

MÉTODO PARA CUANTIFICAR LA SEGREGACIÓN EN HORMIGONES AUTOCOMPACTANTES

F. Benito¹, C. Parra², M. Valcuende¹, I. Miñano²⁻³ y C. Rodríguez³

RESUMEN

Este trabajo estudia la segregación de hormigones autocompactantes (SCC) con características reológicas similares y que no presentan indicios de segregación en el ensayo de escurrimiento (ASTMC1611). Las características de los áridos influyen en los resultados de los diferentes ensayos para medir la segregación. Cuando la absorción del árido es elevada puede que la mezcla no presente signos de segregación en los ensayos de penetración y análisis visual, pudiendo obtenerse segregación por el método de la columna (Santos *et al.*, 2012). Se utilizan, en parte, áridos de gran absorción (escoria siderúrgica de alto horno) que pueden hacer variar la humedad de la pasta con el paso del tiempo. Se han fabricado siete tipos de SCC, uno de referencia y el resto con diferentes sustituciones (10 %, 20 %, 30 %, 40 %, 50 % y 60 %) del árido fino calizo por escoria granulada de alto horno (GBFS), todos ellos con 375 kg/m³ de cemento (CEM II /B-M (S-L) 42,5R) y una relación efectiva agua/cemento (a/c) de 0.55. Se ha desarrollado un método para cuantificar la segregación de los hormigones en estado endurecido. Los ensayos de escurrimiento y de embudo en V, no son suficientemente sensibles para cuantificar la estabilidad de una mezcla, por lo que es necesario realizar ensayos específicos para poder obtener resultados concretos en el estudio de la segregación (Valcuende *et al.*, 2007 y Santos *et al.*, 2012). Los SCC fabricados, han presentado un buen comportamiento en estado fresco. Ninguno de los SCC fabricados se consideró segregado, aunque con el aumento de la humedad de la GBFS utilizada en los SCC se han obtenido aumentos del índice de estabilidad cuantitativo propuesto (IEC).

Palabras clave: segregación, hormigón autocompactante y escoria granulada de alto horno.

ABSTRACT

This paper studies the segregation of self-compacting concrete (SCC) with similar rheological characteristics and no signs of segregation in slump-flow test. The characteristics of aggregates influence in the results of segregation tests. When aggregate absorption is high, the penetration tests or visual analysis may not show signs of segregation whereas column method shows clearly the segregation of the mixture (Santos *et al.*, 2012). In this study sands are partially replaced by Granulated Blast Furnace Slag (GBFS). GBFS is higher absorbent than sand or gravel and could modify the paste humidity over time. Seven types of SCC are made, one pattern concrete and the others with different substitutions of fine aggregate by GBFS (10 %, 20 %, 30 %, 40 %, 50 % and 60 %). All of them are made with a w/c ratio of 0.55 and a cement content of 375 kg/m³ (CEM II / B-M (S-L) 42.5R). A method to quantify the hardened concrete segregation (IEC) is developed and tested, because of slump flow and V-funnel tests are not able to measure the stability of the mixture (Valcuende *et al.*, 2007 y Santos *et al.*, 2012). All SCC mixes showed a good rheological behaviour in fresh state, and none showed segregation signs. The method developed show that IEC index is higher as the aggregate humidity increase.

Keywords: segregation, self-compacting concrete and granulated blast furnace slag.

RESUMO

Este trabalho estuda a segregação de concretos autocompactantes (SCC) com características reológicas similares e não apresentam indícios de segregação no teste de escurrimiento (ASTMC1611). As características dos áridos influenciam nos resultados dos diferentes testes para medir a segregação. Quando a absorção do árido é elevada pode ser que a mistura não apresente sinais de segregação nos testes de penetração e análise visual, a segregação pode ser obtida pelo método da coluna (Santos *et al.*, 2012). São utilizados, em parte, áridos de grande absorção

⁽¹⁾ Department of Architecture / Polytechnic University of Valencia, Camino de Vera s/n, 46022 Valencia, Spain

⁽²⁾ Department of Architecture and Building Technologies / Technical University of Cartagena, Paseo Alfonso XIII, 30203 Cartagena, Spain.

⁽³⁾ Department of Construction Materials, Centro Tecnológico de la Construcción, Tel. (34) 968 074 166, Polg. Oeste, 30820, Alcantarilla, Spain.

E-mail: isabelminano@ctcon-rm.com

Artículo recibido el 12 de septiembre del 2014 y aprobado el 19 de enero del 2014.

(escoria siderúrgica de alto horno) que puede variar la humedad de la pasta a lo largo del tiempo. Fueron producidos siete tipos de SCC, uno de referencia y los otros con diferentes substituciones (10%, 20%, 30%, 40%, 50% y 60%) del árido fino de calcáreo por escoria granulada de alto horno (GBFS), todos ellos con 375 kg/m³ de cemento (CEM II /B-M (S-L) 42.5R) y proporción eficaz de agua / cemento (a / c) de 0.55. Fue desarrollado un método para cuantificar la segregación de los concretos en estado endurecido. Los tests de escoamento y de funil en V, no son sensibles o suficientes para cuantificar la estabilidad de una mezcla, tornándose necesario la realización de tests específicos para poder obtener resultados concretos en el estudio de la segregación Valcuende *et al.*, 2007 y Santos *et al.*, 2012. Los SCC fabricados, tuvieron un buen desempeño en estado fresco. Ninguno de los SCC fabricados fue considerado segregado, aunque con el aumento del índice de humedad del GBFS utilizado en los SCC fueron obtenidos aumentos del índice de estabilidad cuantitativo propuesto (IEC).

Palabras clave: segregación, concretos autocompactantes y escoria granulada de alto horno.

1. INTRODUCCIÓN

La segregación se define como la separación o distribución no homogénea de los componentes del hormigón. La distribución homogénea de pastas y áridos es un aspecto fundamental, con claras repercusiones en el comportamiento mecánico y en la durabilidad del hormigón. Son numerosos los factores que interfieren en el fenómeno de la segregación, aunque la granulometría y viscosidad tienen una gran influencia. La granulometría continua permite que los diámetros inferiores mantengan a los diámetros superiores en suspensión. Por este motivo, las granulometrías abiertas favorecen la segregación. La mayor viscosidad minimiza la segregación.

La elevada fluidez del hormigón autocompactante (SCC) y la influencia de la humedad y absorción de los áridos en su comportamiento reológico lo hacen más propenso a la segregación que el hormigón tradicional vibrado (Valcuende *et al.*, 2007). Se puede mejorar la resistencia a la segregación aumentando la viscosidad mediante un mayor contenido de finos mediante la incorporación de cemento, adiciones, o aditivos modificadores de la viscosidad (Valcuende *et al.*, 2007 y Santos *et al.*, 2012). Petrov, *et al.*, (2001) indican que para solucionar el problema de la segregación, el empleo de aditivos cohesivos consigue mayor estabilidad en los SCC que con únicamente incrementar la cantidad de finos, pues un exceso de pasta alrededor de los áridos puede conducir a la segregación (Okamura *et al.*, 2003).

Por otra parte, se puede hablar de segregación dinámica y estática. La segregación dinámica es aquella que se produce al fluir el hormigón en los encofrados. La segregación estática es más difícil de evaluar y está asociada a los fenómenos de sedimentación una vez que el hormigón se encuentra en reposo dentro del molde.

Es posible que mezclas que muestren un adecuado comportamiento frente a la segregación dinámica durante la realización del ensayo de escurrimiento presenten segregación en estado de reposo (Santos *et al.*, 2012 y Lowke *et al.*, 2003), por lo que ensayos en estado fresco como el de escurrimiento o el de embudo en V no son suficientemente sensibles para cuantificar la estabilidad final de una mezcla, debiendo realizar ensayos específicos para poder obtener resultados concretos en el estudio de la segregación (Valcuende *et al.*, 2007 y Revuelta *et al.*, 2009). En el desarrollo del ensayo de escurrimiento actúan acciones dinámicas en los SCC, pero no es el ensayo más propicio para evaluar la segregación dinámica y mucho menos la estática. Shen *et al.*, (2008) proponen un ensayo que se asemeja más con casos reales en obra, donde se pueden llegar a desplazamientos del flujo de hasta los 9 metros. En dicho ensayo, la longitud de desplazamiento del SCC es de 1.83 m, con una inclinación del dispositivo de 7°. Existen numerosos ensayos para detectar este fenómeno negativo, a destacar los siguientes (Ambroise *et al.*, 1999 y Shen *et al.*, 2008).

