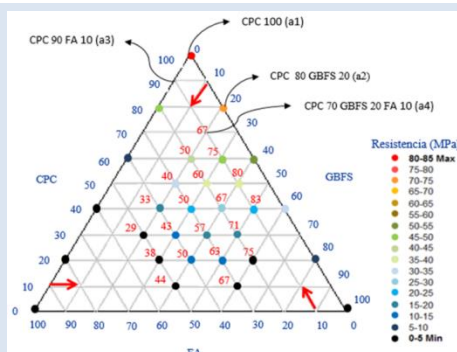


ANÁLISIS SUPERFICIAL TOPOGRÁFICO DE PASTAS Y CONCRETOS DE CEMENTO COMERCIAL ADICIONADO

Oscar Gutiérrez-Junco^{1*}, Yaneth Pineda-Triana², Enrique Vera-López²

1: Facultad de Ingeniería, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Tunja, Colombia. 2: Instituto para la Investigación e Innovación en Ciencia y Tecnología de Materiales INCITEMA - Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Tunja, Colombia.

*e-mail: oscarjavier.gutierrez@uptc.edu.co



RESUMEN

Este artículo presenta los resultados de la evaluación de propiedades de cementantes elaborados a partir de la mezcla de cemento portland comercial (CPC), ceniza volante (FA) y escoria de alto horno (GBFS). Inicialmente un total de 30 diferentes combinaciones fueron evaluadas en términos de resistencia a la compresión de pasta cementante para establecer las proporciones óptimas de mezclas binarias y ternarias de las materias primas. Como resultado, cuatro mezclas optimizadas, en representación de las combinaciones más deseables de estos materiales, fueron caracterizadas durante el proceso de fraguado y endurecimiento. La evolución de la resistencia a la compresión fue investigada en especímenes de mortero y concreto. Los resultados mostraron que cementos comerciales mezclados con ceniza volante y escoria de alto horno, como los usados en esta investigación, presentan un comportamiento disminuido en resistencia mecánica, respecto al CPC, ocasionado fundamentalmente por la presencia de adiciones incorporadas en fábrica, las cuales disminuyeron la posibilidad de reacción de la FA y la GBFS agregadas en este trabajo. Finalmente los concretos y las pastas de cementante fueron observados a diferentes edades bajo el microscopio óptico de alta resolución. El análisis superficial topográfico realizado en las pastas permitió relacionar las capacidades cementantes de los materiales con detalles topográficos, destacándose una mayor intensidad topográfica y menor uniformidad en la pasta con mayor cantidad de adición de FA y GBFS. Este cementante corresponde al usado en los morteros y concretos que obtuvieron las menores resistencias en las pruebas de compresión.

Palabras Claves: Análisis superficial topográfico, Cemento hidráulico adicionado, Materiales cementantes suplementarios.

TOPOGRAPHICAL SURFACE ANALYSIS OF PASTE AND CONCRETE MADE WITH BLENDED COMMERCIAL CEMENT

ABSTRACT

This paper presents the findings of the evaluation of the properties of cementing materials elaborated by mixing commercial Portland cement (CPC), fly ash (FA) and blast furnace slag (GBFS). Initially, a total of 30 different samples of mixes were evaluated in terms of compressive strength in order to determine the optimal proportions of binary and tertiary mixtures of the raw materials. As a result, four representative blends of the optimal combinations were characterized during the setting and hardening process. The compressive strength development of mortar and concrete samples was studied. The findings of this analysis show that the commercial cement blended with fly ash and blast furnace slag presents a decrease in the mechanical strength behaviour regarding to CPC, because of the existing additions incorporated by the manufacturer, which decreased the possibility of FA and GBF reactions. Finally, concrete and cementing pastes were analysed with a high resolution microscope during different ages. The superficial topographic analyses of the mortar allow us to relate the cementitious capacities of the materials with the topographic details, highlighting the high topographic intensity and low uniformity in the mortar with the addition of FA and GBFS. The cementing material corresponded to the one used in mortars and concrete which got the lowest strength results in the compression test.

Keywords: Topographical surface analysis, Blended hydraulic cement, Supplementary cementitious materials.

1. INTRODUCCIÓN

La combinación de materiales cementantes suplementarios (SCMs) con cemento portland ordinario (OPC) ha mostrado importantes ventajas técnicas, económicas y ambientales [1,2]. Sin embargo, la reactividad de la mezcla está directamente influenciada por los tipos, calidades y proporciones de las materias primas utilizadas [3].

La ceniza volante (FA) es un subproducto de las estaciones termoeléctricas y la escoria granulada de alto horno (GBFS) un subproducto de la industria del acero. Ambos materiales son SCMs. Respecto a la escoria granulada, McCarter *et al.* [3] y Fonseca *et al.* [4], indican que el nivel de remplazo más utilizado está en el intervalo de 35-65% por peso del total de material cementante. El comité 233 del ACI [5] explica el mecanismo de reacción del cemento adicionado con escoria, mencionando que el principal producto de hidratación es esencialmente el mismo producto principal formado cuando las pastas de OPC se hidratan, o sea silicato de calcio hidratado (CSH). Se produce entonces una densificación de la pasta de cemento, debido al relleno de poros capilares con gel CSH de baja densidad. Sobre la ceniza volante, Özbay *et al.* [6], menciona que es el mineral de mezcla más comúnmente disponible entre los diferentes SCMs. Shaikh y Supit [7], afirman que en aplicaciones generales el remplazo de OPC por FA está limitado a un intervalo de 15 a 20%. De acuerdo con el informe técnico ACI 232.2R [8], el proceso de reacción es similar a la hidratación del cemento portland ya que se produce CSH y aluminatos de calcio hidratados pero a partir de la reacción puzolánica entre la ceniza, el hidróxido de calcio y los álcalis en el concreto.

Flatt *et al.* [9], exponen que la cinética de la hidratación de los cementos adicionados, no está dada por la superposición de las cinéticas de hidratación de sus componentes tomados individualmente. La mezcla de OPC con adiciones conduce a productos de hidratación más complejos que los del solo OPC, debido a la coexistencia de múltiples interdependientes y reacciones simultáneas [4].

Muchas investigaciones llevadas a cabo sobre el uso de la escoria y ceniza (solo escoria o combinación de escoria y ceniza) como sustitución parcial del OPC, indican la baja resistencia a la compresión a

edades tempranas (1 a 7 días) debido a la lenta velocidad de hidratación de la escoria y ceniza. Sin embargo a edades tardías (después de los 28 días y hasta los 365 días) muestran mejores resultados que los concretos de solo OPC [10,11]. De igual manera, se ha comprobado en otras investigaciones que las resistencias disminuyen gradualmente a medida que el nivel de remplazo aumenta. Esto puede ser atribuido al hecho de que el OPC es substituido por adiciones minerales, lo cual conduce a la reducción del contenido de CaO disponible, y en consecuencia la formación inicial de gel CSH se inhibe [12]. Similares conclusiones son mencionadas por Ahmaruzzaman [13] y Juenger y Siddique [14], sobre la sustitución parcial de OPC por ceniza. Ahmaruzzaman [13] afirma que en general las propiedades mecánicas a largo plazo de los concretos con ceniza volante son más altas que las de los concretos con cemento portland debido a la reacción puzolánica; sin embargo, las tasas de fraguado y endurecimiento de los concretos con ceniza a edades tempranas son más lentas, debido a la dilución del cemento.

Algunas críticas a los cementos adicionados con materiales alternativos, mencionadas por Flatt *et al.* [9], son sus bajas resistencias iniciales, las limitadas reservas de adiciones activas y los remplazos reducidos de adiciones no activas, o pobremente reactivas, sin que afecten de manera importante a la resistencia final. De igual manera, se cuestiona su resistencia a la carbonatación.

Según Schneider *et al.* [15], el desarrollo de cementos con varios constituyentes principales, sustituyendo parcialmente el contenido de clinker con SCMs, ha hecho que la producción de OPC disminuya en el tiempo. Un caso particular de estudio, es el caso Colombiano, en el cual las cementeras denominaban su producto acorde a la norma de cemento portland ASTM C150 [16], pero elaboraban el cemento, en algunos casos, usando un modelo de cemento adicionado. Con la expedición de la norma técnica Colombiana NTC 121 de 2014 [17], se rectificó la incongruencia mencionada. En ese contexto, el presente trabajo evalúa un conjunto de propiedades de un cemento diseñado por desempeño (sin restricción en su composición), comercializado en Colombia como portland Tipo I (CPC), y lo comparara con las prestaciones de cementantes elaborados a partir de la combinación del mismo CPC con adiciones de ceniza y escoria.

Se destaca la relación entre la capacidad cementante de los materiales estudiados y los detalles topográficos en pastas y concretos determinados con un análisis superficial topográfico.

Existe una diversa gama de equipos y software para hacer análisis superficiales de la topografía de los materiales [18]. La topografía está relacionada con la morfología o configuración de una superficie. A partir de imágenes de la superficie de la muestra es posible hacer análisis sistemáticos que hacen más objetiva la caracterización del concreto desde el aspecto de su topografía superficial, teniendo en cuenta el efecto de influencias externas sobre la microestructura, así como posibles relaciones con propiedades del material. Diferentes metodologías han sido reportadas para estudiar este tema, en materiales a base de cemento, usando por ejemplo microscopía óptica, microscopía electrónica de barrido, microscopía de fuerza atómica, y escaneo láser 3D [19-25]. La descripción de la topografía de la superficie o relieve conlleva el uso de perfiles 2D y superficies espaciales 3D elaboradas con imágenes espaciales de diferentes características (por ejemplo mapas de contorno, mapas multicolor, e isométricos). Una de las posibilidades es el uso del microscopio óptico de alta resolución Leica [26].

