



Received: 12-10-2019
Accepted: 25-10-2019

Anales de Edificación
Vol. 6, N°1, 70-76 (2020)
ISSN: 2444-1309
Doi: 10.20868/ade.2020.4457

Influencia del uso de metacaolín y el humo de sílice en el desarrollo de la resistencia a compresión del hormigón de altas prestaciones y su relación con la microestructura

Influence of metakaolin and silica fume in the development of compressive strength of high-performance concrete and its relationship with the microstructure

Julio A. Paredes, Jaime C. Gálvez, Marcos G. Alberti & Alejandro Enfedaque

Departamento de Ingeniería Civil: Construcción, E.T.S de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid (Spain; marcos.garcia@upm.es)

Resumen— Research developed in the last decades has allowed significant advances in the concrete technology, achieving remarkable improvements in its performance mainly related to its microstructure. In order to relate the behaviour under compressive stresses of high performance concrete (HPC) and the changes in its microstructure, an experimental campaign was developed with specimens of dimensions 160x40x40 mm³. A control mixture without additions and a series of mix designs with partial substitution of cement by silica fume and metakaolin in different proportions were produced. A low water-to-binder ratio of 0.20 was used, which forced the use of a superplasticizer additive based on modified polycarboxylates, which improved the workability of the mixtures. Silica sand with 98% of SiO₂ content and an average particle size of 0.75 mm was used. The specimens were subjected to compressive strength tests at 2, 7, 28 and 91 days, and complementary tests of electric resistivity, mercury intrusion porosimetry (MIP) and differential thermal-thermogravimetric analysis (DTA-TG) at 28 days. The results of the tests showed that the increase in compressive strength with the use of additions was directly related to the reduction in total porosity and the increase in the proportion of total CSH gel / total portlandite, shown by the MIP and DTA-TG tests, respectively. Mixtures with additions showed reductions of the porosity by up to 31.7% compared with the control mixture, while increasing the proportion of CSH gel/ total portlandite by up to 17.1%. The use of small particles of mineral additions significantly increased the electric resistivity of HPC specimens as evidenced in the present study. This is explained by the reduction in the percentage of large capillary pores and the relative increase of small capillaries, which could enhance the durability of the concrete elements.

Palabras Clave— High-performance concrete; compressive strength; microstructure; metakaolin; silica fume.

Abstract— La investigación desarrollada en las últimas décadas ha permitido avances significativos en las prestaciones del hormigón, a través de la mejora de su microestructura. En este trabajo se presentan los resultados de una campaña experimental encaminada a mostrar la influencia de la microestructura del hormigón de altas prestaciones (HPC por sus siglas en inglés) en su resistencia a compresión. Se elaboró una mezcla de control sin adiciones y una serie de mezclas con sustituciones parciales del cemento con humo de sílice y metacaolín en diferentes proporciones. Se usó una relación de agua/conglomerante de 0,20, lo que obligó al uso de un aditivo superplastificante basado en policarboxilatos modificados, el cual mejoró la trabajabilidad de las mezclas. Se usó arena de sílice con 98% de contenido de SiO_2 y un tamaño de partícula promedio de 0,75 mm. Con ellas se confeccionaron probetas de dimensiones de 160x40x40 mm³. Las muestras se ensayaron a compresión a los 2, 7, 28 y 91 días, y se realizaron ensayos complementarios de resistividad eléctrica, porosimetría de intrusión de mercurio (PIM) y análisis térmico termogravimétrico diferencial (ATD-TG) a los 28 días. Los resultados de las pruebas mostraron que el aumento en la resistencia a la compresión con el uso de adiciones estaba directamente relacionado con la reducción de la porosidad total y el aumento en la proporción de gel C-S-H/portlandita total. Estos aspectos se confirmaron con los ensayos de PIM y ATD-TG. Las mezclas con adiciones mostraron reducciones de la porosidad hasta en un 31,7% en comparación con la mezcla de control, a la vez que incrementaron la relación gel C-S-H/portlandita total hasta en un 17,1%. El uso de pequeñas partículas de adiciones minerales aumentó significativamente la resistividad eléctrica de las muestras de HPC, lo que confirma la reducción del porcentaje de poros capilares grandes conectados y el aumento de capilares pequeños, lo que además de la resistencia a compresión mejora la durabilidad del hormigón.