Índice de segregación y exudación visual, “VSI”

Método de columna de segregación en estado fresco o semiendurecido (ASTM C1611)

Ensayos de segregación GTM

Simplificación de Sedran y De Larrard

Sonda de segregación

Método de Eddy

Segregación dinámica

El método GTM estudia la viscosidad y retención de la pasta al paso por un tamiz. El método de columna (Ambroise *et al.*, 1999 y Hamada *et al.*, 2000), si puede llegar a cuantificar como se distribuyen los áridos gruesos en toda la altura de la probeta ensayada, pero el trabajo se hace laborioso para desmenuzar el hormigón en rodajas y dejar limpio el

árido grueso. Sedran y De Larrard plantean quizás el método más sencillo de aplicar, pero no estudian lo que sucede más allá de los primeros 10-20 mm de hormigón. El método de la sonda y Eddy evalúan, por lo general, el ancho de la capa de mortero superficial, pero diferentes densidades en los áridos o de la pasta pueden alterar los resultados. El método dinámico Shen *et al.*, (2008) es el que mejor estudia el comportamiento real que en obra sufre el SCC, siendo un dispositivo grande para el transporte, debiendo además lavar y secar in situ los áridos gruesos para su pesaje.

En varios de estos métodos se analiza, de forma indirecta, la viscosidad del conjunto árido-pasta, lo que puede llevar a resultados contradictorios variando las características de los áridos utilizados. A este respecto, Santos *et al.*, (2012) lograron buenos resultados en el ensayo de escurrimiento pero obtuvieron segregación en los SCC vertidos en obra. Además, con tamaño máximo del árido de 19 mm, obtuvieron segregación en 4 muestras por el método de la columna, mientras que en los ensayos del tamiz, de penetración y en el análisis visual no se detectó. Ninguno de los métodos indicados cuantifica la segregación de un SCC en estado endurecido. Es por todo ello que se ha desarrollado un método simple para cuantificar la segregación de los hormigones. Este método estudia y cuantifica estadísticamente la homogeneidad de la distribución de los áridos gruesos en elementos de hormigón, frente a otros métodos cualitativos, sin necesidad de dispositivos complejos o de consumo de recursos extras para el lavado o secado de los áridos, evitando el generar más desechos en la fase experimental (agua con arenas y cemento). Además, por lo general, se puede realizar el ensayo IEC sobre probetas recicladas tras su uso en otros ensayos como el de tracción indirecta, penetración de agua bajo presión, etc.

La investigación tuvo por objetivos estudiar la segregación en hormigones que, por una adecuada reología inicial, no presentan indicios de segregación en el ensayo de escurrimiento. Para ello, se utilizaron diferentes cantidades de áridos de gran absorción (GBFS) que hacen variar la humedad de la pasta con el paso del tiempo, afectando a la viscosidad de los diferentes SCC fabricados. Se ha sustituido parte del árido calizo por diferentes cantidades de GBFS en forma de árido fino para analizar cómo afecta su alta absorción (8 %) en la distribución de los áridos gruesos en los SCC. Se han fabricado siete tipos de SCC, uno de referencia y el resto con diferentes sustituciones (10 %, 20 %, 30 %, 40 %, 50 % y 60 %) del árido fino calizo por GBFS.

La GBFS es un residuo fundido obtenido tras las reacciones químicas entre la materia prima, los materiales añadidos al alto horno y las impurezas oxidadas durante el refinado del hierro (Amara *et al.*, 1999). En España, en los últimos años, el sector de la construcción ha sufrido un gran descenso. El consumo de cemento en Enero de 2013 fue de 892,783 toneladas, 245,000 toneladas menos que en el año anterior, y un 80 % menos de lo que se consumió en Enero de 2007. Esta reducción hace bajar la demanda de las materias que lo componen, siendo necesaria la búsqueda de alternativas para el uso de los subproductos o residuos que se utilizan como adiciones, como es el caso de las GBFS. Son muy pocos, y no siempre coincidentes, los trabajos relacionados con el uso de las GBFS como árido en los hormigones (Antonina *et al.*, 2002 y Scanduzzi *et al.*, 1990).

El método IEC (Índice de estabilidad cuantitativo) desarrollado, estudia y compara, en estado endurecido, la cantidad de árido grueso existente en la franja superior e inferior de la probeta analizada, sin tener en cuenta el origen de la segregación (dinámica o estática).

Tabla 1: Proporción de la mezcla de SCC con remplazos de GBFS.

Mezcla	Arena caliza (0/4) kg/m³	Arena caliza (0/2) kg/m³	Grava (4/12) kg/m³	Árido GBFS (0/2) kg/m³	Material cementante		Filler calizo kg/m³	Superplast. kg/m³	Agua l/m³
					Cemento kg/m³	Ceniza volante kg/m³			
SCC 0%	861.26	274.11	656.63	0.00	375	25	0.00	4.4	220
SCC 10%	870.29	158.99	656.79	100.00	375	25	32.53	4.2	220
SCC 20%	873.25	44.78	656.32	199.06	375	25	64.75	4.0	220
SCC 30%	794.58	0.00	656.32	303.13	375	25	91.47	4.6	220
SCC 40%	686.26	0.00	656.32	410.58	375	25	114.61	4.8	220
SCC 50%	560.09	0.00	655.69	515.22	375	25	137.01	7.2	220
SCC 60%	456.68	0.00	663.9	619.38	375	25	159.37	6.0	220

2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

2.1. MATERIALES

Se fabricaron 7 tipos de SCC, con sustituciones del 0 al 60 % de árido fino calizo por GBFS. Las probetas empleadas fueron cilíndricas como especifica la UNE- EN 12390-1. En la Tabla 1 se detallan las dosificaciones de todas ellas. Los áridos, cemento, aditivo y agua son dados en peso (kg) para producir 1 m³ de SCC. Todas las mezclas estudiadas se fabricaron con 375 kg/m³ de cemento, 25 kg de ceniza volante y una relación efectiva agua/material cementante de 0.55. Debido al alto grado de absorción de agua de la GBFS (8 %, obtenido según la norma UNE 1097-6:2001, frente al 1 % del árido calizo) se saturaron todos los áridos 24 horas antes de su utilización para evitar pérdidas de trabajabilidad e inestabilidades. Para el SCC 60 % el 7 % de diferencia de absorción de la escoria, frente al árido calizo sustituido, suponen 43.4 litros de agua por m³ de hormigón, lo que suponen un 20 % más del agua de la dosificación de referencia sin escoria (SCC 0 %). El superplastificante utilizado fue de altas prestaciones del tipo policarboxilato.

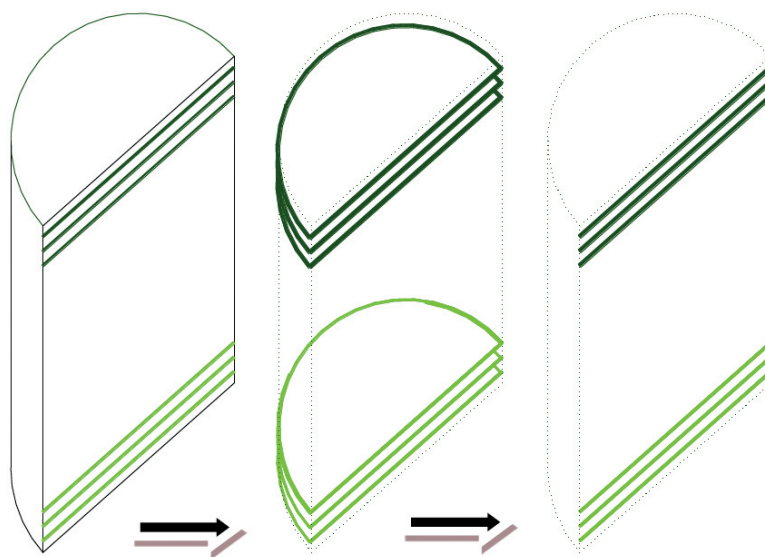


Fig. 1: Esquema de franjas, planos horizontales y aristas.

