

HAC2018 | V Congreso Iberoamericano de Hormigón Autocompactante y Hormigones Especiales

Valencia, 5 y 6 de Marzo de 2018

Concreto autocompactante con materiales cementicios suplementarios de Colombia

Yimmy Silva ⁽¹⁾ y Silvio Delvasto ⁽²⁾

⁽¹⁾ Ingeniero de Materiales, MSc., Grupo Materiales Compuestos, Escuela de Ingeniería de Materiales, Facultad de Ingeniería, Universidad del Valle, Cali, Colombia.

⁽²⁾ Profesor Titular, MSc, Dr., Grupo Materiales Compuestos, Escuela de Ingeniería de Materiales, Facultad de Ingeniería, Universidad del Valle, Cali, Colombia.

DOI: <http://dx.doi.org/10.4995/HAC2018.2018.6090>

RESUMEN

El concreto autocompactante (CAC) es un tipo de hormigón o concreto especial, que por sus características reológicas es considerado uno de los grandes desarrollos tecnológicos en la industria del concreto, con un consumo creciente en la industria de la construcción. Este artículo contiene resultados de investigaciones realizadas por el Grupo Materiales Compuestos (GMC) sobre el CAC empleando diferentes adiciones disponibles en Colombia. Se han estudiado adiciones de subproductos industriales como la ceniza volante (FA), escoria de carbón (E), lodo calcáreo (LC) y residuos de mampostería (RM) proveniente de los residuos construcción y demolición (RCD), y otros materiales como las puzolanas naturales o rellenos como la caliza molida (LP), material volcánico del Puracé (MVP) y material volcánico de Tolima (MVT). Estos materiales se incorporaron en la preparación de concretos autocompactantes para su posterior evaluación reológica en estado fresco y caracterización en estado endurecido. El acondicionamiento reológico se evaluó mediante técnicas como el embudo en V, caja en L y flujo de asentamiento con cono de Abrams. Adicionalmente se evaluaron propiedades mecánicas como la resistencia a la compresión y la tracción indirecta. Para ello se analizaron el comportamiento de un total de 23 mezclas de CAC con 7 adiciones distintas donde los flujos de asentamiento presentaron diámetros dentro de un rango de 520 mm - 750 mm, los tiempos en la prueba de fluidez en el embudo en V estuvieron en un rango entre 4 y 20 segundos, y los resultados en la relación de bloqueo (H2/H1) de las diferentes mezclas usando la caja en L estuvieron en un rango entre 0,68 y 1. La resistencia a la compresión de la mezcla con mayor resistencia, 43,4 MPa a los 28 días de curado bajo agua, la reportó un CAC con 35% de FA (CAC 65_FA-35) seguida de la mezcla de CAC con 20% de escoria (CAC 80_E-20) con 41,3 MPa. Se concluyó que los materiales investigados sí tienen potencial para ser adicionados en los CAC y obtener propiedades adecuadas en las mezclas, tanto en estado fresco como endurecido.

PALABRAS CLAVES: Concreto autocompactante, reología, puzolanas, residuos de construcción y demolición, cenizas volantes, harina calcárea.

1.- INTRODUCCIÓN

El concreto autocompactante (CAC) es un tipo de concreto especial por su alta fluidez que al momento de su colocación puede consolidarse bajo la acción de su propio peso sin ningún esfuerzo externo (vibración) debido a sus excelentes propiedades reológicas y alta resistencia a la segregación [1,2]. La introducción del concreto autocompactante se hizo a finales de 1980 en la industria de la construcción del Japón por Okamura [3, 4], y fue una propuesta de Okamura [4]. El CAC al compararse con el concreto tradicional vibrado presenta varias ventajas como son la eliminación del vibrado, disminución del tiempo de construcción, reducción de la contaminación acústica, mejor capacidad de llenado de estructuras altamente reforzadas, disminución de la permeabilidad y mejor interfaz entre la pasta de cemento y agregado o pasta de cemento y refuerzo, también permite una mayor libertad de diseño de las obras [5-7]. Por estas características, el CAC ha sido considerado una de las grandes innovaciones en la industria de la construcción [8], y su empleo es cada vez más común en proyectos de infraestructura, debido a calidad y estética que se aprecia en los acabados y en la arquitectura [9].