2. PARTE EXPERIMENTAL

2.1 Materiales

Cemento portland comercial (CPC) etiquetado como tipo I [16] y tipo GU [27], producido por una cementera nacional. Ceniza volante (FA) obtenida de la central termoeléctrica “TERMOPAIPA”, la cual emplea carbón bituminoso pulverizado. Se localiza en el departamento de Boyacá, Colombia. Escoria granulada de alto horno (GBFS) obtenida en la empresa “Acerías Paz del Río S.A.”, localizada en el departamento de Boyacá, Colombia. Antes de ser usada, la escoria fue deshidratada y molida en seco. Luego tamizada a través del tamiz de 250 μm . Agregados calizos (Tamaño máximo nominal 25,4 mm), arena lavada (Módulo de Finura 2,24) y arena normalizada 20-30 (Equivalente arena de Ottawa). Agua estándar usada para la elaboración de las mezclas y el curado. Aditivo líquido fluidificante a base de policarboxilatos.

2.2 Preparación de especímenes

Se elaboraron 270 cubos (de 50,8 mm de lado) de pasta cementante, repartidos en 30 combinaciones

de CPC, FA y GBFS, y 3 fechas de prueba. Se usó una relación agua/cementante (a/cm) fija de 0,277, aumentando la fluidez de las mezclas secas (mezclas con FA) con el aditivo. La relación a/cm fija se determinó a partir del ensayo de consistencia normal del CPC siguiendo las pautas de la norma ASTM C187:98 [28].

Se elaboraron 48 especímenes cúbicos de mortero (de 50,8 mm de lado), repartidos en 4 combinaciones de CPC, FA y GBFS, y 4 fechas de prueba. Se usó la arena normalizada y una relación a/cm fija de 0,56 correspondiente a la fluidez de $110 \pm 5\%$ para el CPC [29].

Las demás condiciones de elaboración de los cubos de ensayo se definieron a partir de la norma ASTM C109M:99 [30].

Adicionalmente se elaboraron 60 cilindros de 10 cm de diámetro por 20 cm de altura, repartidos en 4 combinaciones de CPC, FA y GBFS, y 5 fechas de prueba. La relación entre cementante, arena lavada y grava fue de 1:2,4:3,5 y la relación a/cm de 0,58. La norma de referencia fue la ASTM C192/C192M-00 [31].

Un total de tres probetas fueron moldeadas por cada tipo de mezcla, y por cada fecha de ensayo. Los cubos se colocaron en un estado similar de saturación de agua a las 24 h y se mantuvieron de esa manera hasta la fecha del ensayo. Por su parte los cilindros fueron curados sumergidos en agua por 28 días, luego fueron mantenidos hasta el día de la falla, en un ambiente de exposición atmosférica bajo techo y ventilado, a temperatura de 17 °C y humedad relativa de 57% en promedio.

2.3 Técnicas de caracterización y procedimiento experimental

En el presente artículo se incluye los resultados de los siguientes ensayos de caracterización de materias primas: microscopía electrónica de barrido (SEM), con el equipo Leo 410, con vacío en la cámara de $9,85 \times 10^{-5}$ Torr, corriente en el filamento de 1,2 nA y voltaje en el ánodo de 15 kV; análisis de fisisorción de nitrógeno (BET) a 77 K, con previa limpieza de la muestra a 373 K con el equipo Micromeritics ASAP 2020; mediciones de superficie específica con el aparato de Blaine de acuerdo a la norma ASTM C204 [32]; densidad según la norma ASTM C188 [33]; y espectrometría de fluorescencia (XRF), en un equipo PANalytical MiniPal 2, con tubo de Rhodio, trabajando a 10 kV

y 0,002 mA, durante 180 s. Adicionalmente a la ceniza volante se le practicaron los llamados análisis inmediatos del carbón y del coque [34], los cuales corresponden a la evaluación de los porcentajes de humedad, ceniza, materia volátil y carbono fijo.

En cuanto al procedimiento experimental, como punto de partida para la dosificación de las probetas de mortero y concreto, se realizó una serie de pruebas de resistencia a la compresión de cubos de pasta cementante, elaborados con diferentes proporciones de CPC, GBFS y FA. El objetivo de estos ensayos, fue encontrar proporciones óptimas para la combinación binaria y ternaria de los cementantes desde el punto de vista de la resistencia mecánica, para ser usadas en la elaboración de los morteros y concretos. La dependencia entre las resistencias de los concretos, morteros, y el cemento empleado para su elaboración, mencionada por Galán [35], permite hacer esta clase de optimización. Para realizar esto, se evaluó la resistencia a la compresión de 30 dosificaciones de pasta con diferente contenido de CPC, FA y GBFS, a 3, 28 y 56 días de elaboración. La comparación entre las resistencias permitió establecer un patrón de comportamiento general de la resistencia mecánica respecto a las proporciones de las materias primas. Con los mejores resultados y considerando una sustitución mínima del 10% de adición, se definieron las cuatro composiciones para ser usadas en la elaboración de los cementantes de los morteros y concretos (dos combinaciones binarias, una ternaria, y el cementante CPC de referencia).

Se realizaron ensayos de caracterización a los cuatro tipos de cementante seleccionados: determinación de la consistencia normal con el aparato de Vicat, siguiendo el procedimiento de la norma ASTM C187 [28], el cual evalúa la cantidad de agua requerida para obtener una pasta de cementante con una consistencia estandarizada, considerada óptima en términos de fluidez y plasticidad; tiempos de fraguado con la norma ASTM C191 [36], para caracterizar el tiempo en que la pasta tarda en pasar de estado plástico a sólido; y medición del calor de hidratación, a partir del comportamiento térmico de las pastas, de acuerdo con las recomendaciones del método semi-adiabático de la norma BS EN 196-9 [37].

Seguidamente, el programa de pruebas comprendió el monitoreo de la resistencia mecánica de los morteros (cubos) siguiendo la norma ASTM C109

[30], a 3, 7, 28 y 56 días, y de los concretos (cilindros) con la norma ASTM C39 [38], a 3, 7, 28, 56 y 118 días de elaboración, usando las cuatro composiciones cementantes elegidas, con miras a evaluar la participación de la FA y de la GBFS.

Finalmente los concretos y pastas de cementante fueron analizados a diferentes edades con el microscopio óptico de alta resolución Leica Modelo DVM2500. El proceso de evaluación es descrito en la sección 3.3, donde adicionalmente se incluyó en el análisis un paralelo con concreto carbonatado.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Caracterización de materias primas

Las micrografías (SEM) de los tres materiales cementantes utilizados en el estudio se presentan en la Figura 1.

Las microestructuras presentan aspectos que han sido documentados en otros estudios. El CPC muestra variedad de tamaños de partículas dentro de los rangos usuales. La FA muestra sus típicas partículas esféricas con superficies suaves. Se destaca el mayor tamaño estructural de la GBFS respecto a los otros dos cementantes junto con su morfología angular.

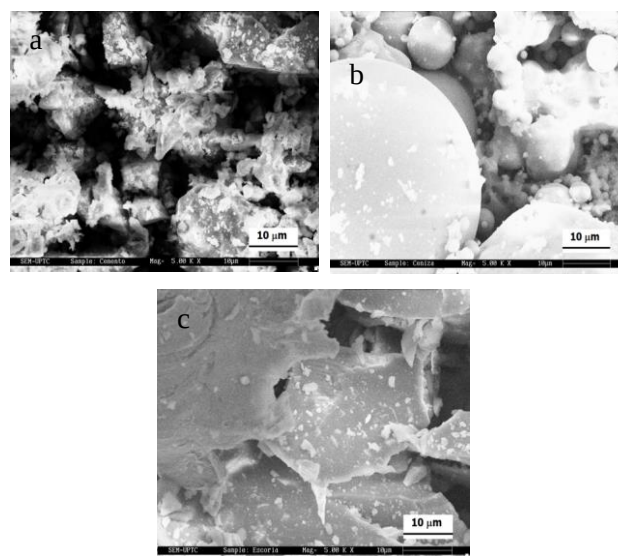


Figura 1. Micrografías SEM de materiales anhidros a un aumento de 5000x (a) CPC; (b) FA; (c) GBFS.

En cuanto a las superficies específicas evaluadas con el permeabilímetro de Blaine, los resultados encontrados fueron para el CPC, 4230 cm²/g, para la FA, 4640 cm²/g, y para la GBFS, 1240 cm²/g. La GBFS, por su menor área superficial, bajo las

condiciones específicas de molienda del presente estudio, presenta la condición más desfavorable para la reacción hidráulica.

En el análisis de fisisorción de nitrógeno, siguiendo el tratamiento matemático propuesto por BET (Brunauer, Emmett y Teller), se obtuvieron los resultados indicados en la Tabla 1.

Tabla 1. Análisis de fisisorción de las materias primas cementantes.

Material	Área superficial (m ² /g)	Volumen de poro (cm ³ /g)	Tamaño de poro (nm)
CPC	2	0,002	16,9
FA	5	0,010	7,9
GBFS	0,5	0,003	25,48

La reactividad de los materiales cementantes depende de una combinación de factores, tales como la composición química, mineralógica y la finura. Sobre este último, el método de finura Blaine y el análisis de fisisorción coinciden en que la GBFS tiene la menor área superficial. Por su parte la FA, con su mayor área superficial y mayor volumen de poro, hace que las mezclas que contienen CPC-FA demanden más agua para generar manejabilidades comparables a las de las mezclas de solo CPC y de CPC-GBFS. Esta es la razón por la cual fue necesario usar el aditivo plastificante en las pastas con FA, logrando así las manejabilidades requeridas sin agua adicional.