El esqueleto granular de los SCC está formado a partir de tres fracciones de árido calizo de machaqueo; una grava 4/12 mm, con un contenido de finos del 1%, una arena gruesa 0/4 mm y una arena fina 0/2 mm, con un contenido de finos muy alto (tamaño de partícula <0.063 mm) de 11.98 y 17.06 % respectivamente. Estas arenas fueron sustituidas, en parte, por las escorias de fracción granulométrica 0-2 mm. Las curvas granulométricas fueron analizadas mediante la norma europea UNE EN 12620 y el anexo 17 de la EHE-08. Las partículas del árido calizo son más finas que las del GBFS (Fig. 4). Para el estudio en detalle de las fracciones por debajo de 0.1mm se utilizaron técnicas granulométricas con láser, obteniendo que la finura de las partículas de la arena sustituida es mayor que la del filler calizo utilizado (Fig.5). Éste es adicionado para compensar la pérdida de finos que se produce al sustituir las arenas por escoria, fabricando SCC con cantidades similares de fracciones menores <0.85 mm (Tabla 2 y Fig. 6).

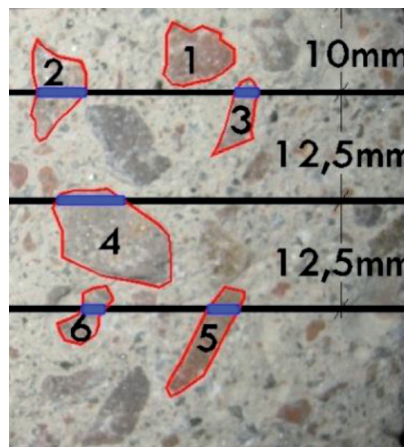
La escoria granulada de alto horno se caracteriza mineralógica y químicamente por diferentes ensayos de acuerdo con las especificaciones indicadas en la norma europea UNE-EN 196-2:2006. De los resultados obtenidos se destaca el alto contenido en SiO₂ (34.41 %) y CaO (41.9 %). Éstos son determinantes de las propiedades cementicias de la escoria. La GBFS se considera básica por la relación CaO/SiO₂ igual a 1.22. Los resultados del análisis mineralógico obtenido por difracción de rayos X (DRX) muestran una composición mayoritaria de calcita, con indicios de mullita, considerándose un material amorfo con propiedades cementantes.

Tabla 2: Cantidad de finos y filler calizo (<0.85 mm) y ratios con respecto al SCC de referencia.

Cantidad de finos de arena + filler en kg/m ³	SCC 0%	SCC 10%	SCC 20%	SCC 30%	SCC 40%	SCC 50%	SCC 60%
Total kg/m³ <0.85mm	241.70	244.92	246.90	246.21	248.26	246.09	248.31
% Total <0.85mm	100.0%	101.3%	102.1%	101.9%	102.7%	101.8%	102.7%

2.2. MÉTODOS DE ENSAYO

Para la aplicación del método se debe cortar longitudinalmente la probeta y marcar las 2 franjas de estudio (superior e inferior), y en cada una de ellas se trazan 3 planos paralelos. Si además se estudia una tercera franja central, permite detectar segregaciones más localizadas. Se considera que cada franja marcada representa estadísticamente al resto de esa zona de la probeta. Y dado que el fenómeno de la segregación actúa homogéneamente por estratos horizontales, el estudio de cualquier punto de estos planos horizontales puede considerarse representativo del total de éste. Es decir, la cantidad de áridos seccionados por la arista visible de cada plano horizontal, tras cortar la probeta longitudinalmente, se considera representativa de dicho plano o estrato (Fig. 1). Para cada franja definida en cada probeta se realiza una inspección de 450 mm de longitud (tres planos de 150 mm por franja). La suma de las longitudes de árido grueso interceptadas (cuerdas) en estos 450 mm da la proporción (Σ longitud de cuerdas / 450 mm) de árido grueso presente en cada una de las franjas. Los planos horizontales se deben trazar en función de las características de la granulometría de los áridos gruesos utilizados. Se adopta un primer plano horizontal a 10 mm de la cara superior que además permite visualizar la existencia de segregación según otros métodos (Sedran *et al.*, 1999). Los dos siguientes planos horizontales de esta franja superior distan sucesivamente el diámetro máximo de árido utilizado en la elaboración del hormigón, en este caso es 12.5 mm (Fig. 2). En la franja inferior se procede de forma simétrica a la superior, es decir, los planos se colocan a 10, 22.5 y 35 mm de la cara inferior de la probeta. La franja central, en el caso de precisarla, queda representada con un plano horizontal en el centro de la probeta y un plano por encima y otro por debajo a distancia del diámetro máximo del árido utilizado. Sobre las líneas trazadas (planos horizontales) se mide la longitud interceptada por cada árido grueso (considerado como el inscrito en una circunferencia de un diámetro establecido, Fig. 3) y se agrupan por su longitud para cada franja. En la figura 3 se muestra el contorno de los áridos interceptados en la figura 2, su diámetro estimado o equivalente de tamiz y la longitud seccionada, siendo este último dato el utilizado para el método IEC. El árido representado con el número 1, de la figura 2, no es interceptado por los planos horizontales, por lo que no se tiene en cuenta para el método IEC, pero es indicativo, junto al marcado como número 2, de la no segregación del hormigón según el método planteado por Sedran y De Larrard (1999). Para los métodos HVSI y Sonda (segregación estática), (Ambroise *et al.*, 1999), los áridos 1 y 2 catalogarían al hormigón en los grupo 0 o 1, ambos estables. En los métodos VSI e IEV (Ambroise *et al.*, 1999 y Shen *et al.*, 2008) ambos áridos (el nº1 y nº2), por lo general, serán consecuencia de hormigones estables con resultados similares de 0 o 1 en el desarrollo de dichos ensayos.

**Fig. 2: Esquema de secciones horizontales (cuerdas) en los áridos.**







	Forma	Ø Tamiz	Sección
1		8mm	
2		10mm	5,3mm
3		8mm	2,6mm
4		12,5mm	7,4mm
5		12,5mm	3,4mm
6		8mm	2,5mm

Fig. 3: Áridos y longitudes de cuerda equivalentes.

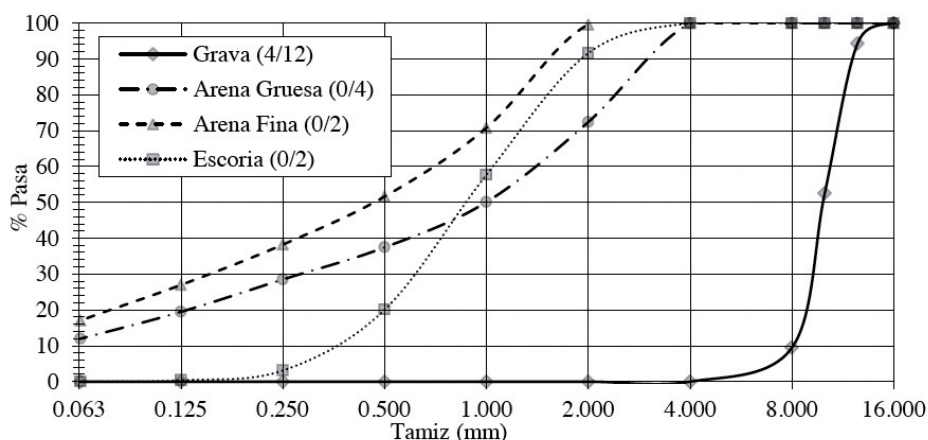


Fig. 4: Curvas de granulometrías de los áridos utilizados.