El CAC en su diseño original requiere una gran cantidad de finos, que generalmente se encuentran en un rango entre 400 y 600 kg/m³ [10], con el fin de proporcionar alta fluidez y evitar la segregación y sangrado, lo que genera un uso excesivo de cemento Portland en comparación con el concreto convencional [11], conllevando así un efecto negativo al medio ambiente. La producción del cemento Portland (OPC) conduce a la liberación de una cantidad significativa de CO₂, que en el 2007 representaba alrededor del 7% de las emisiones mundiales de CO₂, y con el aumento mundial de la demanda de este conglomerante las emisiones de CO₂ en la producción del cemento Portland pueden representar alrededor del 10% de las emisiones totales de CO₂ en un futuro próximo [12].

Una alternativa para reducir el contenido de OPC en CAC es el empleo de subproductos como adiciones minerales o materiales cementicios suplementarios, que además de resolver el problema del alto consumo de cemento permiten: Lograr ahorros de energía importantes, eliminar productos de desecho de procesos contaminantes, mejorar la calidad del concreto, reducir su costo de elaboración y atenuar el calor de hidratación [13-15].

El presente documento muestra resultados de investigaciones hechas por el Grupo de investigación Materiales Compuestos de la Universidad del Valle sobre el uso de diferentes adiciones disponibles en Colombia en la elaboración de concretos autocompactantes. Este artículo incluye información sobre las propiedades mecánicas de los CAC con las diferentes adiciones y sus efectos sobre las propiedades en estado fresco.

2.- ADICIONES EN EL CONCRETO AUTOCOMPACTANTE

El concreto autocompactante contiene los mismos constituyentes que el concreto convencional (cemento, agregados, agua, adiciones), pero difieren sus propiedades en estado fresco como la capacidad de paso, capacidad de relleno, trabajabilidad y resistencia a la segregación. Para lograr estas propiedades se necesita una gran cantidad de material fino, lo cual se satisface mediante el empleo de adiciones como la ceniza volante, polvo de

pedra caliza, escoria de alto horno, tobas volcánicas, metacaolín y residuos de mampostería (ladrillo de arcilla y mortero cemento portland molido); además, de un aditivo superplastificante y, en algunos casos, aditivos modificadores de viscosidad.

La ceniza volante o *Fly Ash* (FA) es un residuo de partículas finas proveniente de la combustión del carbón molido en las calderas de las centrales eléctricas. Este subproducto experimenta reacciones puzolánicas y de hidratación [11]. La FA ha sido empleada en el CAC en cantidades que van desde 10% al 60% en reemplazo del OPC, sin embargo, aumentar demasiado su contenido reduce la resistencia a la compresión [11,16-18]. Por otra parte, en cantidades inferiores al 35%, dependiendo de las características de la ceniza volante, pueden mejorar la trabajabilidad, capacidad de paso y de relleno [19].

La escoria de alto horno o *Granulated Blast Furnace Slag* (GBFS) es un subproducto proveniente de la fundición del hierro en alto horno. Se le considera un producto no metálico, constituido esencialmente por silicatos de calcio y otras fases originadas durante la fundición. Se obtiene en forma de gránulos al enfriar rápidamente el material remanente de la fundición mediante chorros de agua. Es un elemento hidráulicamente muy activo, muy fino y con bajo calor de hidratación [20, 21]. Al nivel mundial se producen alrededor de 250 millones de toneladas de escorias por año, de los cuales solo 90 millones de toneladas se utilizan en la producción de concreto [22]. La GBFS no se emplea en el CAC en niveles altos, ya que puede afectar la estabilidad, consistencia y producir un lento fraguado en la mezcla pudiendo incrementar el riesgo de segregación [23], aunque se debe señalar que algunos investigadores han empleado hasta un 70% de reemplazo de cemento por GBFS sin afectar las propiedades en estado fresco [24]. Por otro lado, el empleo de GBFS en porcentajes menores al 40% puede mejorar el flujo de asentamiento [2, 22].

El polvo de piedra caliza o *Limestone Powder* (LP) es un subproducto de las operaciones de trituración de piedra y normalmente presenta un serio problema en términos de eliminación y riesgos para la salud. La piedra caliza molida se considera generalmente una carga inerte, aunque la adición de esta mejora la velocidad de hidratación del cemento, según algunos autores [25]. El LP se usa comúnmente en mezclas de CAC para optimizar el empaquetamiento de partículas y mejorar las propiedades reológicas. Cuando se emplean grandes volúmenes de LP en mezclas de CAC las propiedades de autocompactabilidad se consiguen con relaciones agua/cementante más bajas [26]. Algunos investigadores han empleado hasta un 70% de LP en mezclas de CAC [27].