La evaluación de las densidades reportó para el CPC 2,90 g/cm³, para la FA 2,06 g/cm³, y para la GBFS 2,86 g/cm³. El valor inferior de la densidad del CPC comparado con el ~3,15 g/cm³ del OPC (portland puro), da un indicativo del alto contenido de adiciones original del CPC.

En la Tabla 2 se presenta el análisis de óxidos de los materiales cementantes evaluados mediante espectrometría de fluorescencia de rayos X (XRF).

El CPC muestra altos contenidos de CaO y SiO₂, compuestos importantes para la generación de silicatos de calcio hidratados. En la FA se destaca el SiO₂ y el Al₂O₃. Atendiendo al contenido de CaO la FA se puede clasificar como baja en CaO (menor a 10%), siendo esto característico en la combustión de antracita y carbones bituminosos. La actividad hidráulica de las cenizas es mayor conforme

aumenta el contenido de CaO. La GBFS se puede clasificar como una escoria básica al tener una relación CaO/SiO₂ superior a 1, lo cual es favorable en términos de reactividad (potencial hidráulico). Sobre este aspecto la literatura recomienda que la relación en masa (CaO+MgO)/SiO₂ de la escoria sea superior a 1 y que esté constituida por al menos dos tercios de la suma de CaO, MgO y SiO₂.

Los resultados de los análisis inmediatos aplicados a la FA se presentan en la Tabla 3.

Tabla 2. Análisis de óxidos de los materiales cementantes (% en peso).

	CPC	FA	GBFS
SiO ₂	16,51	60,78	33,72
CaO	60,5	0,73	43,93
Al ₂ O ₃	3,6	22,3	16,26
MgO	0,99	0,54	1,36
Fe ₂ O ₃	1,73	4,8	1,07
SO ₃	2,7	- ^a	0,99
MnO	0,03	-	1,36
K ₂ O	0,28	1,57	0,32
TiO ₂	0,13	1,09	0,49

Tabla 3. Análisis inmediatos de la FA.

Parámetro	% en peso
Humedad (H) ^a	0,8%
Ceniza residual ^b	89,04%
Materia volátil (MV) ^c	1,7%
Carbono fijo (CF) ^d	8,46%
Total inquemados ^e	10,16%
Total de pérdidas por calcinación ^f	10,96%

a: ASTM D3173; b: ASTM D3174; c: ASTM D3175; d: ASTM D3172; e: CF+MV; f: CF+MV+H.

Considerando los requisitos químicos de la norma ASTM C618 [39], la FA se puede clasificar como de tipo F. Esta norma presenta un límite máximo de 6% para la pérdida al fuego, no obstante, establece también la posibilidad de usar puzolanas hasta con un 12% de pérdida al fuego en algunos casos. El contenido de carbón en la FA es un resultado de la combustión incompleta del carbón y aditivos orgánicos usados en el proceso de recolección. En su gran mayoría el total de inquemados es carbón

sin quemar.

3.2 Optimización y desempeño de las mezclas

Los resultados de resistencia a la compresión encontrados a 3, 28 y 56 días, para las mezclas binarias de pasta, se presentan en las Figuras 2 y 3. Las mezclas con 100% GBFS, 80% FA y 100% FA no desarrollaron la resistencia necesaria a las 24 horas para poder realizar el posterior curado. La resistencia a la compresión aumenta a medida que aumenta el porcentaje de CPC. Nótese el desfavorable comportamiento de las mezclas con FA particularmente a partir del 40% de sustitución.

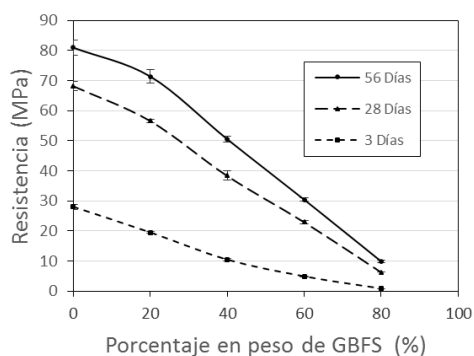


Figura 2. Resistencia a la compresión de cubos de pasta de CPC-GBFS.

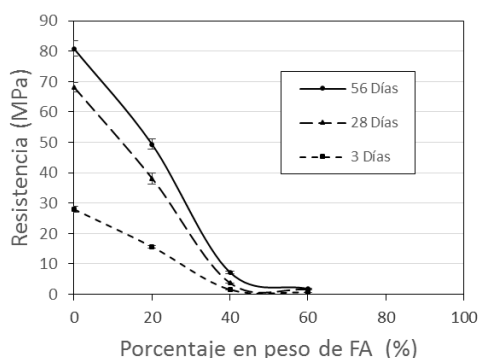


Figura 3. Resistencia a la compresión de cubos de pasta de CPC-FA.

Por su parte las mezclas ternarias de pasta presentaron las resistencias a 3, 28 y 56 días que aparecen en la Figura 4. En esta figura, la nomenclatura usada para identificar las combinaciones asigna porcentajes en peso al CPC (C), a la GBFS (G), y a la FA (F). De las 19 combinaciones ternarias elaboradas, cinco no dieron la solidez suficiente para poder realizar el proceso

de curado. En general, la resistencia a la compresión aumenta con el contenido de CPC y el porcentaje de GBFS resulta más favorable que el de FA.

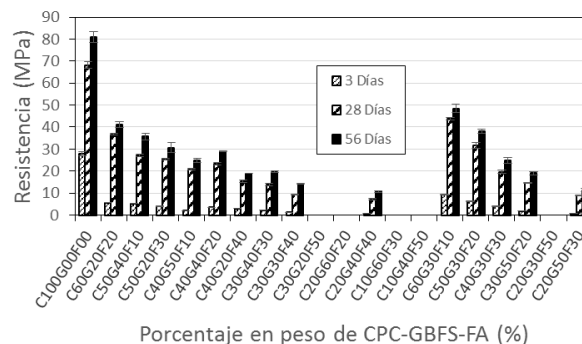


Figura 4. Resistencia a la compresión de cubos de pasta de CPC-GBFS-FA.

La Figura 5 presenta el comportamiento en el tiempo de las mezclas que desarrollaron mayores resistencias a la compresión. El mejor comportamiento lo presentó el cementante compuesto de 100%CPC, seguido del de 80%CPC+20%GBFS. Les sigue el comportamiento de las mezclas de 80%CPC+20%FA y 60%CPC+30%GBFS+10%FA.

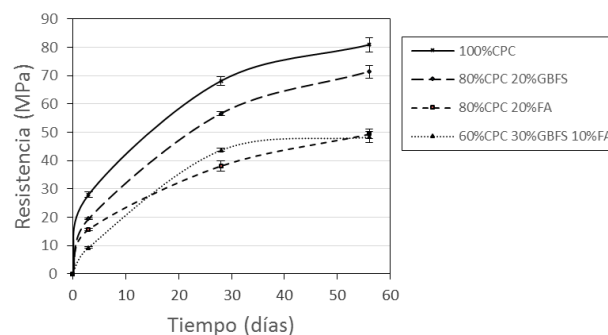


Figura 5. Evolución de la resistencia a la compresión de las cuatro mezclas de pasta con mayor desarrollo de resistencia.

La comparación de la resistencia a la compresión de las mezclas desarrollada hasta el momento permitió definir cuatro composiciones de cementante para ser utilizadas en la elaboración de los morteros y concretos (Tabla 4). Los cementantes a3 y a4 se plantearon en vista del bajo desempeño encontrado en las pastas con CPC-FA y CPC-GBFS-FA, respecto a la pasta de 100%CPC.

La Figura 6 muestra en un diagrama ternario todas las combinaciones empleadas en el análisis de

resistencia de cubos de pasta, incluyendo las cuatro combinaciones que finalmente se seleccionaron. Adicionalmente, se presenta para las combinaciones ternarias un parámetro referido en esta investigación como índice de escoria, dado por la relación $GBFS/(GBFS+FA)*100$, y definido como la cantidad de GBFS con respecto a la cantidad total de GBFS y FA. Se aprecia que para cada porcentaje de CPC parece haber un índice de escoria óptimo y que para la misma resistencia, un decremento en CPC corresponde a un incremento del índice de escoria.

Tabla 4. Cementantes seleccionados para pruebas en morteros y concretos.

Nombre del Cementante	Composición
a1	100%CPC (Referencia)
a2	80%CPC+20%GBFS
a3	90%CPC+10%FA
a4	70%CPC+20%GBFS+10%FA

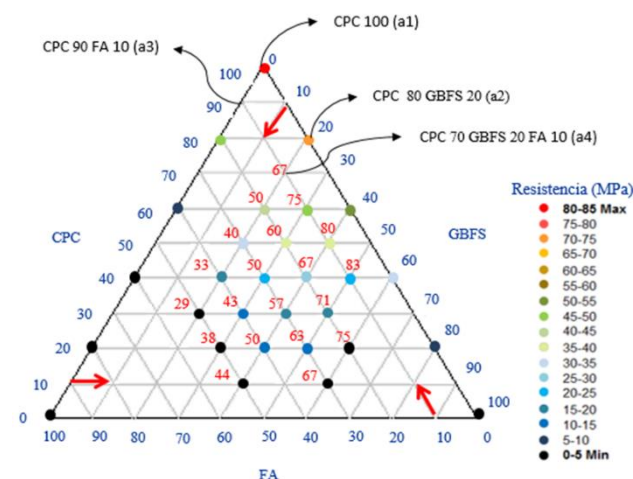


Figura 6. Diagrama ternario de combinaciones CPC-GBFS-FA, índices de escoria y resistencias a 56 días.

Se presenta a continuación los ensayos realizados con las mezclas seleccionadas a1, a2, a3 y a4.