El objetivo de los cálculos a realizar en el método propuesto IEC es obtener la proporción de árido grueso de cada franja sobre el total, para ello se considera una misma probabilidad de presencia de áridos gruesos en cualquier punto de la inspección para un hormigón no segregado (fundamentos adaptado de UNE-EN 480-11-2006). Sólo se tienen en cuenta los áridos interceptados durante la operación de barrido lineal transversal (450 mm por franja) y ningún árido se debe interceptar más de una vez por los planos horizontales (se han de separar mínimo el diámetro máximo del árido). Esto significa que cada cuerda registrada corresponde a un solo árido, y dado que el plano de sección de la probeta no muestra los máximos diámetros de los áridos se incluye en la inspección un diámetro inferior al considerado como mínimo (8 mm) para un mayor ajuste del método. Es decir, un árido seccionado de diámetro de 6 mm con alta probabilidad será realmente un árido de un diámetro mayor, en este caso 8 mm. Sólo para el caso de que el plano intercepte al árido por el centro geométrico el diámetro mostrado (en la sección de la probeta) coincidirá con el real (baja probabilidad de que ocurra, UNE-EN 480-11-2006). Si se comparan las cantidades de cuerdas interceptadas en las diferentes franjas inspeccionadas se obtiene un valor de homogeneidad de la distribución de los áridos gruesos. Si se obtienen diferencias estadísticamente significativas entre las cantidades de cuerdas de cada franja horizontal es un síntoma de segregación.

Tabla 3: Datos reológicos por sustitución de GBFS.

	SCC 0%	SCC 10%	SCC 20%	SCC 30%	SCC 40%	SCC 50%	SCC 60%
Viscosidad (Pa*s)	14	22	42	35	58	32	11
Tensión de Corte (Pa)	22	20	20	22	26	24	14
Ø Final (mm)	670	680	680	670	650	660	728
T ₅₀₀ (s)	1.2	1.4	2.2	1.9	3.4	2.2	1.0
Índice VSI	0	0	1	0	0	0	0
Δs	0.9	8.6	6.6	1.1	6.6	2.3	12.2
IEC	0.3	0.9	0.7	1.2	0.8	1.1	1.2

Se llevaron a cabo dos tipos de pruebas. Por un lado, se estudió la resistencia a compresión de las 7 dosificaciones, a 7, 28 y 90 días (Fig. 7). Por otro lado, se estudiaron las propiedades en estado fresco de los hormigones (Tabla 3), así como la homogeneidad y/o segregación de los SCC con los métodos VSI (Tabla 3 y Fig. 8) e IEC (Tabla 4 y 5). Todas las probetas fueron cilíndricas de 150 mm de diámetro y 300 mm de altura y mantenidas en cámara de curado a 20° C y humedad relativa mayor del 95 % hasta la fecha de los ensayos.

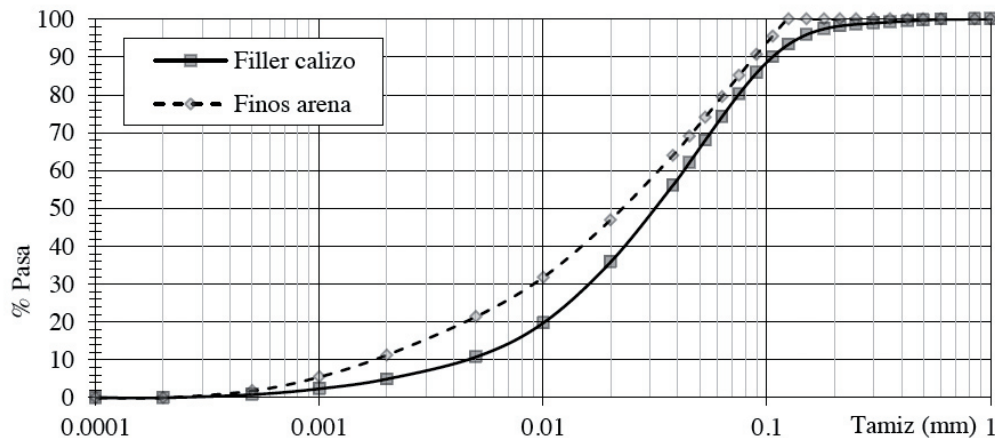


Fig. 5: Curvas de granulometrías de los finos de las arenas y del filler calizo.

Para el método de segregación desarrollado se comienza partiendo las probetas cilíndricas en dirección longitudinal (dirección de la fuerza gravitacional). Se trazan las líneas de inspección y se cuentan en cada franja el n° de cuerdas (longitud de árido interceptado) de cada longitud (Tabla 4). Se suman todas las de una misma franja y se calcula la proporción sobre la longitud total de inspección (450 mm) y se obtiene el tanto por ciento estimado de árido grueso para cada franja (Ec. 1).

$$Gv = \frac{Lg}{Lt} * 100 \quad (1)$$

siendo;

Gv= Cantidad porcentual de grava interceptada en cada franja.

Lg= Longitud de grava interceptada para cada franja.

Lt= Longitud total inspeccionada en cada franja.

Tabla 4: Número de cuerdas interceptadas por longitudes.

Nº de cuerdas por grupo			Grupos de cuerdas por su longitud (mm)													
			14	13	12	11	10	8	9	7	6	5	4	3	2	1
SCC 0%	Sup	A	0	0	0	0	0	0	0	3	4	3	5	5	3	0
		B	0	0	0	0	0	0	1	1	7	3	7	3	0	0
	Inf	A	0	0	0	0	0	1	0	1	4	1	3	7	8	1
		B	1	0	0	1	0	1	2	1	1	0	7	6	5	2
SCC 10%	Sup	A	0	0	0	0	0	2	0	4	5	0	2	1	0	0
		B	0	0	1	0	2	1	0	2	5	1	0	2	0	0
	Inf	A	0	1	0	0	0	1	0	1	2	4	7	5	1	0
		B	0	1	0	0	0	2	0	3	2	4	1	6	3	0
SCC 20%	Sup	A	0	0	0	1	0	1	1	4	3	2	2	1	2	1
		B	0	1	0	0	0	0	2	4	3	5	5	3	0	0
	Inf	A	0	0	0	0	1	0	3	2	3	6	2	6	1	0
		B	0	0	0	0	1	0	0	3	4	4	5	6	4	0
SCC 30%	Sup	A	0	0	0	0	0	1	4	3	3	7	1	3	1	0
		B	0	0	0	0	0	0	2	1	3	4	3	2	2	0
	Inf	A	1	0	0	0	2	0	1	0	2	1	4	6	2	0
		B	0	1	0	0	3	1	1	1	5	1	1	2	2	0
SCC 40%	Sup	A	0	0	0	0	0	1	4	1	2	1	2	4	1	0
		B	0	0	0	1	0	0	1	2	3	5	3	3	2	0
	Inf	A	0	0	0	0	1	0	2	0	0	2	6	3	6	0
		B	0	0	0	2	1	2	3	2	2	1	1	4	7	2
SCC 50%	Sup	A	0	0	0	0	0	0	2	3	2	5	2	4	2	0
		B	0	0	0	0	0	1	1	1	5	6	0	0	1	0
	Inf	A	0	0	0	0	0	0	1	2	2	4	3	2	3	0
		B	0	1	0	0	2	0	0	3	2	5	3	4	1	1
SCC 60%	Sup	A	0	0	0	0	1	0	1	2	1	0	2	10	3	0
		B	0	1	0	0	0	0	1	2	4	5	4	3	0	0
	Inf	A	0	0	0	2	0	0	2	4	3	2	4	2	0	1
		B	1	0	0	1	1	1	1	2	3	2	4	3	1	0

Este método desarrollado se ha aplicado sobre 14 probetas, 2 para cada dosificación.

Para una comparación del método propuesto con la mayoría de metodología internacional descrita anteriormente (valores de 0 a 3), se ha realizado un procedimiento de conversión matemático. Se han planteado como premisas de conversión la clasificación descrita en el método HVSI (Fang *et al.*, 2006) y parámetros validados por otros investigadores (Lowke *et al.*, 2003). Para la conversión del valor IEC a la escala de 0 a 3 se utiliza la Ecuación 2:

$$IEC = IEC' + Vd = \Delta s * \Delta a + Vd = \left(100 * \left(1 - \frac{\% \text{ árido superior}}{\text{media } \% \text{ árido}} \right) \right) * \Delta a + Vd \quad (2)$$

Donde, Δs es el índice de segregación en %, Δa es una expresión matemática de conversión del Δs a los estándares internacionales de 0 a 3. Vd es un índice de variabilidad de los diámetros en las diferentes franjas (se adopta un valor entre 0.3 y 1, según el valor P del ANOVA de los datos obtenidos) y IEC' es el índice de estabilidad de los SCC sin incluir el parámetro Vd .