Las tobas volcánicas o *volcanic tuff* son materiales micro-porosos de origen volcánico compuestos principalmente por SiO_2 , Al_2O_3 y Fe_2O_3 [28]. Este material ha sido ampliamente empleado como sustituto del cemento Portland, principalmente en regiones donde existen grandes depósitos volcánicos y es escasa la disponibilidad de otras puzolanas [29]. Algunas tobas volcánicas se caracterizan por poseer una reactividad puzolánica, que les permite desarrollar gran afinidad con la cal liberada del clinker de cemento portland; su composición química está directamente relacionada con los componentes del magma que la origina. Se ha empleado hasta un 45% de material volcánico en mezclas de CAC [30].

El metacaolín o *metakaolin* (MK) es un material cementicio suplementario considerado como una puzolana clase N según ASTM C618. Es un aluminosilicato con alta reactividad, producido por la calcinación de la caolinita a temperaturas entre 650 y 900 °C, sin que ocurra descomposición de CO₂, por lo que se considera una puzolana natural respetuosa con el medio ambiente [31]. En mezclas de CAC, algunos investigadores han empleado el MK en cantidades bajas (0 a 15%) como reemplazo de cemento, debido a que cuando se adicionan porcentajes superiores al 15%, generalmente, empieza a disminuir la resistencia a la compresión en comparación con porcentajes de reemplazo inferiores [31]. En otro estudio, se emplearon mayores cantidades de MK en las mezclas de CAC (hasta 40%), donde la resistencia a la compresión empieza a descender con reemplazos mayores al 30% de cemento Portland por esa puzolana [32].

El residuo de mampostería (*residue of masonry, residue of clay brick masonry* (RM)) es un polvo híbrido generado a partir de residuos de construcción y demolición (RCD) cuando están compuestos de ladrillo de arcilla y mortero o concreto de cemento Portland. En algunos países, como China, una parte significativa de los RCD es el ladrillo de arcilla sinterizado. Un informe reciente indica que el porcentaje de ladrillo de arcilla puede llegar a ser superior al 50% en los residuos de RCD en las ciudades chinas [33, 34]. Por ejemplo, el 74% de los edificios que se derrumbaron en un terremoto en Wenchuan (China) tenían un porcentaje elevado de RM [35]. En Suecia la superficie bruta de fachada en mampostería de ladrillo de arcilla se estima en 80 millones de m² [36]. Por ello, el empleo de RM como adición al cemento es una alternativa sostenible para el uso de este tipo de RCD. Algunos investigadores [33] han estudiado el efecto del RM como material puzolánico suplementario para el cemento, encontrando que este residuo muestra niveles de puzolanidad diferentes, dependiendo del contenido del polvo de ladrillo de arcilla y de las características originales del ladrillo, debidas a la composición de las materias primas y a sus procesos de producción. Aunque la variabilidad de características es también muy significativa en los RCD.

3.- CARACTERIZACIÓN DE ADICIONES DE COLOMBIA PARA CAC

La composición química de las adiciones empleadas como reemplazo de cemento para la elaboración de CAC, generalmente, presentan contenidos de SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ y CaO. En la tabla 1 se observan las propiedades químicas y físicas de algunas adiciones estudiadas en Colombia por el GMC, tales como la ceniza volante (FA), la escoria de carbón (E), el residuo de mampostería (RM), el material volcánico del Puracé (MVP), el material volcánico del Tolima (MVT), una caliza molida comercial (LP) y un lodo calcáreo (LC) proveniente de una industria productora de papel [37-42].

La actividad resistente de las adiciones se evaluó de acuerdo al Índice de Actividad Resistente con cemento portland -IAR (*Strength activity index with portland cement*)-siguiendo el procedimiento estándar establecido en la norma C311 / C311M – 16. Este índice se define como la relación entre la resistencia a la compresión entre el mortero con la adición y el mortero de control multiplicado por 100. El IAR se evaluó a los 28 días de

curado de la mezcla con adición que tenía 20% en peso de reemplazo del cemento Portland usado en la mezcla de control.