Index Terms— Hormigón de alto rendimiento; fuerza compresiva; microestructura metacaolín; humo de sílice.

I. INTRODUCTION

A principios de la década de 1990, Pierre Richard introdujo el término "reactive poder concrete" (RPC) para referirse a un tipo de hormigón con baja relación de agua/cemento y porosidad reducida, que alcanzó una alta resistencia a compresión sin el uso de áridos gruesos y agregando partículas más pequeñas como el humo de sílice (Richard y Cheyrezy, 1995). En la misma década, De Larrard utilizó el término hormigón de ultra altas prestaciones (UHPC, acrónimo utilizado en inglés) para describir un tipo de hormigón con características análogas a las descritas por Richard, pero que incluía además el concepto de alta densidad de empaquetamiento (Larrard y Sedran, 1994; Naaman y Wille, 2012). En la actualidad, suele utilizarse el acrónimo HPC para referirse al hormigón que supera los valores de resistencias a compresión del hormigón convencional, pudiendo alcanzar valores cercanos a 150 MPa; cuando se supera este valor se utiliza el acrónimo UHPC, y cuando además el hormigón contiene fibras estructurales se le denomina UHPFRC. Las diferentes variantes de estos hormigón esa demás mejoran la ductilidad, la resistencia a flexotracción, la resistencia a impactos y de forma significativa la durabilidad.

En la fabricación del UHPC suele utilizarse alto contenido de cemento, relación agua/cemento baja, incluso menor a 0,20, áridos finos con alto contenido de SiO_2 , y adiciones minerales como el humo de sílice, las cenizas volantes, el metacaolín o la nanosílice, además de aditivos superplastificantes que permitan mantener una fluidez adecuada pese al bajo contenido de agua (Hirschi y Wombacher, 2008).

Las adiciones minerales son responsables en gran medida de la mejora de la resistencia a compresión, y ésta se asocia con una matriz de hormigón más compacta, con menor

porosidad y microestructura más densa (Naaman y Wille, 2012; Shi et al., 2015; Oertel et al., 2013; Oertel et al., 2014). La matriz del UHPC se densifica debido a dos tipos de fenómenos: la reacción puzolánica de estos materiales con el hidróxido de calcio, formando gel C-S-H secundario, y el efecto de relleno asociado al menor tamaño partículas que eleva la densidad de empaquetamiento (Lee et al., 2018). Estas partículas son capaces de rellenar los huecos existentes entre los granos de cemento y los materiales constitutivos de la matriz aun sin que hayan reaccionado con el hidróxido cálcico o portlandita (CH). Adicionalmente, se produce un fenómeno de nucleación del silicato cálcico hidratado (C-S-H) en la superficie de las partículas de relleno, que acelera la hidratación del cemento y contribuye a la mejora de prestaciones del UHPC (Oertel et al., 2014; Wang et al., 2015).

En el presente estudio se realizan ensayos de PIM, ATD-TG y resistividad eléctrica, para establecer una correlación entre los resultados obtenidos en los ensayos de resistencia a compresión y la mejora de la microestructura de las distintas dosificaciones de hormigón estudiadas.

II. CAMPAÑA EXPERIMENTAL

Como se ha indicado, para relacionar la resistencia a compresión de los distintos tipos de UHPC estudiados con las variaciones en su microestructura, se realizó una campaña experimental que incluía ensayos de resistencia a compresión, PIM, ATD-TG y resistividad eléctrica.