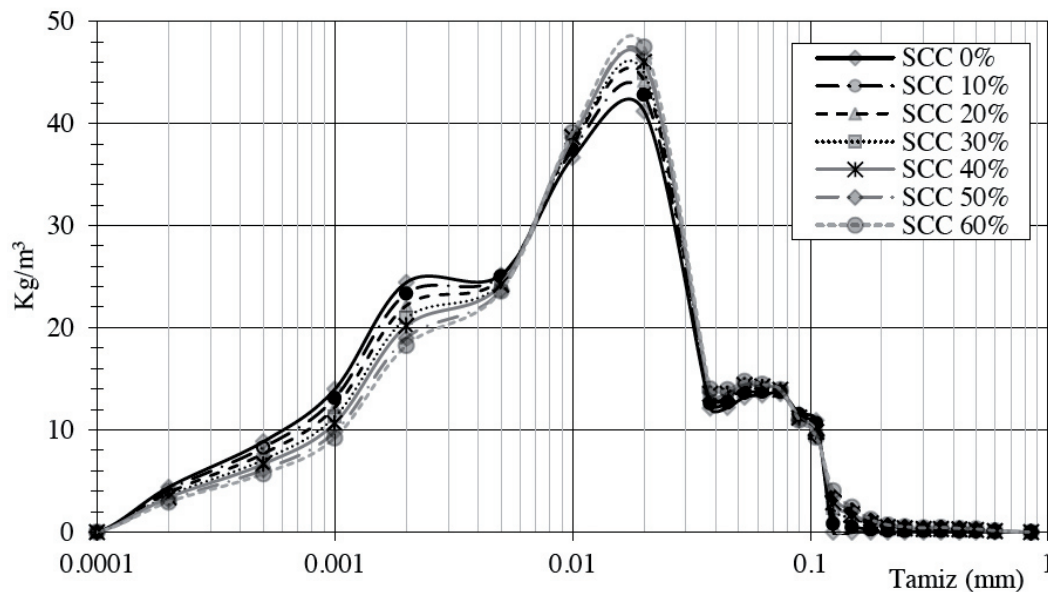


Fig. 6: Cantidad de finos y filler calizo (de las arenas y adicionados) por m³ de cada SCC.

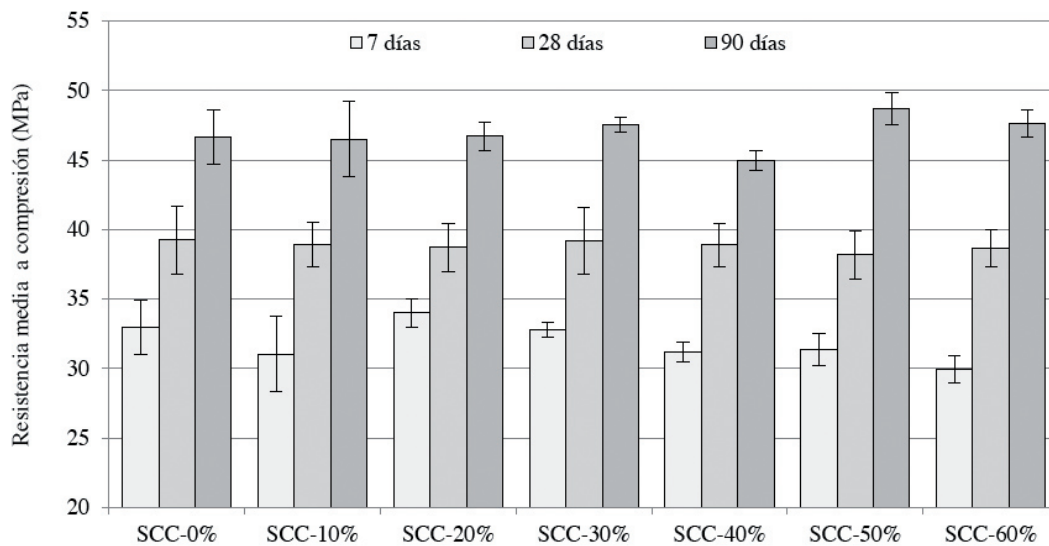


Fig. 7: Resistencias medias a compresión (MPa) a 7, 28 y 90 días.

Las premisas de conversión utilizadas son:

- Valor 0 → Ninguna capa de mortero en la parte superior del corte de la probeta y sin variación en el tamaño y porcentaje de distribución de los áridos grueso de arriba a abajo.
- Valor 1 → Ninguna capa de mortero en la parte superior de la corte, pero leve variación en el tamaño y porcentaje de distribución del árido grueso de arriba a abajo.
- Valor 2 → Leve capa de mortero de menos de 25 mm de altura, en la parte superior y diferente distribución en tamaño y porcentaje del árido grueso de arriba a abajo.

- Valor 3 → Claramente segregado con capa de mortero mayor de 25 mm y/o una considerable variación en tamaño y porcentaje de distribución del árido grueso de arriba a abajo.

Además, se considera que una mezcla es estable, si la variación del contenido de árido grueso (de más de 8 mm) en la parte superior de la pieza respecto del contenido medio de árido en toda la pieza, es inferior al 20 % (Lowke *et al.*, 2003). Coincidente este 20 % por el indicado en el índice de segregación, “SR”, del método GTM.

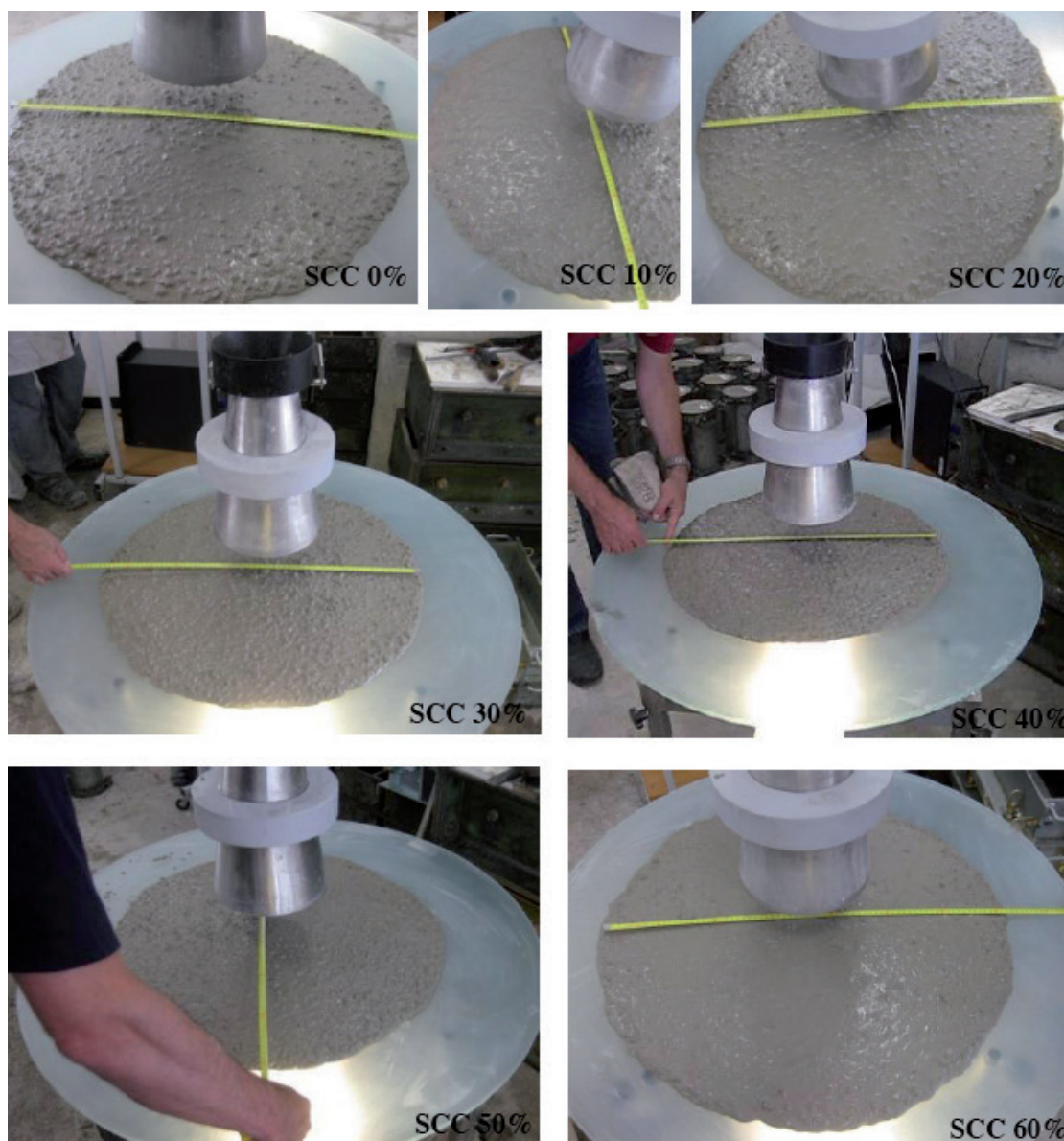


Fig. 8: Ensayo de escurrimiento de las 7 dosificaciones.