Aunque el índice se especifica en ASTM C311 para cenizas volantes o puzolanas naturales, se extendió a todos los materiales de adición investigados, dado que se evalúa es la actividad resistente y no la actividad puzolánica, pues es claro que materiales que por naturaleza no tendrían actividad puzolánica, tal como los lodos de la industria papelera, sí podrían cumplir el requisito que establece la norma mencionada para materiales puzolánicos como son las cenizas volantes y las puzolanas naturales tipo N, pero entendiendo que el mecanismo no es la reacción puzolánica sino otro, por ejemplo, por complementación granulométrica o refuerzo particulado. En la tabla 2 se observan los IAR de cada una de las adiciones, los cuales superan el límite (IAR >75%) establecido por la norma ASTM C618- 15

Tabla 1. Composición química de adiciones

	FA	E	RM	MVP	MVT	LP	LC
<i>Composición química</i>							
SiO ₂	33,85	50,99	54,09	87,45	64,36	8,5	0,3
Al ₂ O ₃	24,72	27,45	15,5	0,23	15,9	-	
CaO	6,92	4,92	8,73	0,07	4,71	-	
Fe ₂ O ₃	6,34	6,53	9,84	1,89	4,92	-	
MgO	2,25	0,74	3,5	0,05	1,80	-	0,04
NaO	-	1,3	1,92	0,05	5,38	-	
SO ₃	-	0,21	0,14	0,04	-	-	
CaCO ₃	-	-	-	-	-	85,38	99,3
% PF	21,42	4,17	3,4	8,35	0,4	-	-
<i>Propiedades Físicas</i>							
Densidad (g/cm ³)	-	2,3	2,6	2,2	2,1	2,7	-
Tamaño de partícula (µm)	23,9	19,1	26,6	21,1	20,2	11,7	15,9

Tabla 2. Valores de índice de actividad resistente, IAR [38-41]

<i>Tiempo de curado</i>	FA	E	RM	MVP	MVT	LP	LC
28 días	129%	92,98%	82,6%	77,51%	92,36%	-	-

4.- MEZCLAS DE CONCRETO AUTOCOMPACTANTE

Los concretos autocompactantes con cada una de las adiciones se prepararon usando diseños diversos. El cemento se reemplazó en peso en diferentes niveles para cada una de las adiciones. La composición de las mezclas en kilogramos por metro cúbico de concreto se muestra en la Tabla 3. Vale la pena remarcar que el contenido de polvo se mantuvo constante en las mezclas con E, RM, MVT y la mezcla ternaria adicionada con MVT y MVP. La mezcla control de cada CAC con diferente adición se designó CAC 100_XX, donde el 100 representa el porcentaje de OPC presente en el concreto, seguido de la abreviatura de la adición, por ejemplo el CAC 65_FA-35, indica que este concreto autocompactante presentaba como material cementante 65% cemento Portland y 35% ceniza volante. De la misma manera, otras mezclas fueron designadas con cambio de la adición y el porcentaje.

Tabla 3. Composición de las mezclas de CAC con adiciones colombianas [38-41]

	Kg/m ³ de concreto											
	Cemento	FA	E	RM	MVP	MVT	LP	LC	Agua	a. Fino	a. Grueso	SP
CAC 100_FA-0	550	-	-	-	-	-	-	-	198	860	770	6,6
CAC 65_FA-35	357,5	192,5	-	-	-	-	-	-	198	859	770	6
CAC 50_FA-50	275	275	-	-	-	-	-	-	198	859	770	5,8
CAC 100_E-0	480	-	-	-	-	-	-	-	216	643	965	2,64
CAC 90_E-10	432	-	48	-	-	-	-	-	216	643	965	2,64
CAC 80_E-20	384	-	96	-	-	-	-	-	216	643	965	2,64
CAC 70_E-30	336	-	144	-	-	-	-	-	216	643	965	2,64
CAC 50_E-50	240	-	240	-	-	-	-	-	216	643	965	2,64
CAC 90_RM-10	432	-	-	48	-	-	-	-	216	643	965	2,64
CAC 80_RM-20	384	-	-	96	-	-	-	-	216	643	965	2,88
CAC 70_RM-30	336	-	-	144	-	-	-	-	216	643	965	2,92
CAC 50_RM-50	240	-	-	240	-	-	-	-	216	643	965	2,95
CAC 100_MVT-0	480	-	-	-	-	-	-	-	226	633	950	2,64
CAC 80_MVT-20	384	-	-	-	-	96	-	-	226	633	950	2,64
CAC 70_MVT-30	312	-	-	-	-	144	-	-	226	633	950	2,64
CAC 70_MVT-20 MVP-10	278	-	-	-	48	96	-	-	226	633	950	3,84
CAC 67_LP-33	450	-	-	-	-	-	225	-	200	795	895	5,4
CAC 74_LP-26	450	-	-	-	-	-	157,5	-	200	795	895	5,4
CAC 67_LC-33	450	-	-	-	-	-	-	225	220,5	795	895	11,2
CAC 74_LC-26	450	-	-	-	-	-	-	157,5	216	795	895	7,69