La Tabla 5 muestra los resultados de los ensayos de consistencia normal y tiempos de fraguado. El resultado de consistencia normal de la pasta con cementante a3 muestra el efecto de la alta finura de la FA y por tanto de su elevada superficie específica, demandando la mayor cantidad de agua. Por su parte la GBFS con menor finura, disminuyó la cantidad de agua requerida para obtener la

consistencia normal en la pasta de cementante a2. El resultado de la pasta de cementante a4 sumó los efectos de la FA y la GBFS equiparándose con la pasta de referencia a1. Respecto a los tiempos de fraguado, la mezcla a4 (la más adicionada), presentó la menor velocidad e intensidad de las reacciones de hidratación, retrasándose tanto el inicio como el final del fraguado. La velocidad de endurecimiento fue similar para las otras mezclas.

Tabla 5. Ensayos realizados en pasta (consistencia normal y tiempos de fraguado).

Cementante	Consistencia normal (%)	Tiempo fraguado inicial (h)	Tiempo fraguado final (h)
a1	28,6	4,2	9,8
a2	26,0	4,2	9,8
a3	30,0	4,1	9,7
a4	28,5	4,7	10,7

La Figura 7 presenta el registro de penetraciones usado para la determinación de los tiempos de fraguado mediante el aparato de Vicat.

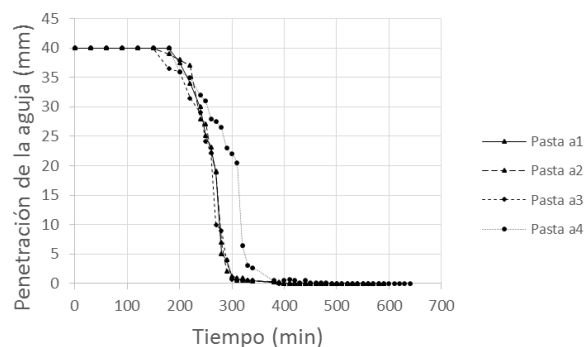


Figura 7. Ensayos de tiempos de fraguado de pastas.

El registro de cambio de temperatura en las pastas para la evaluación del calor de hidratación se presenta en la Figura 8. Este gráfico da origen al de pendientes $\Delta\text{Temperatura}/\Delta\text{Tiempo}$ mostrado en la Figura 9. Se observa que los tiempos de fraguado inicial y final concuerdan con el inicio del aumento de la pendiente de cambio de temperatura y con el valor pico de temperatura respectivamente. La Figura 10 presenta la evolución del calor emanado durante el ensayo y la Tabla 6 presenta los resultados de la evaluación del calor de hidratación.

Como resultado se tiene que el calor desprendido, en

la pasta de solo CPC, es más alto con respecto a las de CPC mezclado con adición. La pasta de cementante a1 presenta la mayor energía interna, lo que hace que sea el material de mayor reactividad y por tanto el más inestable y con mayor retracción. Le sigue la pasta de cementante a3 y luego la de a2. La pasta de cementante a4 tiene el menor calor de hidratación, lo que conlleva un menor riesgo de fisuramiento, cualidad deseada para estructuras de concreto en masa.

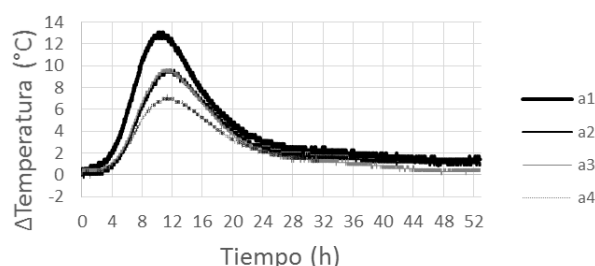


Figura 8. Registro de cambio de temperatura en las pastas.

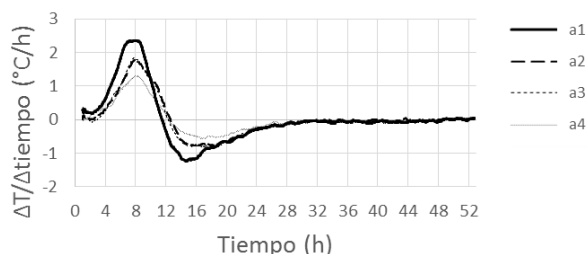


Figura 9. Pendientes de cambio de temperatura en el tiempo.

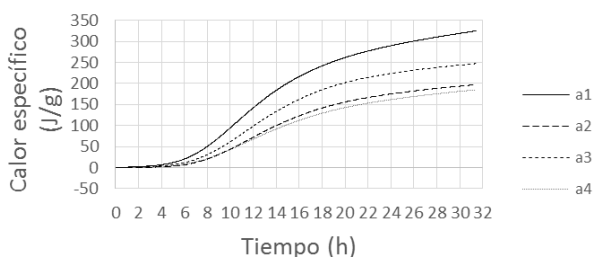


Figura 10. Calor específico acumulado en el tiempo.

Respecto a los morteros, todos se realizaron con la arena normalizada y con la cantidad de agua evaluada mediante el ensayo de fluidez del mortero de referencia (cementante a1). Nótese la mayor relación a/cm requerida para lograr fluidez de $110 \pm 5\%$ del mortero de referencia respecto a un mortero de cemento portland puro (0,56 vs $\sim 0,485$), indicativo de las adiciones originarias en el CPC.

Por su parte los concretos se elaboraron con cementante, arena lavada y grava, en relación 1:2,4:3,5 y relación a/cm de 0,58.

La Figura 11 muestra la resistencia a la compresión encontrada en los morteros con cementantes a1, a2, a3 y a4. De igual manera la Figura 12, pero para las probetas en concreto.

Tabla 6. Ensayo realizado en pasta (calor de hidratación – Método semi-adiabático).

Cementante	Cambio máximo de temperatura (°C)	Calor específico ^a (J/g)
a1	13,1	325
a2	9,9	197
a3	9,7	247
a4	7,7	185

a: Rango de tiempo 31,4 h.

Los morteros y concretos con cementante a2, a3 y a4 presentan, de manera concordante, disminución en sus propiedades mecánicas, con respecto a las probetas de referencia que utilizan solo el cemento de producción nacional (cementante a1). Esto puede justificarse en la inferior reactividad del CPC en combinación con las adiciones, indicando que el porcentaje de adición total en las mezclas (correspondiente a la que originariamente trae el CPC y la adicionada), es demasiado alto respecto a la cantidad y tipo de clinker presente en el CPC. Las mezclas con cementante a4 presentaron el menor potencial hidráulico debido al mayor contenido de adición.

El efecto del tipo de cementante en el comportamiento mecánico del mortero y del concreto, concuerda con los resultados encontrados en las pastas. Con menor concentración de adición las mezclas con cementante a3 lograron superar las resistencias de las mezclas con a2, a pesar del alto contenido de inquemados de la FA.

Los resultados de resistencia a largo plazo de los concretos muestran una leve tendencia al aumento, aunque hay que considerar que a partir del día 28 de elaboración de los cilindros, estos fueron retirados del ambiente de saturación húmeda para ser localizados en un ambiente de exposición atmosférica bajo techo y ventilado. No obstante se aprecia el efecto hidráulico de la humedad remanente en los cilindros y su secado progresivo

entre el día 28 y el 56.

En el caso de los morteros la tendencia al aumento de la resistencia se mantiene de manera significativa durante los 56 días de duración de las pruebas, tiempo en el cual los cubos estuvieron en condición de curado.

A edades tempranas, durante los primeros 28 días, las mezclas con solo CPC (pasta, mortero y concreto) presentan el mayor aumento de resistencia, indicando que la reacción hidráulica y puzolánica de las mezclas con adiciones es más lenta y menos efectiva. Mientras que los resultados a mediano y largo plazo de todas las mezclas muestran una tendencia similar.

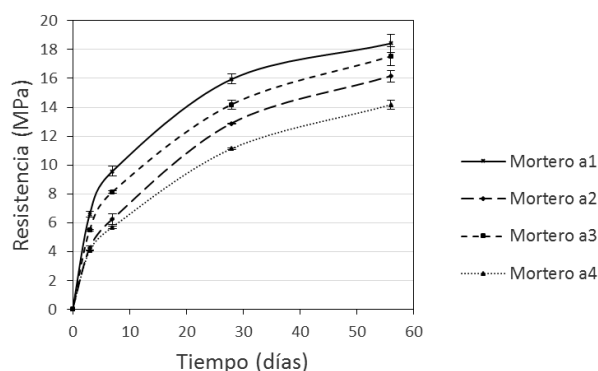


Figura 11. Evolución de resistencia de morteros.

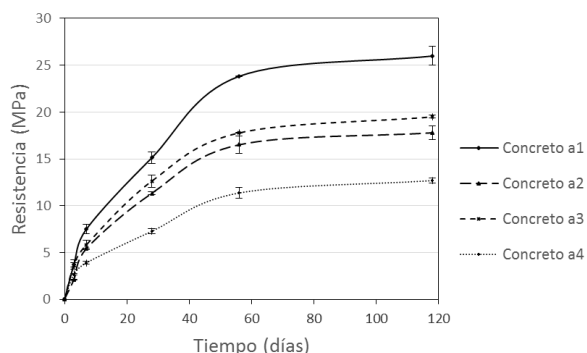


Figura 12. Evolución de resistencia de concretos.