A. Materiales y dosificaciones de los hormigones

Se fabricaron probetas de hormigón de altas prestaciones de dimensiones 160x40x40 mm³ usando diferentes dosificaciones. Se usó arena silíceas como único árido, con un

tamaño medio de partícula de 0.75 mm, densidad entre 2400-2600 kg/m³ y contenido de SiO₂ superior al 98%. Se utilizó un cemento Portland tipo 1 CEM I 52.5R de acuerdo con la norma UNE-EN 197-1 (UNE, 2011), además de dos tipos de adiciones: metacaolín (MK), suministrado por la empresa SIKA bajo el nombre de Metamax, y humo de sílice (SF) Elkem Microsilica, también suministrado por la empresa SIKA .Además, se utilizó un aditivo superplastificante basado en policarboxilatos modificados con densidad de 1080 kg/m³, designado SikaViscocrete 20-HE, adecuado para dosificaciones con muy bajas relaciones agua/cemento. Adicionalmente se fabricaron algunas probetas de que incorporaban fibras de acero Dramix-OL, denominando al material UHPFRC .Las fibras tenían una longitud de 13 mm, un diámetro de 0.20 mm y su resistencia mínima a la tracción

era de 2.6 kN/mm², según los datos suministrados por el fabricante. Los diferentes materiales utilizados en la fabricación de los hormigones se muestran en la Figura 1.

En la mezcla de referencia utilizada en esta campaña experimental, designada como CONTROL, no se utilizaron adiciones. Para 1 m³ de hormigón se utilizaron 1100 kg de cemento, 17,6 kg de aditivo superplastificante (1,60% del peso de cemento) y una relación agua-cemento de 0,20. La relación entre el volumen de pasta y el volumen de áridos fue de 1,28 (56% correspondió al volumen de pasta, y 44% al volumen de áridos constituido únicamente por arena de sílice). El diámetro de escurrimiento obtenido en la mesa de sacudidas fue de 250 mm.

Se fabricaron probetas de HPC incluyendo adiciones para estudiar sus propiedades mecánicas y su relación con la microestructura. Se reemplazó parcialmente el contenido de cemento por diferentes porcentajes de adiciones: metacaolín (5%, 8% y 10%), humo de sílice (5%, 8% y 10%) y la combinación de metacaolín y humo de sílice (4%MK+4%SF). En todos los casos se mantuvo constante el peso total del conglomerante (cemento + adiciones = 1100 kg/m³ de hormigón), y se ajustó la cantidad de aditivo superplastificante para obtener el mismo diámetro de escurrimiento obtenido en la mesa de sacudidas para la mezcla CONTROL. Las dosificaciones utilizadas pueden observarse en la Tabla 1.

B. Preparación del hormigón

Todas las mezclas se prepararon utilizando una amasadora de morteros automática de laboratorio de dos velocidades. El tiempo total de amasado para cada mezcla fue de 4 minutos, siguiendo la secuencia de incorporación de materiales y los tiempos de amasado parciales que se muestran en la Tabla 2. Para el caso de las probetas que incorporaron fibras metálicas en su fabricación, éstas fueron añadidas al inicio del tiempo de reposo, manteniendo el resto de la secuencia igual a la que se utilizó para las mezclas de HPC.



Fig. 1. Materiales usados en la fabricación de HPC y UHPFRC. Tamaño de partículas y superficie específica.

TABLA I
DOSIFICACIONES DE HPC Y UHPFRC PARA 1 m³ DE HORMIGÓN Y RESULTADO DE SU DIÁMETRO EN EL ENSAYO DE ESCURRIMIENTO EN MESA DE SACUDIDAS