4.1.- Propiedades en estado fresco

La evaluación de las propiedades en estado fresco de cada una de las adiciones en las mezclas de CAC se realizó en el embudo en V, flujo de asentamiento por cono de Abrams y caja en L. El ensayo Embudo en V o *V-funnel* se realizó de acuerdo a los estándares de la EFNARC [23]. La prueba se utiliza para determinar la capacidad de llenado (capacidad de flujo) del concreto con un tamaño máximo de 20 mm. El embudo se llena con aproximadamente 12 litros de concreto y se mide el tiempo necesario para que fluya a través del embudo. La viscosidad plástica del concreto fresco puede ser evaluada con base en el tiempo del flujo en el embudo en V. El ensayo Flujo de Asentamiento o *slump flow* se realizó también de acuerdo con los estándares de las EFNARC [23]. La prueba evalúa la capacidad de llenado y el flujo libre del CAC en ausencia de obstrucciones. Este ensayo no presenta indicaciones de la capacidad del concreto para pasar por entre la armadura sin bloqueos, pero puede presentar indicios de la resistencia a la segregación [10]. El ensayo Caja en L o L-box está basado en un diseño japonés, que se realizó de acuerdo con los estándares de las EFNARC. La prueba indica la capacidad de paso del CAC en estado fresco cuando está sometido a pequeñas aberturas o bloques fuertemente reforzados. Las características y requisitos de las directrices de la EFNARC de CAC se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4. Especificaciones de EFNARC [23]

Características	Método de prueba	Especificación	Clase	Valores
Trabajabilidad	Prueba de flujo de asentamiento	flujo de asentamiento (mm)	SF1	550 a 650 mm
			SF2	660 a 750 mm
			SF3	760 a 850 mm
Viscosidad (velocidad flujo)	de T ₅₀₀ (flujo de asentamiento) o Prueba del embudo en V	T ₅₀₀ en s tiempo del embudo en V	VS1/VF1	≤ 2 s / ≤ 8 s
			VS2/VF2	> 2 s / 9 a 25 s
Capacidad paso	de Prueba de caja en L	Capacidad de paso	PA 1	> 0,8 con 2 barras
			PA 2	≥ 0,8 con 3 barras
Segregación	Prueba de resistencia a la segregación (tamiz)	% de resistencia a la segregación	SR1	≤ 20%
			SR2	≤ 15%

4.1.1 Resultados de ensayos en estado fresco

En la Tabla 5 se muestra el resultado de cada uno de los ensayos de las diferentes mezclas de CAC en estado fresco. La mezcla de CAC con ceniza volante [38] indica que el reemplazo de OPC por FA generó un mayor flujo de asentamiento (2,54 % y 2,83 % para los CAC con 35% y 50% de FA respectivamente), menor tiempo en el embudo en V y una relación H2/H1 mayor en comparación con su mezcla de referencia (CAC 100_FA-0), este comportamiento es característico de algunos FA en CAC [43]. También, el uso de FA hizo que el contenido de superplastificante (SP) disminuyera en las mezclas de CAC, comportamiento que coincide con el obtenido en el estudio realizado por Gesoglu et al.,

(2012) [44]. Respecto a los CAC con Escoria de carbón, se aprecia que esta adición (E) no produjo incrementos en la demanda de agua y en la cantidad del aditivo superplastificante requerido para lograr las propiedades de diseño en estado fresco y cumplir con los criterios de conformidad de CAC, según la EFNARC [23]; sin embargo, a mayores porcentajes de reemplazo de OPC por E se generaba una pérdida de las propiedades en estado fresco, como el flujo libre en ausencia de obstrucciones que iba desde 1,57% hasta 16,5% en la mezclas con 30% y 50% de E. Por otra parte, las mezclas de CAC con residuo de mampostería se encuentran entre los valores establecidos por la EFNARC [23], excepto la mezcla con 30% de RM. El empleo de esta adición generó una mayor demanda de SP en las mezclas con los mayores porcentajes de reemplazo de RM por OPC (30% y 50% de RM por OPC) [39], este comportamiento puede ser atribuido a que al realizarse el reemplazo en peso del RM por OPC se estaba adicionando un mayor volumen de este residuo, por lo que se necesitaría una mayor cantidad de líquido para mojar la superficie de las partículas de este material.