3.3 Análisis superficial topográfico de los concretos

Los concretos elaborados con los cementantes a1, a2, a3 y a4 fueron analizados a diferentes edades con el microscopio óptico de alta resolución Leica Modelo DVM2500 [26]. Este equipo permite ver y analizar la geometría y la textura de las superficies. Entre sus funciones se encuentra el cálculo de parámetros de textura, y la generación de mapas en

altura e imágenes de intensidad de la topografía de la superficie. Por un lado las herramientas visuales como las imágenes de intensidad permiten que se vea de mera perfeccionada la topografía de la superficie y la distribución de profundidad; de otra parte los parámetros calculados conforme a la norma ISO 25178 [40] permiten de una manera numérica caracterizar las superficies. La norma ISO 25178 es la primera norma internacional que tiene en cuenta la especificación y medida de texturas de superficies 3D [41]. Ejemplo de estas medidas son los parámetros de altura, los cuales son evaluados sobre el área de la textura de la superficie involucrando una distribución estadística de los valores de altura en el eje z. Uno de los parámetros de altura es la altura media aritmética de la superficie S_a (ecuación 1) [40].

$$S_a = \frac{1}{A} \iint_A |z(x,y)| dx dy \quad (1)$$

En este estudio el análisis de imágenes fue usado para determinar la posible relación entre la intensidad de la topografía de la superficie de los cementantes con las propiedades mecánicas encontradas. Teniendo en cuenta que la estructura del concreto puede ser clasificada aproximadamente en los niveles micro ($<1 \mu\text{m}$), meso (entre $1 \mu\text{m}$ y 1cm) y macro (mayor a 1cm) [42], la evaluación fue enfocada en un nivel meso. Para proporcionar homogeneidad de análisis en este nivel, el análisis superficial topográfico de las muestras puede requerir una preparación adecuada de la superficie mediante un pulimento [43]. Cuando la matriz de pasta de cemento es débil, en ese proceso, se puede generar arranque de granos que pueden rayar la superficie y socavación de la pasta alrededor de las partículas de agregado. Una metodología recomendada para preparar las secciones de análisis para inspección microscópica es la presentada por la norma ASTM C457 [44]. La norma menciona que en casos donde se presenten grandes irregularidades, se prepare la superficie puliéndola con abrasivos de carburo de silicio sucesivamente más finos hasta que la superficie sea apropiada para la observación microscópica. Para el caso de este estudio, se preparó las superficies puliéndolas con lijas No. 80, 180, 220 y 320 (designación ANSI-CAMI). De vez en cuando durante el pulimento, y cuando se cambió a un abrasivo más fino, se limpiaron todas las superficies

con un cepillo cosmético blando.

Con el fin de verificar las medidas realizadas con el microscopio óptico de alta resolución Leica antes de dar inicio a las mediciones se realizó la verificación de la profundidad por comparación respecto a un patrón de referencia MITUTOYO ref. 150178 (bloque de calibración de 1mm de espesor), realizando un perfil de altura.

La Figura 13 presenta la topografía superficial de los concretos a una edad de 118 días y sin tratamiento artificial de carbonatación. Las alturas medias aritméticas obtenidas de las superficies fueron: para el concreto con cementante a1 40,8 μm , para el concreto con cementante a2 31,2 μm , para el concreto con cementante a3 54,9 μm , y para el concreto con cementante a4 24,3 μm . La Figura 14 presenta la topografía superficial de los concretos carbonatados artificialmente a la edad de 118 días. Las alturas medias aritméticas encontradas de las superficies fueron: para el concreto con cementante a1 54,3 μm , para el concreto con cementante a2 17,1 μm , para el concreto con cementante a3 79,7 μm , y para el concreto con cementante a4 42,6 μm . Las Figuras 15-18 muestran la evolución de los concretos no carbonatados artificialmente a partir de micrografías a 3, 7, 28, y 56 días. La comparación de imágenes no arrojó importantes diferencias entre el uso de uno y otro cementante; tampoco se distinguió el tratamiento por carbonatación. La heterogeneidad de los materiales y la interacción con los agregados durante la preparación de las muestras, interfirió en las alturas de superficie generadas. Por tal motivo se recurrió al análisis en pastas de cementante.

3.4 Análisis superficial topográfico de las pastas

Se elaboraron pastas de cementante a1, a2, a3, y a4, para ser analizadas topográficamente a 3, 28, 56, y 118 días de edad. Las pastas fueron sumergidas en agua desde el día siguiente a su elaboración, hasta el día 56, fecha en la cual se colocaron en bolsas plásticas selladas para evitar la carbonatación. Las superficies de las muestras se prepararon similarmente a las superficies del análisis topográfico de los concretos. La Figura 19 presenta la topografía superficial de las pastas a 118 días de edad. Las alturas medias aritméticas obtenidas de las superficies fueron: para la pasta con cementante a1 12,2 μm , para la pasta con cementante a2 16,3 μm , para la pasta con cementante a3 12,1 μm , y para la pasta con cementante a4 28,5 μm . Las Figuras 20-23

presentan la evolución de las pastas a partir de micrografías tomadas a 3, 28, 56, y 118 días de edad. En la parte inferior de cada foto se presenta la altura media aritmética calculada. En términos generales sobresalen las mayores alturas obtenidas con la pasta de cementante a4, seguidas de las alturas de las pastas con cementante a2. Hay que destacar que las menores resistencias mecánicas de las mezclas de mortero y concreto fueron obtenidas con estos mismos cementantes.

Los resultados del análisis superficial topográfico realizado en las pastas se pueden relacionar con la capacidad cementante de los materiales estudiados. Los detalles topográficos en las muestras permitieron identificar una mayor uniformidad y densidad en el cementante a1 (Figura 19.a y Figura 20) en comparación con el cementante a4 (Figura 19.d y Figura 23). La parcial integración de la FA y de la GBFS a la masa total fue evidenciada en las imágenes pudiéndose observar partículas de apreciable tamaño inactivas o hidratadas muy incipientemente. Este hecho afectó de manera significativa las propiedades mecánicas de los morteros y concretos elaborados con los cementantes a2, a3 y a4.

Las características físicas y de composición de las materias primas permiten hacer las siguientes observaciones: se identificó contenido de calcita en el CPC (16%); la pérdida por ignición para el CPC fue de 13.45% mayor a la permitida por la clasificación estándar ASTM C150; se encontraron superficies específicas Blaine en el CPC mayores a las típicas encontradas en un OPC ($\sim 3818 \text{ cm}^2/\text{g}$), y densidades del CPC menores a las del cemento portland ordinario; se encontró una menor proporción de contenido amorfo en la FA (33%) respecto a la GBFS (97%), y como es típico, mayor contenido de CaO en la GBFS que en la FA. Con estos resultados al parecer la GBFS tiene un mejor comportamiento debido a que es una adición más activa, y fundamentalmente se detecta la presencia de adiciones incorporadas de fábrica en el CPC, las cuales disminuyen la posibilidad de reactividad de la FA y la GBFS agregadas en este estudio. Adicionalmente el bajo contenido amorfo, el bajo contenido de CaO, y los altos inquemados de la FA, comprometieron desfavorablemente su actividad puzolánica. Bajo estas circunstancias se puede interpretar que a mayor contenido de adición mayor cantidad de GBFS y FA no reactiva, menor cantidad

de silicato de calcio hidratado (CSH), menor resistencia, y también mayor altura media aritmética evaluada en la topografía superficial de las pastas.

Esto explica por qué la pasta con cementante a1 ofreció la menor intensidad topográfica, la pasta con cementante a2 y a3 intensidades intermedias, y la pasta de cementante a4 la mayor intensidad. Concordantemente las mayores y menores resistencias mecánicas en morteros y concretos,

fueron adquiridas con los cementantes usados en las pastas de menor y mayor intensidad topográfica respectivamente.

Por supuesto, la reactividad de las adiciones, y en general el mecanismo de hidratación, también se vio influenciado por otros factores como el tamaño de las partículas y el área superficial específica de la FA y la GBFS molida.