Material	CONTROL	5MK	8MK	10MK	5SF	8SF	10SF	4MK.4SF	CONTROL +fibras OL	4MK.4SF +fibras OL
Cemento (kg)	1.100,0	1.045,0	1.012,0	990,0	1.045,0	1.012,0	990,0	1.012,0	1.100,0	1.012,0
Humo de sílice (kg)	-	-	-	-	55,0	88,0	110,0	44,0	-	44,0
Metacaolín (kg)	-	55,0	88,0	110,0	-	-	-	44,0	-	44,0
Agua (kg)	220,0	220,0	220,0	220,0	220,0	220,0	220,0	220,0	220,0	220,0
Arena de sílice (kg)	1.211,0	1.211,0	1.211,0	1.211,0	1.211,0	1.211,0	1.211,0	1.211,0	1.187,4	1.187,4
Fibras de acero (kg)	-	-	-	-	-	-	-	-	70	70
Superplastificante (kg)	17,6	22,0	26,4	26,4	22,0	25,3	27,5	23,1	23,1	28,6
(% de conglomerante)	1,6%	2,0%	2,4%	2,4%	2,0%	2,3%	2,5%	2,1%	2,1%	2,6%
Vpasta/Váridos	1,28	1,30	1,32	1,32	1,31	1,33	1,34	1,32	1,30	1,33
D. escurrimiento (mm)	250	250	250	250	250	250	250	250	-	-

TABLA II
SECUENCIA DE AMASADO

Procedimiento	Tiempo (s)
1. Mezclar 75% de agua, cemento y adiciones. Amasado a velocidad lenta.	30
2. Añadir arena durante amasado a velocidad lenta.	30
3. Amasado a velocidad rápida.	30
4. Reposo. Añadir 25% de agua y superplastificante 20 segundos antes de finalizar periodo de reposo.	90
5. Amasado a velocidad rápida.	60

Las mezclas de HPC se vertieron en moldes metálicos en dos capas de igual espesor, compactando cada una de ellas con 120 golpes. Cada molde permite obtener tres probetas prismáticas de dimensiones 160x40x40 mm³. Las probetas se desmoldaron a las 24 horas y luego se introdujeron en una cámara de curado (temperatura de 20°C y humedad relativa por encima del 90%) hasta cumplir la edad a la que serán ensayadas.

C. Programa de ensayos

Inicialmente, se determinó la consistencia en estado fresco de cada una de las mezclas de HPC, previo al llenado de los moldes, mediante la mesa de sacudidas de acuerdo a la norma UNE-EN 1015-3 (UNE, 1999), manteniendo un diámetro de escurrimiento constante para todas las mezclas.

Las propiedades del hormigón endurecido se obtuvieron mediante ensayos de resistencia a flexión y compresión según norma UNE-EN 1015-11 (UNE, 2002) a edades de 2, 7, 28 y 91 días para las probetas de HPC, y a edades de 7 y 28 días para probetas con fibras Dramix-OL. Para estos ensayos se



Fig. 2. Equipos utilizados en los distintos ensayos: a) Resistencia a compresión, b) PIM, c) ATD-TG, d) Resistividad eléctrica.

utilizó una prensa hidráulica Ibertest, que posee una célula de carga con una capacidad máxima de 3000 kN.

Con el fin de relacionar los ensayos de resistencia a compresión con la microestructura de las matrices ensayadas, se realizaron ensayos de ATD-TG y de PIM a 28 días. Los ensayos ATD-TG contribuyen a la identificación y cuantificación de los geles C-S-H y la portlandita en las muestras, mientras que los ensayos de PIM tuvieron por objetivo caracterizar la estructura porosa del material. Adicionalmente, se realizaron mediciones de resistividad eléctrica, según la norma UNE 83988-1 (UNE, 2008), que proporcionan una medida indirecta del grado de porosidad y la conectividad de la red porosa de las muestras. Los equipos utilizados en los diferentes ensayos contemplados en esta investigación se muestran en la Figura 2.

III. RESULTADOS Y DISCURSIÓN

A. Caracterización en estado fresco

Al realizar el ensayo de escurrimiento mediante mesa de sacudidas según la norma UNE-EN 1015-3 (UNE, 2002) se obtuvo un diámetro de 250mm para la mezcla de control. La cantidad de aditivo superplastificante usada en cada mezcla fue la necesaria para obtener una mezcla homogénea y sin segregación de materiales, con la fluidez y consistencia similar a la de la mezcla CONTROL.