Tabla 5. Trabajabilidad de las diferentes mezclas de CAC en estado fresco [38-41]

<i>Mezcla</i>	Flujo de asentamiento (mm)	Embudo en V (s)	Caja en L (H2/H1)
CAC 100_FA-0	670	18,0	0,82
CAC 65_FA-35	687	11,1	0,88
CAC 50_FA-50	689	10,8	0,96
CAC 100_E-0_RM-0	635	19,9	0,98
CAC 90_E-10	720	8,2	0,79
CAC 80_E-20	690	9,3	0,78
CAC 70_E-30	625	8,7	0,77
CAC 50_E-50	530	12,9	0,76
CAC 90_RM-10	623	14,1	0,82
CAC 80_RM-20	740	4,3	0,84
CAC 70_RM-30	644	13,3	0,68
CAC 50_RM-50	740	10,1	0,76
CAC 100_MVT-0	722	4,5	0,99
CAC 80_MVT-20	753	6,3	0,87
CAC 70_MVT-30	743	7,3	0,88
CAC 70_MVT-20 MVP-10	721	4,3	0,89
CAC 67_LP-33	750	9,5	1,00
CAC 74_LP-26	750	10,0	0,99
CAC 67_LC-33	720	11,0	0,96
CAC 74_LC-26	720	11,3	0,99

Respecto a los CAC con material volcánico (MVT y MVT/MVP), las mezclas con 20% y 30% de MVT presentaron un mayor flujo de asentamiento en comparación con la mezcla de referencia (CAC 100_MVT-0), este comportamiento confirma que el MVT genera un incremento en la fluidez de las mezclas. En cuanto a la mezcla ternaria (CAC 70_MVT-20-MVP-10) sí presentó una disminución de la fluidez. Los CAC con caliza comercial molida presentaron mayor trabajabilidad que los CAC con lodos calcáreos de la industria papelera. Al nivel mundial y particularmente en Francia, LP es una de las principales adiciones empleadas para la elaboración de CAC [45].

4.2.- Propiedades en Estado endurecido

Las propiedades evaluadas de los CAC en estado endurecido incluyen las mecánicas como resistencia a la compresión, tracción indirecta, absorción y porosidad. Estas propiedades dependen de parámetros tales como la relación a/c y las características de cada una de las adiciones, entre otros.

4.2.1.- Resistencia a la compresión

La Figura 1 muestra la evolución de la resistencia a la compresión con el tiempo de curado de las mezclas de CAC adicionadas con ceniza volante, escoria de carbón y residuo de mampostería. Para ello se moldearon probetas cilíndricas de 76,2 mm de diámetro x 152,4 mm de alto y se evaluó la resistencia a la compresión de acuerdo con ASTM C39. La mezcla con mayor resistencia (43,4 MPa) a 28 días de curado fue la que contenía 35% de FA (con 13% más de resistencia que su mezcla de referencia - CAC 100_FA-0), aunque hay que resaltar que es la mezcla con mayor contenido de material cementante (550 kg/m^3) en comparación con los CAC con RM, E, MVT y MVT/MVP, teniendo así menor relación agua/cementante, además es la adición con mayor índice de actividad Resistente. Por otra parte, reemplazos del cemento en porcentajes elevados (50%) de RM y E en las mezclas de CAC generaron pérdidas elevadas en la resistencia a la compresión de 31,1% y 26,9% respectivamente, en comparación a su mezcla de referencia (CAC 100_E-0_RM-0). Este comportamiento puede atribuirse a que la cantidad de RM o E presente en la mezcla es mayor que la cantidad requerida para combinarse con la cal (portlandita) liberada durante el proceso de hidratación [46]. En general, también se observa una reducción en la resistencia a la compresión a edades tempranas debido al efecto dilución [47], y en algunos casos a la velocidad de reacción muy baja.

Con base en los resultados obtenidos se podría identificar que la evolución de resistencia a la compresión más significativas de los concretos autocompactantes con diferentes adiciones (FA, E o RM) la obtuvieron los CACs con la mayor presencia de adición. Para los CAC con 35% y 50% de FA la evolución de resistencia desde los 28 días de curado a 90 días de curado fue de 12,7% y 33,1% respectivamente. Por otra parte, los CACs con 10%, 20%, 30% y 50% de escoria presentaron una evolución de la resistencia desde los 28 días a los 90 días de curado de 16,08%, 17,16%, 20,3% y 44,4% respectivamente. En cuanto a los CACs con RM la mayor evolución de la resistencia a la compresión desde los 28 días de curado a los 90 días de curado la presentó el CAC con 50% de RM con una ganancia de resistencia de 33,99% seguida por el CAC con 30% RM la cual tuvo una ganancia de 24,24%