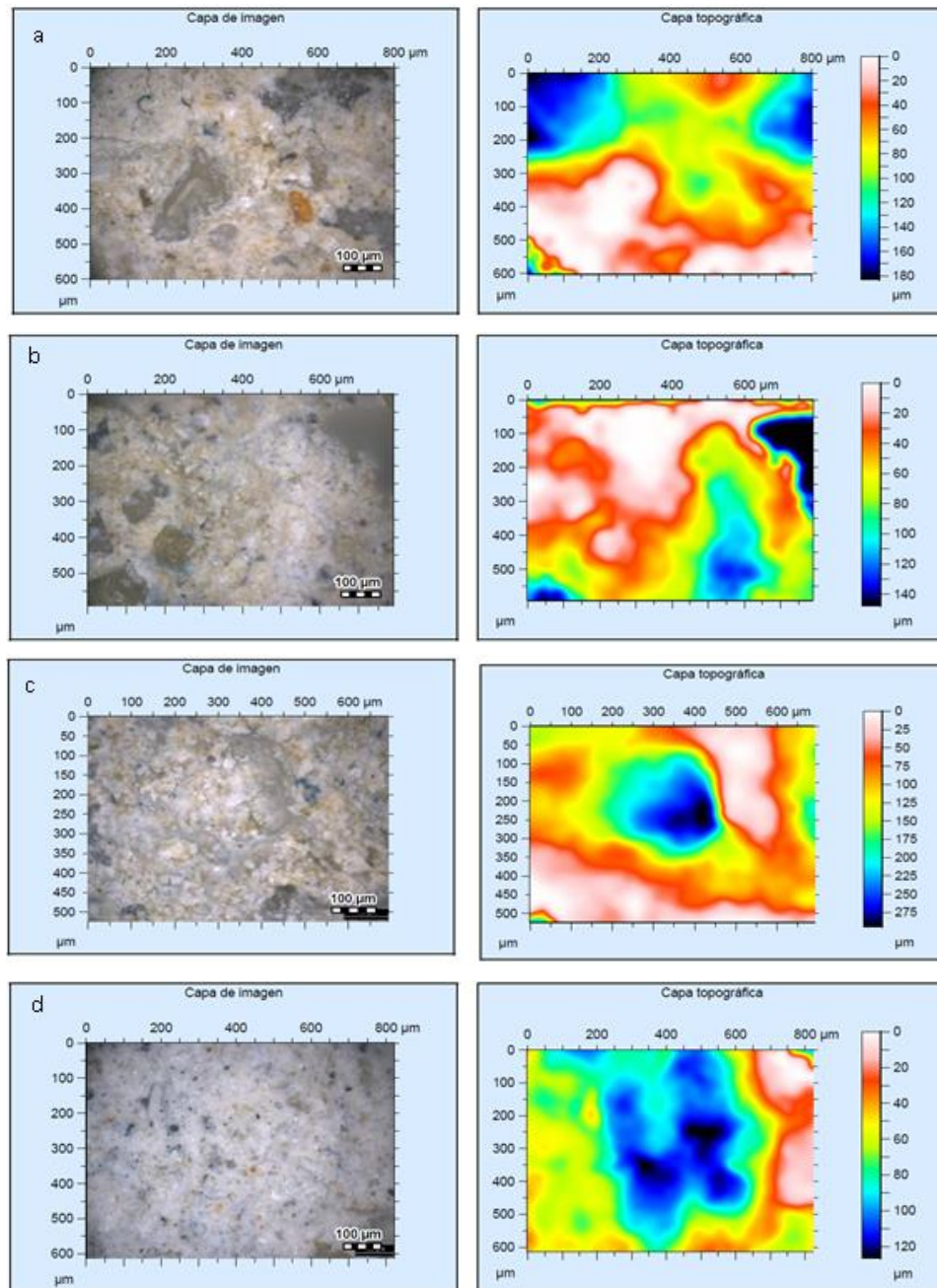


Figura 13. Micrografías ópticas de alta resolución de concretos sin carbonatación artificial con 118 días de edad a 350x (a) a1; (b) a2; (c) a3; (d) a4.

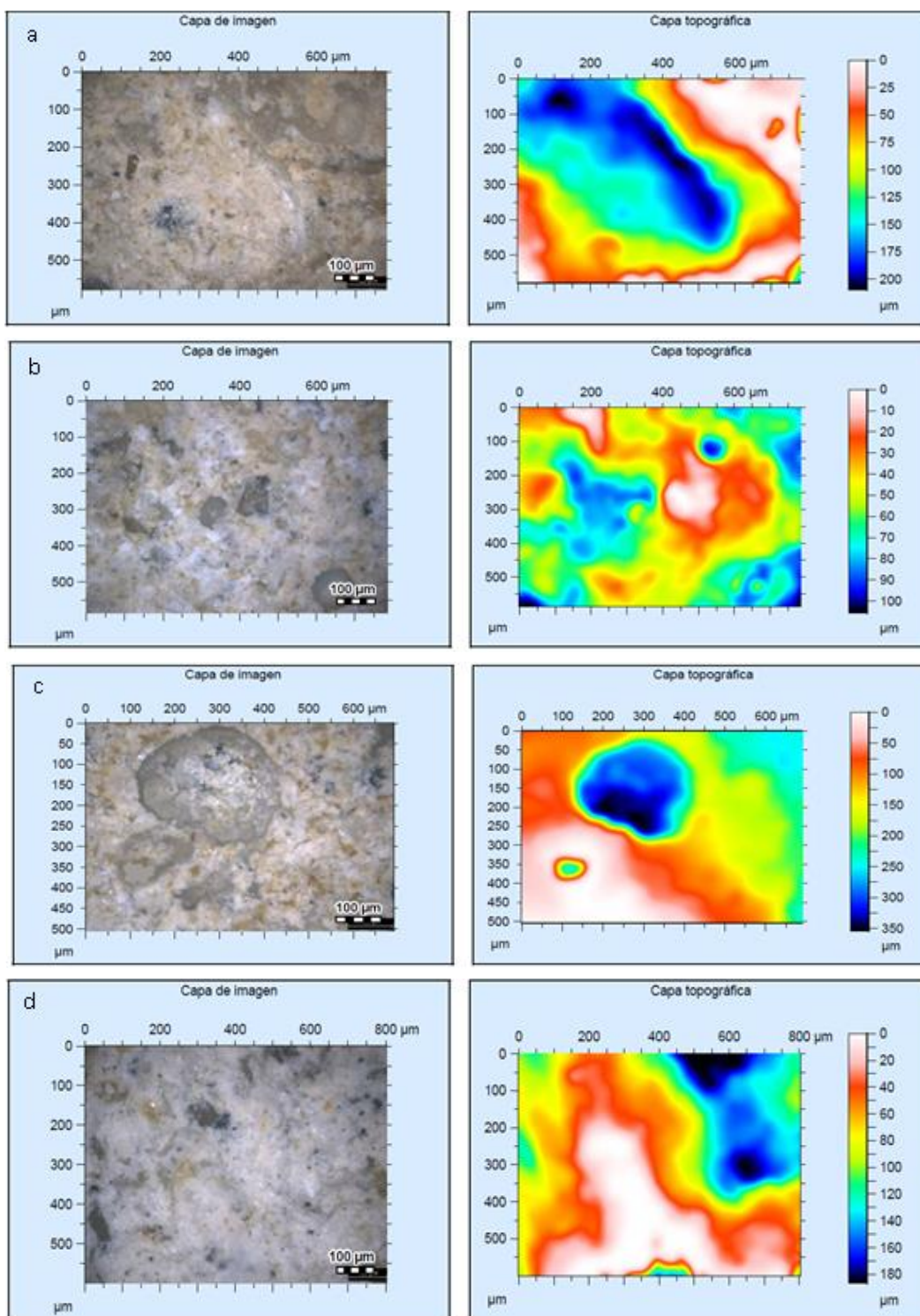


Figura 14. Micrográficas ópticas de alta resolución de concretos con carbonatación artificial a 118 días de edad y 350x (a) a1; (b) a2; (c) a3; (d) a4.

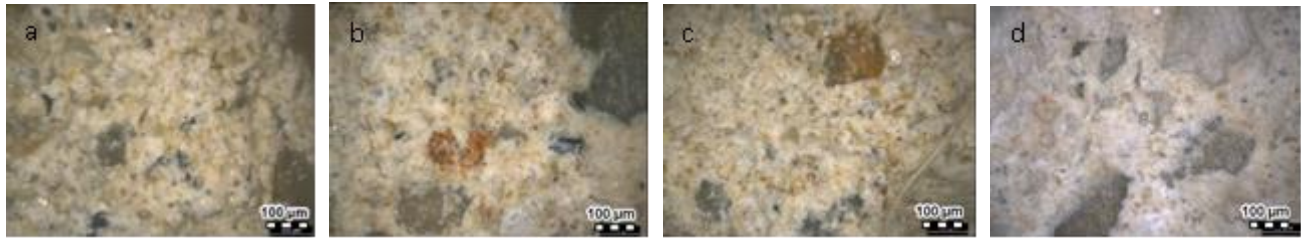


Figura 15. Micrografías ópticas de alta resolución de concretos de cementante a1 con aumento de 350x a la edad de (a) 3 días; (b) 7 días; (c) 28 días; (d) 56 días.

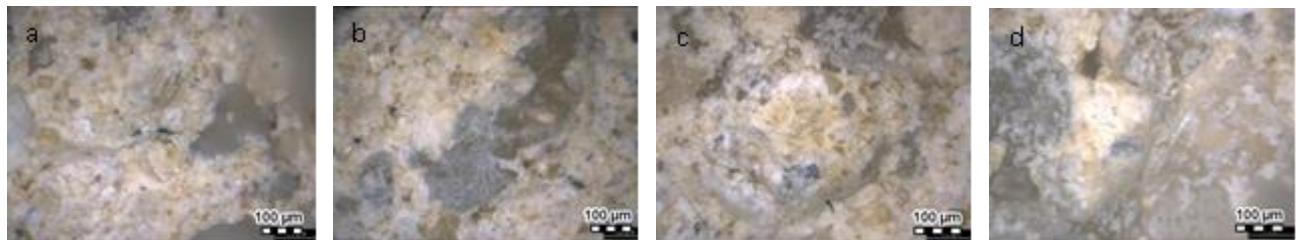


Figura 16. Micrografías ópticas de alta resolución de concretos de cementante a2 con aumento de 350x a la edad de (a) 3 días; (b) 7 días; (c) 28 días; (d) 56 días.

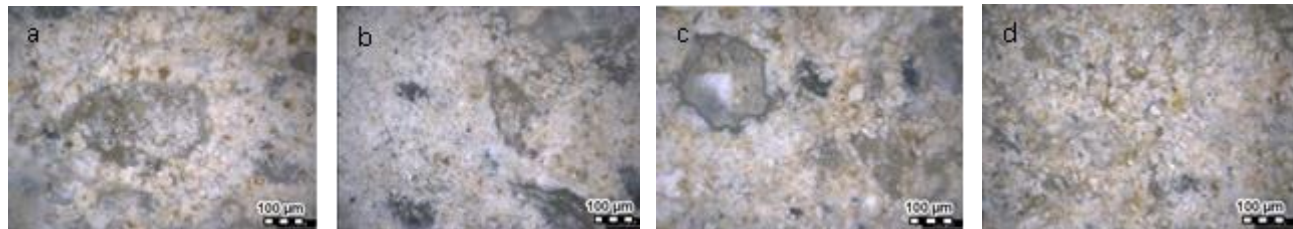


Figura 17. Micrografías ópticas de alta resolución de concretos de cementante a3 con aumento de 350x a la edad de (a) 3 días; (b) 7 días; (c) 28 días; (d) 56 días.

