.

Ante la falta de cohesión de las mezclas se incorporó un aditivo con contenido en Nano-sílice en dispersión coloidal, con la función de refinar la microestructura y cohesionar la mezcla en estado fresco [16]. En algunos casos para establecer una mejora en las propiedades de trabajabilidad se varió el porcentaje de los aditivos superplastificante en función de las propiedades en estado fresco. De acuerdo con los resultados, se consideró mejor para la mezcla que el porcentaje de SP/RA estuviera por debajo del aditivo SP/T.

**Tabla 4. Dosificaciones de HAC estudiadas.**

<i>Tipo/descr.</i> <i>Kg/m<sup>3</sup></i>	<i>50c/5</i> <i>0b (1)</i>	<i>50c/50</i> <i>b (2)</i>	<i>70c/30</i> <i>b (1)</i>	<i>70c/30</i> <i>b (2)</i>	<i>70c/30b</i> <i>(3)</i>	<i>70c/30b/10</i> <i>k (1)</i>	<i>60c/30b/10</i> <i>k (2)</i>
CEM III/A 52.5 HS/NA (kg/m <sup>3</sup> )	400	440	440	440	450	440	450
Filler calizo (kg/m <sup>3</sup> )	150	200	200	200	157	200	157
Calizo (0-6mm) (kg/m <sup>3</sup> )	385	372	424	373	466	391	465
Basalto (0-6mm) (kg/m <sup>3</sup> )	404	364	308	296	389	183	212
Clinker (0-4mm) (kg/m <sup>3</sup> )	-	-	-	-	-	165	191
Calizo (6-12 mm) (kg/m <sup>3</sup> )	487	414	464	625	531	625	531
Basalto (6-12 mm)	515	411	334	356	315	356	315
w/b	0.41	0.41	0.39	0.38	0.38	0.37	0.39
Aditivo.SP/RA(%)	1.5	1.5	1.5	1.3	1	1.3	1
Aditivo. SP/T(%)	1.5	1.5	1.5	1.2	1.2	1.2	1.4
Aditivo. NS(%)	1	1	1	1	1	1	1

**Tabla 5. Propiedades de los HAC evaluados**

	50c/50b (1)	50c/50b (2)	70c/30b (1)	70c/30b (2)	70c/30b (3)	70c/30b/10k (1)	60c/30b/10k (2)
J-ring SFJ (mm)	360	-	665	580	530	635	
J-ring t500J (s)	-	-	8.70	8.25	13	12	
J-ring Final PJ (mm)	30	-	-	25	20	20	
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	-	2340	-	2400	-	2451	
Porosidad abierta. (%)	-	12.4	-	5.2	-	6.2	-
fckC 7días (MPa)	-/-	-/58	-/45	47/-	-/64	38/-	-/67

Como se observa en la tabla 5, la trabajabilidad y fluidez de la mezcla de hormigón se vio comprometida con el uso exclusivo de árido basáltico. Los resultados de mezclas binarias (Calizo y Basalto) y las ternarias cumplen algunos de los parámetros, sin embargo el tiempo de flujo es muy lento. La densidad y la disminución de la porosidad abierta y la resistencia mejoran cuando se realiza la mezcla de 60%C, 30%B y 10%K, y es la que ofrece el mejor diámetro de medida de fluidez sin segregación ni bloqueo. La resistencia a compresión de las mezclas ternarias con árido basáltico, árido calizo y Clinker a 7 días es la más elevada. Una vez que se ha establecido una mezcla de referencia se han realizado los ensayos con el segundo tipo de cemento y cenizas volantes (CV). Se han obtenido dos dosificaciones de referencia de un hormigón autocompactante que cumple con las características planteadas en el objetivo del estudio. En la tabla 6, se incluye las mezclas óptimas, además de sus propiedades de autocompactabilidad para una mezcla ternaria de áridos. La composición más óptima de porcentaje de áridos fue de 60%Calizo, 30%Basalto y 10%Clinker junto a la incorporación de FC y en el caso del S3b2 con CV.