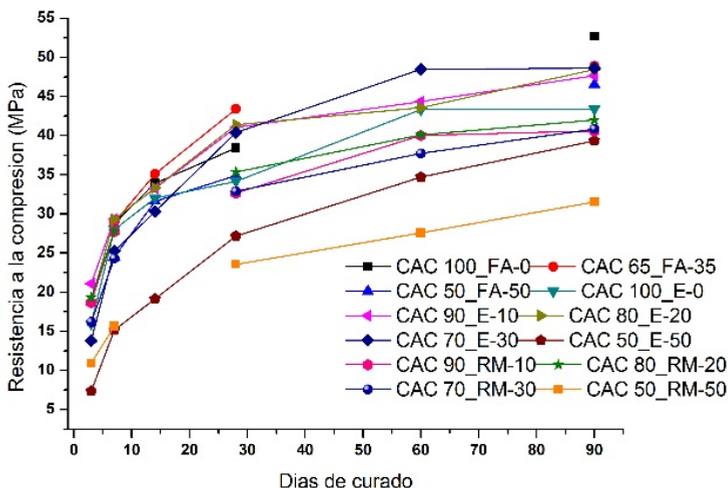


Figura 1. Resistencia mecánica de CAC con FA, E y RM [38-40]

En la Fig. 2 se observa el comportamiento resistente con el tiempo de curado de las mezclas de CAC con caliza molida, lodo calcáreo, material volcánico (MVT y MVT/MVP) y la de la mezcla CAC65-FA-35, la cual presentó la mayor resistencia a la compresión a los 28 días de curado. La mezcla CAC 67_LP-33, que contenía una cantidad elevada de finos (675 kg/m^3), presentó un buen desempeño de la resistencia a la compresión, y esto es atribuido, según algunos investigadores [48], a que la piedra caliza en reemplazos pequeños acelera la hidratación del cemento debido a la creación de lugares de nucleación, lo cual influencia las reacciones de hidratación, además porque el uso de adiciones con grandes áreas superficiales puede conducir a una baja porosidad capilar y por lo tanto a aumentar la resistencia [49]. Con respecto a los CAC con material volcánico, todas las mezclas presentaron una menor resistencia con respecto a su mezcla de referencia (CAC 100_MVT-0) [50], y su evolución de resistencia no superó el 21% desde los 28 días de curado a los 90 días de curado para la mezcla con 30% de MVT (CAC 70_MVT-30), la cual presentó la mayor ganancia de resistencia en este periodo de tiempo; sin embargo, comparándola con la mezcla de referencia (CAC 100_MVT-0) la resistencia era 42,8% menor a los 28 días de curado.

En general, cuando a las mezclas de cemento Portland se le incorporan adiciones minerales se pueden producir tres diferentes efectos, que dependiendo de las proporciones en qué se encuentren mezclados y de sus características físicas, químicas y mineralógicas podrá variar su influencia en función del tiempo. Los efectos son: efecto dilución, efecto de relleno y la acción puzolánica. En el caso de las adiciones LP, LC y el MVT, al ser materiales inertes, en las mezclas con porcentajes bajos de sustitución predominó el efecto de relleno. En el caso de la mezcla con 50% de RM (CAC 50_RM-50) y 50% de E (CAC 50_E-50) se apreció un efecto de dilución, con disminución significativa de las propiedades

mecánicas a edades tempranas, lo que era de esperar, dado que las reacciones puzolánicas ocurren después de las reacciones de hidratación del cemento, pues es necesaria la formación del hidróxido de calcio, el cual se genera en estas [50] y, por otra parte, no todas las puzolanas presentan reactividades elevadas, puesto que la velocidad de reacción está influenciada por la composición química de las puzolanas, así como también, por el área superficial de las partículas y por su amorficidad [51], derivada, entre otros, del proceso de enfriamiento de ellas.