B. Resistencia a compresión

La evolución de la resistencia a compresión de las distintas mezclas se muestra en la Figura 3. En todos los casos se puede apreciar un rápido incremento de la resistencia a edades tempranas, alcanzando valores en torno a 100 MPa a 2 días (70-80% de las resistencias obtenidas a 28 días, en correspondencia con el tipo de cemento empleado). En la Figura 3a (probetas con 5%, 8% y 10% de MK) se puede apreciar que entre los 7 y los 28 días las curvas 8MK y 10MK tienen pendientes similares y mayores a la pendiente de la curva 5MK, lo que indica una mejor evolución de la resistencia a compresión en ese periodo. Entre 28 y 91 días la mayor pendiente de 10MK parece indicar que, a edades superiores a 91 días, esta dosificación incrementa su resistencia por encima de la 8MK. En la Figura 3b (probetas con 5%, 8% y 10% de SF) se observa que tanto entre 7 y 28 días como entre 28 y 91 días la pendiente de 10SF es mayor a las pendientes de 5SF y 8SF. Pese a que los valores de resistencia a compresión de 10SF son menores que los valores de 5SF y 8SF a edades tempranas (2 y 7 días) a edades posteriores su tasa de incremento es mayor, lo que indica una continuidad de la reacción puzolánica después de la edad de 7 días. Al comparar probetas con el mismo porcentaje de sustitución de cemento (Figura 3c), se evidencia una buena sinergia en la mezcla que combina MK y SF, superando a

edades tempranas y hasta después de los 28 días, los valores de MK y SF sin combinar. Luego, entre 28 y 91 días, la mayor pendiente de la curva 8SF hace suponer que un mayor porcentaje de SF en la combinación con MK podría significar incluso un incremento mayor al valor de 147 MPa obtenido a 91 días.

La Figura 3d muestra un incremento significativo de la resistencia a compresión con el uso de fibras Dramix-OL. En el caso de las probetas CONTROL-OL el incremento es de 20.6% a los 7 días y de 23.9% a los 28 días con respecto a las probeta CONTROL, mientras que en el caso de las probetas 4MK.4SF+OL el incremento de resistencia es de 19.7% y 22.0% a 7 y 28 días respectivamente, en relación a las probetas 4MK.4SF.

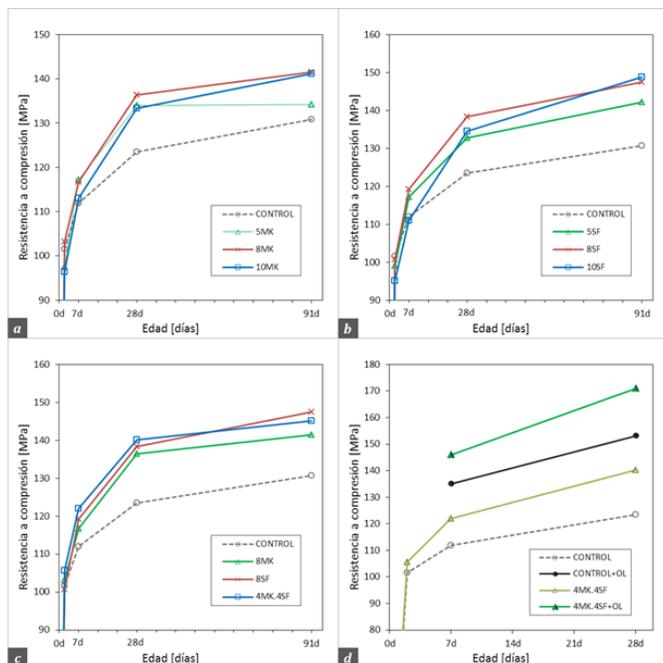


Fig. 3. Evolución de la resistencia a compresión: a) metacaolín 5, 8, 10%, b) humo de sílice 5, 8, 10%, c) comparativa 8% (MK, SF, MK+SF), d) con fibras Dramix-OL.