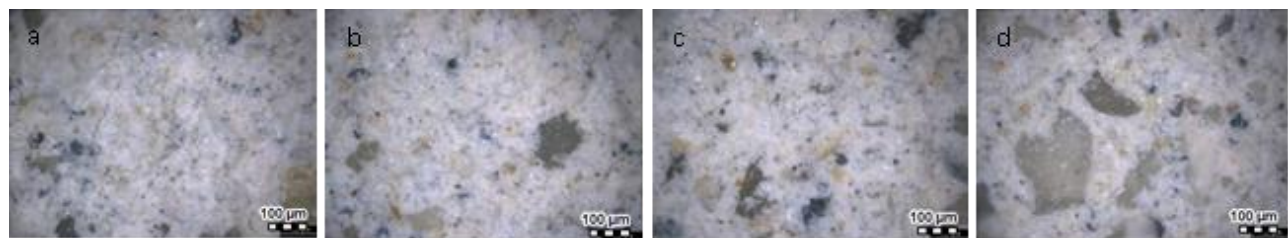


Figura 18. Micrografías ópticas de alta resolución de concretos de cementante a4 con aumento de 350x a la edad de (a) 3 días; (b) 7 días; (c) 28 días; (d) 56 días.

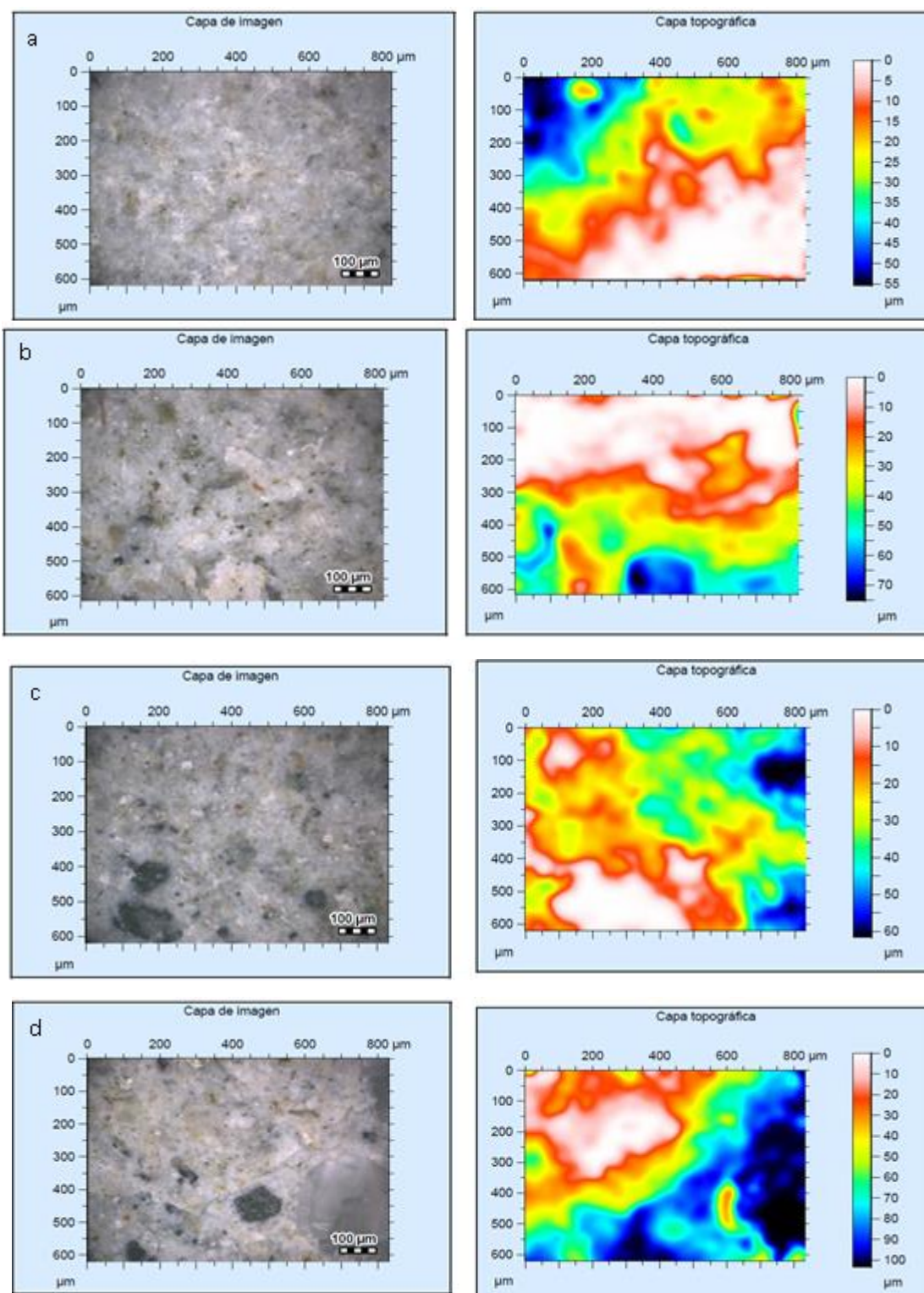


Figura 19. Micrografías ópticas de alta resolución de pastas con 118 días de edad a 350x (a) a1; (b) a2; (c) a3; (d) a4.

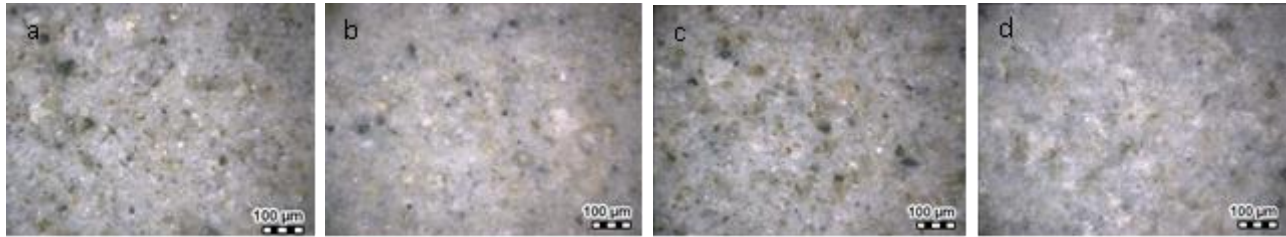


Figura 20. Micrografías ópticas de alta resolución de pastas de cementante a1 con aumento de 350x a la edad de (a) 3 días; (b) 28 días; (c) 56 días; (d) 118 días.

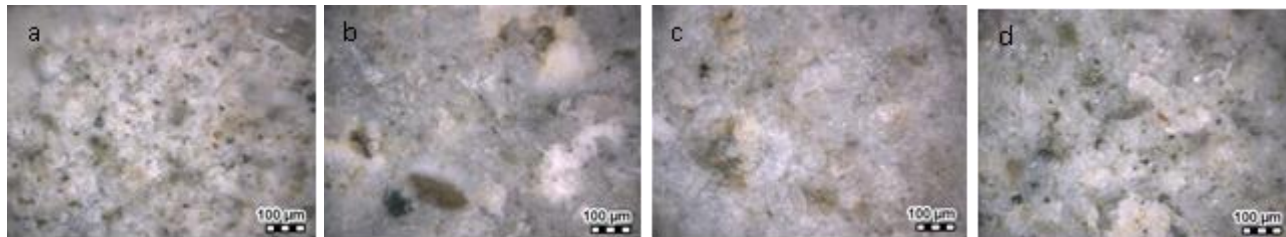


Figura 21. Micrografías ópticas de alta resolución de pastas de cementante a2 con aumento de 350x a la edad de (a) 3 días; (b) 28 días; (c) 56 días; (d) 118 días.

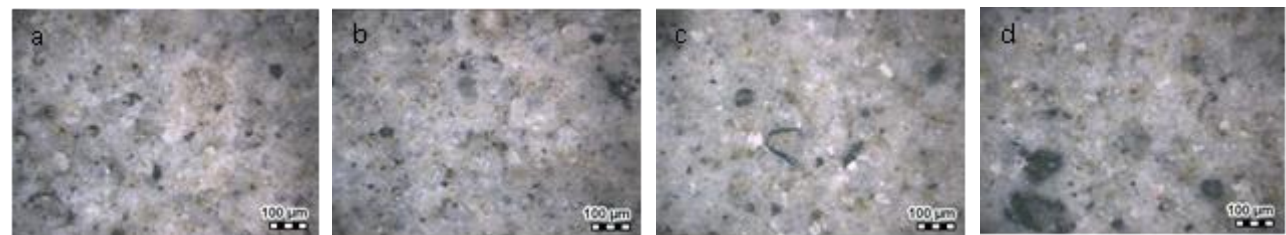


Figura 22. Micrografías ópticas de alta resolución de pastas de cementante a3 con aumento de 350x a la edad de (a) 3 días; (b) 28 días; (c) 56 días; (d) 118 días.

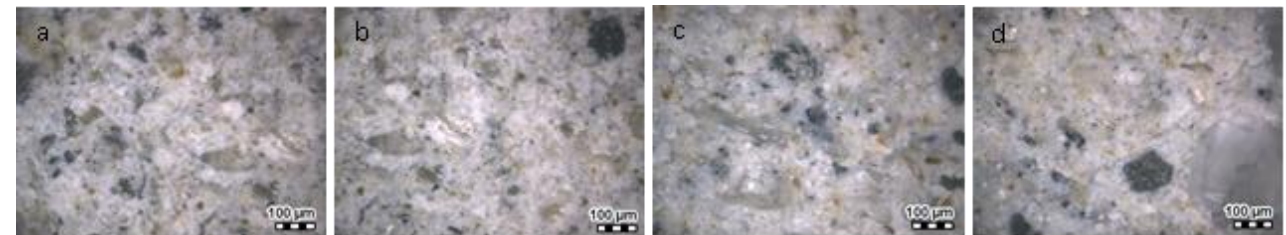


Figura 23. Micrografías ópticas de alta resolución de pastas de cementante a4 con aumento de 350x a la edad de (a) 3 días; (b) 28 días; (c) 56 días; (d) 118 días.