Con todo lo indicado se busca una expresión matemática (ecuación de regresión) que se ajuste al máximo para adoptarla como Δa . En la figura 9 se muestra la representación gráfica de la función $y = -5.556x^2 + 9.353x$ que cumple dichas premisas. Se adopta, por tanto, para el cálculo del IEC la expresión $IEC' = -5.556\Delta s^2 + 9.353\Delta s$, por lo que $IEC = -5.556\Delta s^2 + 9.353\Delta s + V_d$.

Para determinar Vd se realiza un estudio estadístico de ANOVA de los datos obtenidos. Si existen diferencias estadísticamente significativas entre los diámetros obtenidos en cada franja indica una distribución desigual de los áridos en el hormigón y se adopta un Vd entre 0.3 y 1 (dependiendo el Valor-P, Tabla 5) y si no hay diferencia significativa entre los valores de cada franja entonces Vd=0. Para ellos se analiza cada grupo de cuerdas con el ANOVA, donde se descompone la varianza de los datos en dos componentes: un componente entre grupos y un componente dentro del grupo.

Con la metodología y conversión propuesta (escala 0-3) se calculó el valor IEC' de 8 hormigones fabricados previamente, en los que se calculó el índice de segregación por el método de la columna, separando el árido grueso de la parte superior e inferior de una probeta en estado semiendurecido (reposando entre 30 y 45 minutos desde el hormigonado). En las columnas 2 y 3 de la Tabla 6 se muestran respectivamente los valores Δs y IEC' obtenidos. Todos los hormigones se consideran estables por ambas series de datos, obteniendo Δs menores del 20 % y valores IEC' menores de 1.

Tabla 5: Datos estadísticos de los áridos interceptados y valor IEC de las 14 probetas de SCC.

	Nº	\bar{X}	σ	Mín.	Máx.	Rango	Sesgo	Valor-P		IEC'		Vd	IEC	
SCC 0% a Sup.	23	4.3	1.5	2.1	7.3	5.1	0.6	0.1085	Sin dif.	0.3	0.3	0	0.3	0.3
SCC 0% a Inf.	26	3.6	2	0.9	9	8.1	2.2							
SCC 0% b Sup.	22	4.9	1.3	3.1	8.1	5	1	0.1085	Sin dif.	0.3	0.3	0	0.3	0.3
SCC 0% b Inf.	27	4.4	3.2	0.7	14.2	13.4	3.5							
SCC 10% a Sup.	14	6.2	1.6	3	8.6	5.7	-0.9	0.1548	Sin dif.	0.7	0.7	0	0.7	0.9
SCC 10% a Inf.	22	4.7	2.3	2.4	12.6	10.2	4.3							
SCC 10% b Sup.	14	6.6	2.6	2.5	11.7	9.2	0.6	0.0397	dif. Est.	0.7	0.7	0.4	1.1	0.9
SCC 10% b Inf.	22	5	2.7	1.8	12.6	10.8	2.3							
SCC 20% a Sup.	18	5.6	2.5	1.4	10.5	9.1	0	0.5469	Sin dif.	0.8	0.5	0	0.8	0.7
SCC 20% a Inf.	24	5.1	2.1	1.6	10.1	8.4	1.1							
SCC 20% b Sup.	23	5.4	2.3	2.7	12.8	10.2	3.1	0.0136	dif. Est.	0.2	0.2	0.5	0.7	0.7
SCC 20% b Inf.	27	4.4	1.9	1.7	9.5	7.8	1.5							
SCC 30% a Sup.	23	5.6	2	1.5	8.9	7.5	-0.6	0.2223	Sin dif.	1.3	1.2	0	1.3	1.2
SCC 30% a Inf.	19	5.1	3.3	2.3	14.4	12.1	3.1							
SCC 30% b Sup.	17	4.9	2.8	2	7.9	6	0.1	0.1993	Sin dif.	1.2	1.2	0	1.2	1.2
SCC 30% b Inf.	18	6.4	3	2.4	13.2	10.8	0.8							
SCC 40% a Sup.	16	5.5	2.4	2.4	9	6.5	0.2	0.118	Sin dif.	0.3	0.8	0	0.3	0.8
SCC 40% a Inf.	20	4.1	2.2	1.7	9.7	8	2.5							
SCC 40% b Sup.	20	4.9	2.2	1.8	10.8	9	1.9	0.5657	Sin dif.	1.3	1.3	0	1.3	0.8
SCC 40% b Inf.	27	5.1	3.3	1.3	11.1	9.8	1							
SCC 50% a Sup.	20	4.7	1.9	2.1	8.2	6.1	0.6	0.9294	Sin dif.	1	1.1	0	1	1.1
SCC 50% a Inf.	17	4.5	1.9	1.8	7.6	5.8	0.5							
SCC 50% b Sup.	15	5.8	1.6	2.4	9.3	6.9	0.4	0.8285	Sin dif.	1.2	1.2	0	1.2	1.2
SCC 50% b Inf.	22	5.4	2.9	1.4	13.1	11.7	2.2							
SCC 60% a Sup.	20	4	2.3	1.6	10	8.4	2.6	0.0112	dif. Est.	1.3	0.9	0.6	1.9	1.2
SCC 60% a Inf.	20	5.8	2.5	1.4	11	9.6	1							
SCC 60% b Sup.	20	5.3	2.2	2.6	12.6	9.9	3.6	0.6084	Sin dif.	0.5	0.5	0	0.5	1.2
SCC 60% b Inf.	20	6.1	3.1	1.9	14.3	12.4	2.1							

Nº-Número, \bar{X} -media; σ desviación estándar; Mín- mínimo; Máx-máximo, Valor p- se utiliza para determinar si un factor es significativo; por lo general, se compara con un valor alfa de 0.05. Si el valor p es menor que 0.05, el factor es significativo.

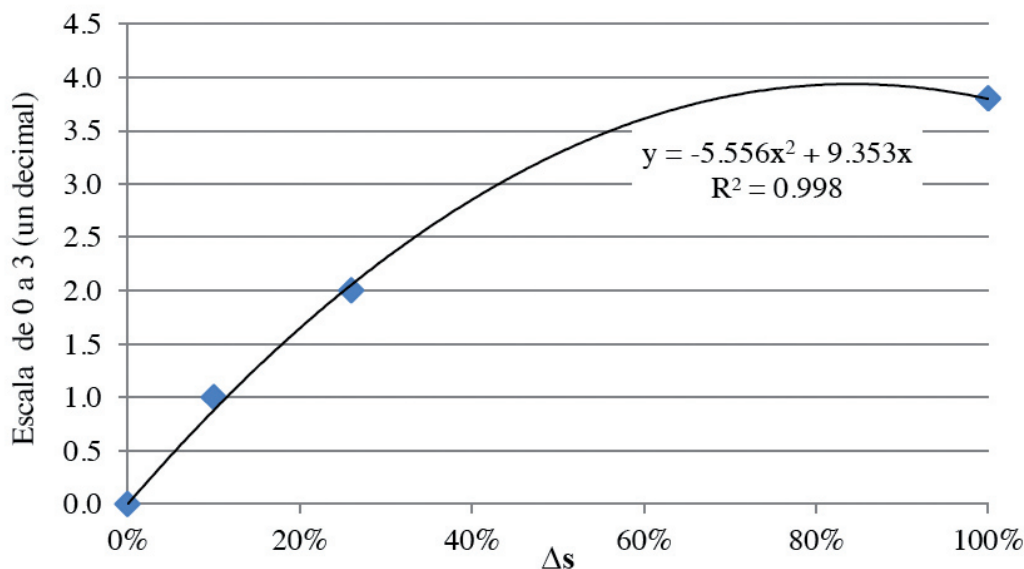


Fig. 9: Función de conversión para el IEC a escala de 0 a 3 (con un decimal).