C. PIM

En las gráficas logarítmicas de intrusión diferencial de mercurio correspondientes a 28 días de curado se puede apreciar que el pico máximo de la muestra CONTROL se encuentra a la derecha del resto de curvas, lo que indica un mayor diámetro de poro característico o diámetro crítico en comparación a las mezclas que incluyen MK, SF o la combinación de estas adiciones. La muestra CONTROL mostró un diámetro crítico de 40nm, mientras que con el uso de adiciones el diámetro crítico disminuye hasta 21 mm en el caso de la muestra 8MK (Figura 4a).

En las curvas de volumen de intrusión acumulado que se grafican en la Figura 4b se observa el diámetro umbral de cada una de las muestras, que es el tamaño de poro a partir del cual

se aprecia un incremento considerable en el volumen intruido y coincide con el primer cambio apreciable en la pendiente de las mencionadas curvas (en este caso variaciones de la pendiente por encima del 2%). El diámetro umbral para la muestra de control es de 95nm aproximadamente, mientras que con el uso de adiciones este diámetro disminuye a 50nm para 8MK y 63nm para 4MK.4SF, y aumenta a 120nm en el caso de la muestra 8SF.

En la Figura 4c se muestra la distribución de la red porosa de cada una de las mezclas según el tamaño de poro, así como la porosidad total que se relaciona directamente con la cantidad de volumen de intrusión de mercurio. Tanto MK como SF y la combinación de estos permiten densificar la matriz de hormigón y eso se evidencia en la reducción de la porosidad total. El uso de estas adiciones también posibilita la reducción de capilares grandes, así como el incremento de capilares pequeños, como se observa en la Figura 4c, y estas variaciones en la configuración de la red porosa están relacionadas con la resistencia a compresión y la durabilidad.

D. ATD-TG

En la Figura 5 se muestran curvas termogravimétricas (TG) que representan la pérdida de masa con el incremento de temperatura, y curvas de las derivadas termogravimétricas (dTG) que representan la velocidad de la pérdida de masa. Con esta gráfica es posible analizar el grado de hidratación de las muestras, cuantificando la pérdida de agua relacionada con el gel CSH y la fase portlandita (CH).

En la mencionada figura se muestra bandas características acotadas por rangos de temperatura. La primera banda, denominada T1 (140°C a 430°C), corresponde a la zona de deshidratación (Ldh) donde se produce la pérdida de agua combinada con el gel C-S-H, aluminatos y sulfoaluminatos. Antes de esta zona se produce la pérdida de agua libre aproximadamente a 100°C, seguida de la pérdida de agua interlaminar alrededor de 120°C. La segunda banda, denominada T2 (430°C a 530°C), corresponde a la zona de deshidroxilación (Ldx) en la que se pierde el agua combinada con la portlandita (CH). Por último, en la banda denominada T3 (530°C y 1105°C), se tiene la zona de descarbonatación (Ldc) que está marcada por la pérdida de CO₂ debida a la descomposición de los carbonatos.

Para el cálculo del agua combinada total o químicamente enlazada (W_B), cuyos valores se observa en la tabla de la Figura 5, es necesario considerar un porcentaje de las pérdidas de peso en la zona de descarbonatación (41% de Ldc), además de las pérdidas producidas en Ldh y Ldx. Este porcentaje adicional se le atribuye a la portlandita (CH) carbonatada, por lo que la cantidad de CH equivalente estará dado por el porcentaje de pérdidas en T2 más el 41% de las pérdidas en T3. El grado de hidratación α estará directamente relacionado con el total de agua combinada ($\alpha = W_B/0.24$) (Bhatty, 1986;

TABLA III
RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN, PIM, ATD-TG Y RESISTIVIDAD ELÉCTRICA

Ensayos/parámetros		Und.	CTRL	8MK	8SF	4MK.4SF
Resistencia a compresión		[Mpa]	125	138	139	137
PIM	Porosidad total	[%]	8,99	7,98	6,13	6,26
	Capilares pequeños GEL	[%]	0,15	0,39	0,39	0,34
ATD-TG	Gel CSH	[%]	2,84	3,14	3,30	3,12
	Gel CSH/CH total		1,17	1,34	1,30	1,37
Resistividad eléctrica		[Ω .m]	194	2150	2400	2485