4. CONCLUSIONES

La FA y la GBFS, a pesar de ser consideradas adiciones activas, no adquirieron la capacidad suficiente de reacción con el agua en ambiente alcalino y con el hidróxido cálcico disponible de la hidratación del CPC, para obtener mayores resistencias a las presentadas por las mezclas de solo

CPC. En todos los casos se mostró desmejora en la resistencia mecánica, evidenciando la formación de productos menos cohesivos y estables.

Se evidenciaron altos contenidos de adiciones en el CPC, propios de su elaboración, los cuales sumados a los SCMs usados en la investigación, constituyeron una sobre exigencia de alcalinidad que no permitió aprovechar la reactividad plena de

las adiciones.

Especímenes de concreto y pasta fueron analizados a diferentes edades con el microscopio óptico de alta resolución. La topografía superficial de los concretos mostró imágenes que no aportaron diferencias entre el uso de uno y otro cementante. La heterogeneidad de los materiales y la interacción con los agregados durante la preparación de las muestras, interfirió en las alturas de superficie generadas. En las pastas de cementante analizadas topográficamente se encontraron las mayores alturas en las superficies obtenidas con la pasta de cementante a4, las cuales corresponden a las que tienen las menores resistencias mecánicas en las mezclas de mortero y concreto. Este comportamiento topográfico fue característico del cementante a4, el cual contiene el mayor contenido de adición.

5. AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue financiada por la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, el Instituto para la Investigación e Innovación en Ciencia y Tecnología de Materiales INCITEMA, y la Universidad Nacional de Colombia.

6. REFERENCIAS

- [1]. Jalal M, Pouladkhan A, Harandi OF, Jafari D. *Constr Build Mater.* 2015; 94: 90-104. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.001>.
- [2]. Fernández-Carrasco L, Torrén-Martín D, Martínez-Ramírez S. *Cement Concrete Comp.* 2012; 34 (10): 1180-1186. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.06.016>.
- [3]. McCarter WJ, Chrisp TM, Starrs G, Adamson A, Basheer PAM, Nanukuttan SV, Srinivasan S, Green C. *Cem. Concr. Res.* 2013; 50: 26-33. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2013.03.008>.
- [4]. Fonseca FS, Godfrey RC, Siggard K. *Constr Build Mater.* 2015; 94: 719-727. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.115>.
- [5]. American Concrete Institute. *Ground Granulated Blast-Furnace Slag as a Cementitious Constituent in Concrete*, Technical Report ACI 233R-95 (Reapproved 2000). EE.UU: ACI Committee 233, 2000.
- [6]. Özbay E, Sahmaran M, Lachemi M, Yücel HE. *ACI Mater. J.* 2013; 110 (1): 3-43.
- [7]. Shaikh FUA, Supit, SWM. *Constr Build Mater.* 2015; 82: 192-205. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.02.068>.
- [8]. American Concrete Institute. *Use of Fly Ash in Concrete*, Technical Report ACI 232.2R-03. EE.UU: ACI Committee 232, 2003.
- [9]. Flatt RJ, Roussel N, Cheeseman CR. *J. Eur. Ceram. Soc.* 2012; 32: 2787-2798. [doi:10.1016/j.jeurceramsoc.2011.11.012](http://dx.doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2011.11.012)
- [10]. Makhloufi Z, Chettih M, Bederina M, Hadj Kadri EL, Bouhicha M. *Constr Build Mater.* 2015; 95: 647-657. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.050>
- [11]. Jeong Y, Park H, Jun Y, Jeong JH, Oh JE. *Constr Build Mater.* 2015; 95: 96-107. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.158>.
- [12]. Bostanci SC, Limbachiya M, Kew H. *J Clean Prod.* 2015; Article in press: 1-11. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.08.070>.
- [13]. Ahmaruzzaman M. *Prog Energ Combust.* 2010; 36 (3): 327-363. <http://dx.doi.org/10.1016/j.peccs.2009.11.003>.
- [14]. Juenger MCG, Siddique R. *Cement Concrete Res.* 2015; 78: 71-80. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.03.011>.
- [15]. Schneider M, Romer M, Tschudin M, Bolio H. *Cement Concrete Res.* 2011; 41: 642-650. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.03.011>.
- [16]. Norma ASTM C 150, *Standard Specification for Portland Cement*, West Conshohocken, Pa. (EE.UU.): American Society for Testing and Materials, 1999.
- [17]. Norma NTC 121, *Especificación de desempeño para cemento hidráulico*, Bogotá DC. (Colombia): Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, 2014.
- [18]. Mathia TG, Pawlus P, Wiczorowski M. *Wear.* 2011; 271: 494-508. [doi:10.1016/j.wear.2010.06.001](http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2010.06.001)
- [19]. Vlahović MM, Savić MM, Martinović SP, Boljanac TĐ, Volkov-Husović TD. *Mater. Des.* 2012; 34: 346-354. [doi:10.1016/j.matdes.2011.08.026](http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2011.08.026)
- [20]. Hoła J, Sadowski Ł, Reiner J, Stach S. *Constr Build Mater.* 2015; 84: 111-120. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.014>
- [21]. Horgnies M, Chen JJ. *Cement Concrete Comp.* 2014; 52: 81-90. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.05.014>

10

- [22]. Fiorio B. Constr Build Mater. 2005; 19: 366-375. doi:10.1016/j.conbuildmat.2004.07.020
- [23]. Erdem S, Dawson AR, Thom NH. Cement Concrete Res. 2012; 42: 447-458. doi:10.1016/j.cemconres.2011.11.015
- [24]. Korpa A, Kowald T, Trettin R. Cement Concrete Res. 2008; 38: 955-962. doi:10.1016/j.cemconres.2008.02.010
- [25]. Ferrari L, Kaufmann J, Winnefeld F, Plank J. Constr Build Mater. 2012; 35: 92-96. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.02.089>
- [26]. Leica Microsystems. Brochure LAS Maps Start - Software de procesamiento de imágenes de superficies y metrología [en línea]. Heerbrugg (Suiza), 2011 [citado 8-oct-2015]. Disponible a través de: <http://www.leica-microsystems.com>
- [27]. Norma ASTM C1157/C1157M, Standard Performance Specification for Hydraulic Cement, West Conshohocken, Pa. (EE.UU.): American Society for Testing and Materials, 2011. doi:10.1520/C1157_C1157M-11
- [28]. Norma ASTM C187, Standard Test Method for Normal Consistency of Hydraulic Cement, West Conshohocken, Pa. (EE.UU.): American Society for Testing and Materials, 1998.
- [29]. Norma ASTM C230/C230M, Standard Specification for Flow Table for Use in Tests of Hydraulic Cement, West Conshohocken, Pa. (EE.UU.): American Society for Testing and Materials, 1998.
- [30]. Norma ASTM C109/C109M, Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens), West Conshohocken, Pa. (EE.UU.): American Society for Testing and Materials, 1999.
- [31]. Norma ASTM C192/C192M, Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory, West Conshohocken, Pa. (EE.UU.): American Society for Testing and Materials, 2000.
- [32]. Norma ASTM C204, Standard Test Method for Fineness of Hydraulic Cement by Air Permeability Apparatus, West Conshohocken, Pa. (EE.UU.): American Society for Testing and Materials, 1996.
- [33]. Norma ASTM C188, Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement, West Conshohocken, Pa. (EE.UU.): American Society for Testing and Materials, 1995.
- [34]. Norma ASTM D3173, Standard Test Method for Moisture in the Analysis Sample of Coal and Coke, West Conshohocken, Pa. (EE.UU.): American Society for Testing and Materials, 2011. doi:10.1520/D3173-11
- [35]. Galán I. Carbonatación del hormigón: combinación de CO₂ con las fases hidratadas del cemento y frente de cambio de pH, Tesis Ph.D. Madrid (España): Universidad Complutense de Madrid, 2011.
- [36]. Norma ASTM C191, Standard Test Method for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle, West Conshohocken, Pa. (EE.UU.): American Society for Testing and Materials, 1999.
- [37]. British Standards Institution, "Methods of testing cement, Heat of hydration, Semi-adiabatic method". En: BS EN 196-9, British Standard, 2003.
- [38]. Norma ASTM C39/C39M, Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens, West Conshohocken, Pa. (EE.UU.): American Society for Testing and Materials, 2001.
- [39]. Norma ASTM C618, Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, West Conshohocken, Pa. (EE.UU.): American Society for Testing and Materials, 2005.
- [40]. Norma ISO 25178-2, Geometrical product specifications (GPS) - Surface texture: Areal - Part 2: Terms, definitions and surface texture parameters, Geneva (Switzerland): International Organization for Standardization, 2012.
- [41]. Kalisz J, Zak K, Grzesik W, Czechowski K. Journal of Machine Engineering. 2015; 36 (1): 71-80.
- [42]. Ozturk AU. Comp Mater Sci. 2007; 41: 127-133. doi:10.1016/j.commatsci.2007.03.006
- [43]. Norma ASTM C856, Standard Practice for Petrographic Examination of Hardened Concrete, West Conshohocken, Pa. (EE.UU.): American Society for Testing and Materials, 1995.
- [44]. Norma ASTM C457, Standard Test Method for Microscopical Determination of Parameters of the Air-Void System in Hardened Concrete, West Conshohocken, Pa. (EE.UU.): American Society for Testing and Materials, 1998.