Las propiedades físicas de los áridos, tipo, forma, densidad, pueden ser compensadas a la hora de dar características de autocompactabilidad a las mezclas de hormigón a través de los aditivos y adiciones utilizadas. Aunque el árido basáltico y el árido de clinker que aporta prestaciones de estabilidad térmica al hormigón son las que más dificultan a la fluidez y a la docilidad del material, se pueden compensar con otros áridos y adiciones sin renunciar a las propiedades autocompactantes en estado fresco. La docilidad del hormigón se puede equilibrar con un aumento en la cantidad de los áridos finos además del uso de FC. El aumento en la trabajabilidad y fluidez de la mezcla se compensó con el uso de la nanosilice que funcionó como modulador de la viscosidad. Al mismo tiempo refinó la pasta y complementó las propiedades de fluidez y consistencia, aptas para su aplicación. Los estudios a través de morteros equivalentes permitieron evaluar de manera sistemática y económica la combinación de diferentes tipos de adiciones y áridos con mezclas de aditivos para hormigones especiales con prestaciones autocompactantes.

**Tabla 6.** Dosificación y propiedades de resultados finales de HAC con diferentes tipos de cemento, aditivos y tres tipos de áridos

Tipo / descripción	S3b1 CEM III (60c/30b/10k) (kg/m <sup>3</sup> )	S3b2: CEMII+FA (60c/30b/10k) (kg/m <sup>3</sup> )
CEM III/A 52.5 HS/NA (kg/m <sup>3</sup> )	450	-
CEM II/B-S 52.5 (kg/m <sup>3</sup> )	-	319
CV (kg/m <sup>3</sup> ) / %bOPCm	-	130/20
Filler calizo(kg/m <sup>3</sup> )	157	157
Calizo (0-6mm) (kg/m <sup>3</sup> )	465	465
Basalto (0-6mm) (kg/m <sup>3</sup> )	212	212
Clinker (0-4mm) (kg/m <sup>3</sup> )	191	191
A. Calizo (6-12 mm) (kg/m <sup>3</sup> )	531	531
Basalto (6-12 mm)	315	315
w/b	0.39	0.39
Aditivo. SP/RA(%)	1	1
Aditivo. Trabajabilidad (%)	1.5	1.2
Aditivo NS Cohesionate.(%)	0.9	0.9
<i>Propiedades</i>		
J-ring SFJ (mm)	SF1 – 590	SF1-520
J-ring t500J (s)	16	21
J-ring Final PJ (mm)	20	20
Aire ocluido %	2.2	2.5
Densidad (fresco) (kg/m <sup>3</sup> )	2400	2400
fck7/28días (MPa)	83/96	66/84

#### 4.- CONCLUSIONES

Se ha logrado diseñar HACs a partir de cementos con alto contenido en adiciones minerales y FC y con mezclas ternarias de áridos de diferente naturaleza y tamaño de partícula. Conclusiones específicas:

- Se ha establecido el método de morteros equivalentes como una herramienta de apoyo en la fase preliminar del diseño con prestaciones autocompactantes, a partir de componentes no convencionales en el desarrollo de HAC.
- La compatibilidad de los diferentes tipos de aditivos con los cementos binarios y ternarios con alto contenido en adición ha sido fundamental dando como resultado que siempre la cantidad del SP/RA es menor que el aditivo para mejorar la trabajabilidad y complementado con la NS como modulador de viscosidad.
- El árido basáltico mejora la fluidez, aumenta la densidad y resistencia, pero complica la trabajabilidad.



- El árido calizo aporta docilidad y baja la densidad. El clinker mejora la trabajabilidad, aumenta la densidad y mejora la microestructura del hormigón.
- El FC aporta mayor cantidad de pasta mejorando la compacidad aunque en detrimento de la resistencia.