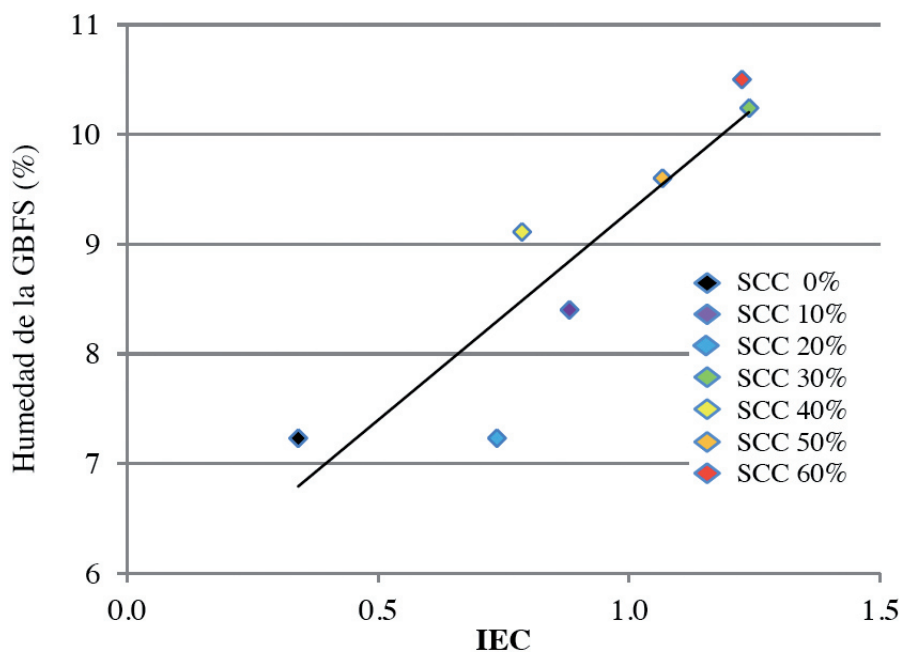


Fig. 10: Valores IEC con respecto a la humedad de la GBFS.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. ESTUDIO REOLÓGICO

Se midieron los principales parámetros de autocompactabilidad de los SCC con el dispositivo 4C-Rheometer. Se determinó el asentamiento según la UNE-EN 12350-2. Todas las mezclas presentaban un diámetro de escurrimiento ($\emptyset f$) de 690 ± 40 mm y buena resistencia a la segregación dinámica (inspección visual VSI). El tiempo en alcanzar el fluido el diámetro de 500 mm en el ensayo de escurrimiento (T_{500}) oscila entre 1.0 y 3.4 segundos. En la tabla 3 se muestran los resultados reológicos de las 7 amasadas de las probetas analizadas por el método IEC.

Tabla 6: Resultados del ensayo de segregación y conversión a escala de 0 a 3.

Hormigón	Δs (%)	IEC'	Observación
A-65-32	8.20%	0.7	Estable
A-55-32	7.10%	0.6	Estable
A-55-42	4.01%	0.3	Estable
A-45-42	9.81%	0.8	Estable
T-65-32	6.79%	0.5	Estable
T-55-32	2.12%	0.2	Estable
T-55-42	1.79%	0.1	Estable
T-45-42	1.31%	0.1	Estable

3.2. ESTUDIO DEL ÍNDICE VSI

En la Tabla 3 se muestran los valores VSI obtenidos en la inspección visual efectuada durante la realización del ensayo de escurrimiento (Fig. 8). De las 7 amasadas, solamente una obtuvo un valor de 1 por apreciarse una ligera aureola de mortero sin presencia de árido (SCC 20 %). El resto, con valor 0, presentaron un aspecto adecuado en el ensayo de escurrimiento.

3.3. ÍNDICE DE ESTABILIDAD CUANTITATIVO DE LOS SCC FABRICADOS

Tras la inspección de cada una de las 14 probetas cortadas, se rellena una tabla con el número de cuerdas interceptadas de cada longitud y para cada franja (Tabla 4), obteniéndose de esta información el resto de valores y estudios estadísticos. Con los valores de árido interceptado en la franja superior de cada probeta y el valor medio se calcula el índice de segregación, pudiendo utilizar varias expresiones reconocidas internacionalmente, en este caso se utiliza la propuesta por Lowke *et al.*, (2003), indicando que se puede considerar que una mezcla es estable si la variación del contenido de árido grueso (de más de 8 mm) en la parte superior de la pieza con respecto del contenido medio de árido en toda la pieza es inferior al 20 %. Se utiliza la siguiente Ecuación 3:

$$\Delta s(\%) = \left(\frac{\text{Cantidad de árido superior}}{\text{Cantidad de árido medio}} - 1 \right) \times 100 \quad (3)$$

La curva de ajuste calculada por el procedimiento conocido como el método de los mínimos cuadrados ($y = -5.556x^2 + 9.353x$) permite obtener el valor IEC e IEC'. La expresión viene dada por $IEC' = -5.556\Delta s^2 + 9.353\Delta s$ y una vez calculado Δs se sustituye junto a V_d en la expresión IEC, que viene dada por $IEC = -5.556\Delta s^2 + 9.353\Delta s + V_d$ (IEC en la escala 0-3). En la Tabla 5 se muestran los resultados para las 14 probetas analizadas, detectándose en 3 probetas diferencias estadísticas en la distribución de los diámetros de los áridos, pero en todas ellas el Δs es menor del 20 %, con valores IEC' entre 0.3 y 1.2. Considerándolas todas ellas como estables y sin segregación. De los resultados, destacar el SCC 60 % con un valor IEC' inferior a 1 pero con un valor-P=0.0112 muy bajo, lo que repercute en un valor IEC final de 1.2, indicando que el SCC es estable al no llegar al valor a 2, pero al pasar del valor 1 indica diferencias en la distribución de los tamaños de los árido grueso a lo largo de la altura de la probeta.

Se observa que para valores muy altos del \emptyset_f y muy bajos del T_{500} (728 mm y 1.0 segundos, respectivamente para el SCC 60 %), el Δs aumenta notablemente (12.21 %). Para valores entre 650 y 690 mm en el \emptyset_f , los valores Δs oscilan entre el 0.88 y el 8.59 %. Ninguno de los SCC fabricados se consideró segregado, aunque con el aumento de la humedad de la GBFS utilizada en la elaboración de los SCC (Fig. 10) se han obtenido aumentos del índice de estabilidad cuantitativo propuesto.

En la inspección visual (VSI) el SCC 20 % obtuvo un valor de 1 por apreciarse una ligera aureola de mortero sin presencia de árido, cercano al valor 0.7 obtenido con el método IEC. Para el resto de SCC los resultados fueron muy dispares, obteniéndose con el método IEC valores por encima de 1 en el SCC-30 %, SCC-50 % y SCC-60 %, mientras que con el método VSI estos hormigones presentaba un valor de 0, por su buen aspecto al fluir en el ensayo de escurrimiento.

3.4. PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS SCC

La estabilidad y homogeneidad de los hormigones afecta a las propiedades mecánicas de éstos. A mayor diferencia de la cantidad de árido existente entre la parte superior e inferior de una probeta, mayor será la debilidad mecánica de la parte de menor cantidad de áridos gruesos. Las mayores diferencias medias obtenidas entre la cantidad de árido de la parte superior e inferior de las probetas ha sido del 5.57 % para el SCC 60 %, correspondiéndole a éste la menor resistencia a compresión a 7 días de todo los SCC fabricados. A edades tempranas se hace más significativa la relación entre las propiedades mecánicas de los hormigones y la diferencia de la cantidad de árido grueso entre la franja superior e inferior.

Con el paso del tiempo, las resistencias mecánicas obtenidas por la formación de nuevos productos hidratados son muchos mayores y reducen, en parte, la importancia mecánica que tiene la distribución homogénea de los áridos a edades tempranas. Estos resultados son coherentes con los obtenidos por Scanduzzi y Battagin (1990), quienes registraron mayores resistencias a largo plazo debido a la actividad hidráulica tardía de las escorias o los obtenidos por Berridi (2008), también señala un mejor comportamiento de los hormigones con escorias.