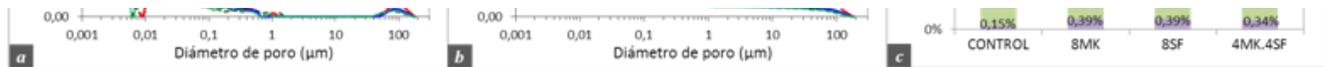


Fig. 4. Resultados de PIM a 28 días. a) curvas de logaritmo de intrusión diferencial. Diámetro crítico. b) curvas de intrusión acumulada. Diámetro umbral. c) Distribución de la red porosa y porosidad total.

Monteagudo et al., 2014). Los valores de α , y de la relación gel CSH/portlandita total, también se detallan en la tabla de la Figura 5. En todas las muestras se observan valores α similares al de la muestra de control, mientras que la relación gel/portlandita es mayor en las muestras con adiciones lo que evidencia una relación entre la formación de gel C-S-H y la resistencia a compresión.

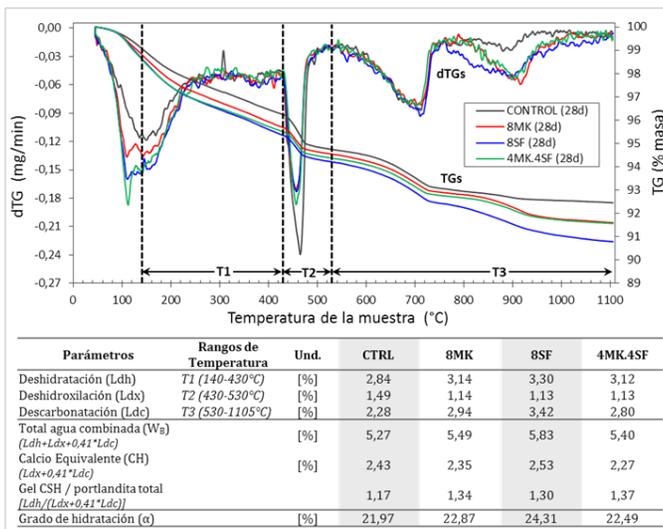


Fig. 5. Curvas TG y dTG. Parámetros de ensayos de PIM.

E. Resistividad eléctrica

Los ensayos de resistividad se realizaron con las probetas a la edad de 28 días, utilizando las mismas probetas que luego fueron sometidas a ensayos a flexión y compresión. Los ensayos realizados en probetas que contenían sustituciones de MK, SF y la combinación de ambas adiciones, mostraron valores de resistividad muy altos en comparación con la muestra de CONTROL, lo que presupone una mayor durabilidad por tener una menor porosidad conectada, que debe ser contrastada con ensayos específicos de durabilidad,

como son la migración y difusión de cloruros, y la carbonatación. Los resultados de los ensayos de resistividad se pueden apreciar en la Tabla 3, en donde también se incluye un resumen de los resultados de los diferentes ensayos realizados.

IV. CONCLUSIONES

Los ensayos desarrollados en el presente trabajo sustentan la relación que existe entre la resistencia a compresión y la microestructura de las diferentes probetas de hormigón de altas prestaciones, como puede apreciarse en la Tabla 3. El uso de adiciones como el metacaolín y el humo de sílice en hormigón, contribuyen a la mejora de sus propiedades mecánicas y durabilidad.

El incremento de resistencia a compresión resultante del uso de metacaolín y humo de sílice está relacionado con la densificación de la matriz que evidencia un refinamiento de la estructura porosa, en donde destaca el incremento de capilares pequeños y la reducción de capilares grandes.

La mayor cantidad de gel C-S-H que se produce con el uso de metacaolín y humo de sílice, así como el incremento de la relación gel/portlandita, guardan relación directa con el incremento de capilares pequeños y reducción de poros grandes, y este conjunto a su vez se relaciona con el incremento de resistencia a compresión.