## AGRADECIMIENTOS

Este estudio ha sido financiado parcialmente por el Proyecto **LORCENIS**, Project ID 685445 de la Comisión Europea dentro H2020. Los autores agradecen a la empresa Dyckerhoff por el suministro del cemento usado en este proyecto y a la empresa SIKA en el suministro de los aditivos.

## REFERENCIAS

- [1] Okamura, H., Ouchi, M., 'Self compacting concrete', Journal of Advanced Concrete Technology Vol1 N° 1, 5-15, April (2003).
- [2] Yu, Z., Xie, Y., Liu, X., 'Research and application of self-Compacting Concrete in Second International Symposium on Design', in, 'Performance and Use of SCC'2009'-China, (2009).
- [3] Roziere, E., Granger, S., Turcry, Ph., Loukili, A., 'Influence of paste volume on shrinkage cracking and fracture properties of self-compacting concrete', 'Cement & Concrete Composites 29 (2007) 626–636.
- [4] Hammer TA. 'Cracking susceptibility due to volume changes of selfcompacting concrete', in: Wallevik O, Nielsson I, editors. International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, (2003) 553 – 557.
- [5] Kanellopoulos, A., Petrou, M., Ioannou, I., 'Durability performance of self-compacting concrete', Construction and Building Materials 37 (2012) 320–325
- [6] Scrivener, K., Kirkpatrick, J., 'Innovation in use and research on cementitious material' Cement and Concrete Research 38 (2008) 128–136
- [7] Qianmin M., Rongxin G., Zhiman Z., Zhiwei L., Kecheng H., 'Mechanical properties of concrete at high temperature—A review', In Construction and Building Materials, Volume 93, (2015), 371-383,
- [8] Kizilkanat, A., Yüzer, N., Kabay, N., 'Thermo-physical properties of concrete exposed to high temperature', In Construction and Building Materials, Volume 45, (2013) 157-161
- [9] European Commission :, Long Lasting Reinforced Concrete for Energy Infrastructure under Severe Operating Conditions, CORDIS Cordis.europa.eu, [http://cordis.europa.eu/project/rcn/203252\\_en.html](http://cordis.europa.eu/project/rcn/203252_en.html)
- [10] Alonso, M.C., Vera-Agullo, J., Guerreiro, L., Flor-Laguna, V., Sanchez, M., Collares-Pereira, M., 'Calcium aluminate based cement for concrete to be used as thermal

## **Diseño de mezclas de hormigones autocompactantes con alto contenido de adiciones...**

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

- energy storage in solar thermal electricity plants' *Cement and Concrete Research*, 82, (2016) 74-86.
- [11] Schwartzentruber, A., Catherine, C., 'Method of the concrete equivalent mortar (CEM)—A new tool to design concrete containing admixture'. *Materials and Structures - MATER STRUCT.* 33. (2000) 475-482.
- [12] Xing, Z., Beaucour, A.L., Hebert, R., Noumowe, A., Ledesert, B., 'Aggregate's influence on thermophysical concrete properties at elevated temperature', In *Construction and Building Materials*, Volume 95, (2015) 18-28
- [13] Razafinjato, R.N., Beaucour, A.L., Hebert, R., Ledesert, B., Bodet, R., Noumowe, A., 'High temperature behaviour of a wide petrographic range of siliceous and calcareous aggregates for concretes', In *Construction and Building Materials*, Volume 123, (2016) 261-273
- [14] R.L. Berger, Properties of concrete with cement clinker aggregate, In *Cement and Concrete Research*, Volume 4, Issue 1, 1974, Pages 99-112
- [15] H.J.H. Brouwers, H.J. Radix 'Self-Compacting Concrete: Theoretical and experimental study', *Cement and Concrete Research* 35 (2005) 2116 – 2136
- [16] Qing, Y., Zenan Z., Deyu, K., Rongshen, C., 'Influence of nano-SiO<sub>2</sub> addition on properties of hardened cement paste as compared with silica fume', *Construction and Building Materials* 21 (2007) 539–545