En los resultados de resistencia a compresión a 7, 28 y 90 días no se han registrado diferencias estadísticamente significativas entre el SCC de referencia (0 %) y los diferentes SCC con sustituciones de árido calizo fino por GBFS (Fig. 7) Valcuende *et al.*, (2015). Según Lauber (2009), esto puede deberse a que la mayor actividad hidráulica reseñada anteriormente es compensada debido a la presencia de compuestos expansivos como la cal libre (CaO) y la magnesia (MgO) que dañan la microestructura del hormigón.

4. CONCLUSIONES

De acuerdo con el trabajo experimental realizado se pueden establecer las siguientes conclusiones:

1.- Se constató la sencillez de aplicación del método desarrollado IEC, y su fácil implantación en el laboratorio, precisando únicamente de un dispositivo de corte y una hoja de cálculo para procesar la información. Además, no se necesitan recursos extras para el lavado y secado de los áridos, a diferencia de otros métodos que utiliza el índice de segregación (Δ_s), evitando, por tanto, el generar más desechos en la fase experimental (agua con arenas y cemento). Además, por lo general, se puede realizar el ensayo IEC sobre probetas recicladas tras su uso en otros ensayos como el de tracción indirecta, penetración de agua bajo presión, etc. Esto permite aumentar la información obtenida en una investigación con un mismo volumen de hormigón elaborado. Se precisa de un tiempo reducido para analizar cada probeta, no requiriendo de varias jornadas de trabajo para lavar y secar los áridos gruesos al no desmenuzar el hormigón.

2.- Se obtuvieron unos valores medios en el índice de segregación (Δ_s , Tabla 3) entre 0.9 % y 12.20 %, todos ellos por debajo del 20 %. Los valores IEC resultante fueron de 0.3 a 1.2. No considerando ninguna probeta analizada como segregada.

3.- Los resultados de los ensayos en estado fresco indican que la trabajabilidad de los SCC, con y sin GBFS, son aceptables y similares entre ellos con pequeños ajustes en la cantidad de SP utilizado. Sin embargo, pequeñas variaciones en las características de los áridos, como la alta absorción de la GBFS que afecta a la humedad y viscosidad de la pasta, hacen variar la estabilidad de los SCC, sobre todo en reposo, por no actuar acciones dinámicas. Esto no se puede detectar con el ensayo de escurrimiento, por lo que de no utilizar ensayos complementarios se pueden obtener SCC segregados con valores óptimos en el ensayo de escurrimiento (Santos *et al.*, 2012 y Lowke *et al.*, 2003).

5.- El índice de segregación y el diámetro final del ensayo de escurrimiento han constatado que; los SCC muy fluidos son menos estables, pudiendo propiciar zonas con diferentes cantidades de árido grueso en los elementos hormigonados.

6.- En los resultados de resistencia a compresión a 7, 28 y 90 días no se han registrado diferencias estadísticamente significativas entre el SCC de referencia (0 %) y los diferentes SCC con sustituciones de árido calizo fino por GBFS.

REFERENCIAS

Amaral De Lima, L. (1999), "Hormigones con escorias de horno eléctrico como áridos: propiedades, durabilidad y comportamiento ambiental", *Tesis Doctoral*, Universidad Politécnica de Catalunya, Barcelona, pp. 1 -243.

Ambroise, J., Chabannet, M., Rols, S. y Pera, J. (1999), "Basic properties and Effects of Starch on Self-Levelling Concrete", *Proc. The First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete*, A. Sakarendahl and Ö. Pettersson (editors), RILEM Publications S.A.R.L. Estocolmo, Suecia pp. 377-386.

Antonina, M. (2002), “Contribuição ao estudo da carbonatação e da retração em concretos com elevados teores de escória de alto-forno”, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, pp. 1-204.

Bermejo, E., Moragues, A., Gálvez, J. y Fernández, M. (2010), “Permeabilidad y estructura porosa de hormigones autocompactantes de resistencia moderada”, *Materiales de Construcción*, Vol. 60, No. 299, pp. 37-51.

Berridi I. (2008), “Análisis de la influencia de residuos metalúrgicos como áridos en las propiedades del hormigón”, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, pp. 24-26.

Fang, C. y Labi, S. (2006), “Evaluating the Static Segregation Resistance of Hardened Self-Consolidating Concrete using Image Processing Technology”, For Presentation at the 86th Annual Meeting of the Transportation Research Board.

Hamada, D., Sato, T., Yamato, F. y Mizunuma, T. (2000), “Development of New Superplastizicer and Its Application to Self-Compacting Concrete”, Proc. *Sixth CANMET/ACI International Conference on Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete* (Niza, Francia), ACI SP-195, Ed. V.M. Malhotra, American Concrete Institute, Farmington Hills, EEUU, pp. 269-290.

Khayat, K. y Guizani, Z. (1997), “Use of viscosity-modifying admixture to enhance stability of fluid concrete”, *ACI Materials Journal*, Vol. 94, No. 3, pp. 332-340.

Kosmatka, S., Kerkhoff, B., Panarese, W., Tanesi, J. (2004), “Diseño y Control de Mezclas de Concreto”, Portland Cement Association, Skokie, IL, EEUU.

Lauber, M. (2009), “Influencia de la calidad de los residuos metalúrgicos granulares utilizados como áridos en las propiedades del hormigón”, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, pp. 1-82.

Lowke, D., Wiegink, K. y Schiessl, P. (2003), “A simple and significant segregation test for SCC”, *Proceedings of 3rd International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete*. Reykjavik: RILEM pp. 358-366.

Numata S., Koid, Y., Shimobayashi, S. (1986), “Properties of ultra-highly pulverized granulated blast furnace slag-Portland cements blends. In: Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Natural Pozzolans in Concrete”, *Proceedings Second International Conference*, Madrid, pp. 1341-1360.

Okamura, H. y Ouchi, M. (2003), “Selfcompacting concrete”, *Journal of Advanced Technology*, Vol. 1, No.1, pp. 5-15.

Petrov N., Khayat K. H., Tagnit-Hamou A. (2001), Effect of stability of self-consolidating concrete on the distribution of steel corrosion characteristics along experimental wall elements, *Proceedings of 2nd International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete*, Tokyo, pp. 441-450.

Revuelta, D., Barona A. y Navarro, D. (2009), “Measurement of properties and of the resistance to segregation in heavyweight, self compacting barite concrete”, *Materiales de construcción*, No. 59, No. 295, pp. 31-44.

Santos, C. P., Cavalaro, S. H. P., Aguado, A. (2012), “Comparación entre ensayos para evaluar la segregación en hormigones autocompactantes”, 3º Congreso Iberoamericano sobre Hormigón Autocompactante, Madrid, España pp. 141-150.

Scanduzzi, L. y Battagin, A. (1990), “Utilização da escória granulada de alto forno como agregado miúdo”, *Estudo Técnico No. 95*, Associação Brasileira de Cimento Portland, São Paulo, pp. 75-76.

Sedran, T. y Larrard, F. (1999), “Optimization of Self-Compacting Concrete Thanks to Packing Model”, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC), Nantes, France, *The First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete*, A. Sakarendahl and Ö. Pettersson (editors), RILEM Publications S.A.R.L. Estocolmo, Suecia, pp. 321-332.

Shen L., Lange D., Struble L., Dambrosia M. Tejada F., Birch B., Brinks A. (2008), “Performance and acceptance of self consolidating concrete: Final report”, *Civil Engineering Studies*, Illinois Center for Transportation Series No. 08-020 UILU-ENG-2008-2007.

Valcuende, M., Benito, F., Parra C., y Miñano, I. (2015), “Shrinkage of self-compacting concrete made with blast furnace slag as fine aggregate”, *Construction and Building Materials*, Vol. 76, pp. 1–9.

Valcuende, M., Parra, C. y Benlloch, J. (2005), “Permeabilidad, porosidad y resistencia a compresión de los hormigones autocompactables”, *Materiales de construcción*, Vol. 55, No. 280, pp. 5-14.

Valcuende, M., Parra C.; y Jarque C. (2007), “Homogeneidad de los hormigones autocompactantes”, *Materiales de Construcción*, Vol. 57, No. 287, pp. 37-52.