La mayor resistencia al paso de cargas eléctricas encontrado en las probetas que contienen metacaolín y humo de sílice guarda relación con la menor porosidad de las matrices de hormigón y esto a su vez se relaciona con la durabilidad.

El uso de fibras de acero mejora la resistencia a compresión y flexotracción del hormigón, alcanzando valores que les permiten ser catalogados como UHPFRC.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Ministerio de Economía y Competitividad la concesión del Proyecto BIA 2016-78742-C2-2-R para la realización de este trabajo. Julio A. Paredes

agradece a la Fundación Agustín de Betancourt la concesión de un contrato predoctoral.

REFERENCIAS

- Bhatty, J. (1986). "Hydration versus strength in a portland cement developed from domestic mineral wastes-A comparative study", *Thermochemica Acta*, vol. 106, pp. 93-103.
- Hirschi, T. y Wombacher, F. (2008). «Influence of different superplasticizers on UHPC,» de *Proceedings of the Second International Symposium on Ultra High Performance Concrete*, Kassel.
- Larrard, F. de y Sedran, T. (1994). «Optimization of ultra-high-performance concrete by the use of a packing model,» *Cement and Concrete Research*, vol. 24, n° 6, pp. 997-1009.
- Lee, N. K., Koh, K. T., Kim, M. O. y Ryu, G. S. (2018). «Uncovering the role of micro silica in hydration of ultra-high performance concrete (UHPC),» *Cement and Concrete Research*, 104, pp. 68-79.
- Monteagudo, S.M., Moragues, A., Gálvez, J.C. y Casati, M.J. (2014). "The degree of hydration assessment of blended cement pastes by differential thermal analysis. Morphological evolution of the solid phases", *Thermoquímica Acta*, 592, pp. 37-51.
- Naaman, A. E. y Wille, K. (2012). «The path to ultra-high performance fiber reinforced concrete (UHP-FRC): five decades of progress,» *Proceedings of Hipermat*, pp. 3-15.
- Oertel, T., Hutter, F., Tänzer, R., Helbig, U. y SEXTL, G. (2013). «Primary particle size and agglomerate size effects of amorphous silica in ultra-high performance concrete,» *Cement and Concrete Composites*, vol. 37, pp. 61-67.
- Oertel, T., Helbig, U., Hutter, F., Kletti, H. y SEXTL, G. (2014). «Influence of amorphous silica on the hydration in ultra-high performance concrete,» *Cement and Concrete Research*, vol. 58, pp. 121-130.
- Richard, P. y Cheyrezy, M. (1995). «Composition of reactive powder concretes,» *Cement and concrete research*, vol. 25, n° 7, pp. 1501-1511.
- Shi, C., Wu, Z., Xiao, J. W. D., Huang, Z. y Fang, Z. (2015). «A review on ultra high performance concrete: Part I. Raw materials and mixture design,» *Construction and Building Materials*, vol. 101, pp. 741-751.
- UNE-EN 197-1 (2011). *Cemento. Parte 1: Composición, especificaciones y criterios de conformidad de los cementos comunes.*
- UNE-EN 1015-3 (1999). *Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 3: Determinación de la consistencia del mortero fresco (por la mesa de sacudidas).*
- UNE-EN 1015-11 (2002). *Método de ensayo de los morteros de albañilería. Parte 11: Determinación de la resistencia a flexión ya compresión del morteros endurecido.*
- UNE 83988-1 (2008). *Concrete Durability - Test Methods - Determination Of The Electrical Resistivity - Part 1: Direct Test (Reference Method).*, Madrid, España: Asociación Española Normalización y Certificación (AENOR).
- Wang, D., Shi, C., Wu, Z., Xiao, J., Huang, Z. y Fang, Z. (2015). «A review on ultra high performance concrete: Part II. Hydration, microstructure and properties,» *Construction and Building Materials*, vol. 96, pp. 368-377.



Reconocimiento – NoComercial (by-nc): Se permite la generación de obras derivadas siempre que no se haga un uso comercial. Tampoco se puede utilizar la obra original con finalidades comerciales.