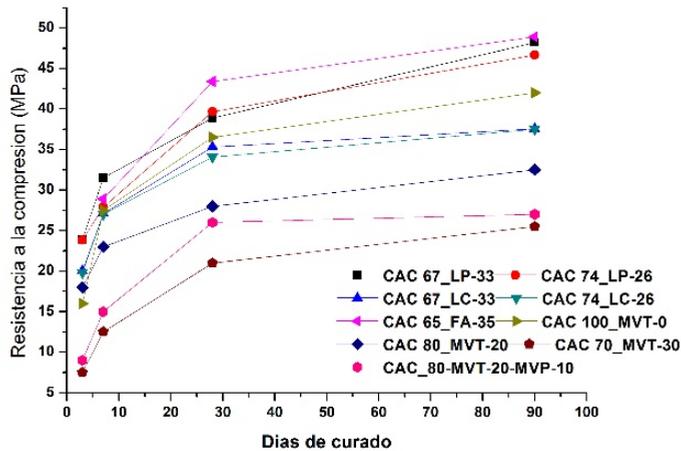


Figura 2. Resistencia a la compresión de CAC con MVT, MVT/MVP, LP y LC y CAC 65_FA-35 [37,38].

4.2.2 Resistencia a la tracción indirecta

La resistencia a la tracción indirecta es otra de las propiedades importantes en el diseño de estructuras. Aunque el concreto no está normalmente diseñado para soportar fuerzas de tracción, el conocimiento de la resistencia a la tracción se vuelve importante, ya que este se emplea para estimar el nivel de carga bajo el cual empieza el agrietamiento [52]. Por el ejemplo en el diseño de concretos simples y con refuerzo, como es el caso de presas y losas, la capacidad del concreto para soportar fuerzas de tracción es tan importante como su capacidad de soportar esfuerzos a la compresión. En la figura 3 se aprecian los resultados experimentales de las mezclas de CAC con FA y RM sometidas al ensayo de tracción indirecta de acuerdo con la norma ASTM C496. La mezcla CAC 65_FA-35 presentó la mayor resistencia a la tracción indirecta al igual que en el caso de la resistencia a la compresión, corroborando la relación que existe en los concretos entre estas dos propiedades. Las mezclas de CAC con FA presentaron mayor cantidad de cementante que las mezclas de CAC con RM, lo que incide en un mayor desempeño en la prueba a la tracción. En la Fig. 3, también se observa que a 7 días de curado,

En mezclas con mayores porcentajes de reemplazo de cemento por la adición hay una disminución en la resistencia a la tracción indirecta para las mezclas endurecidas con adición de FA y RM, en las cuales, a edades posteriores, su comportamiento varía debido a las reacciones como sucede a los 90 días con las mezclas de CAC con FA y a los 180 días de curado con los CAC con RM.

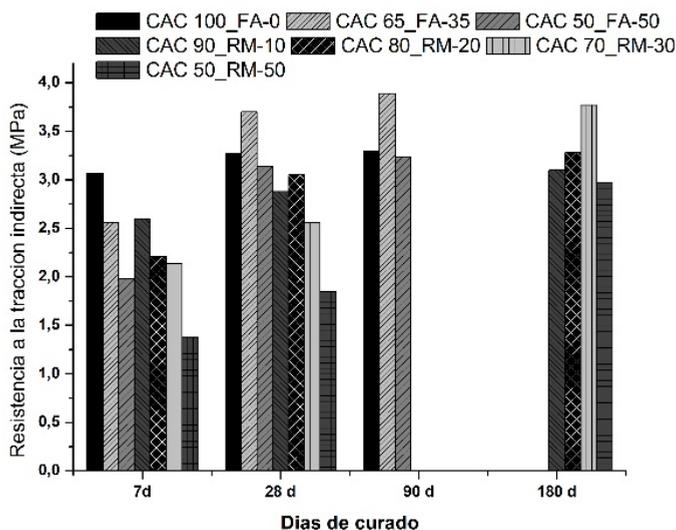


Figura 3. Resistencia a la tracción indirecta de CAC con FA o RM

Las mezclas de CAC con E, MVT y MVT/MVP se evaluaron a 28, 90 y 360 días, respectivamente. La Fig. 4 muestra que estas mezclas presentaron una relación proporcional entre la resistencia a la compresión y la tracción indirecta. En cuanto a la mezcla con escoria de carbón (E), el empleo de esta adición produjo una ganancia de 4,5% con respecto a su mezcla de control, esto puede ser debido a que esta adición hace reducir la cantidad de cristales de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ para producir más tobermorita (C-S-H).

Las mezclas de CAC con material volcánico presentaron una disminución resistente con respecto a la mezcla de referencia (CAC 100_MVT-0); sin embargo, a pesar de esta reducción, la mezcla con 20% de MVT presentó similar resistencia que la mezcla de referencia, a lo largo del periodo de evaluación, y solo hasta los 360 días de curado se observó una reducción del 13%, lo que confirma que en esta mezcla predominó el efecto de relleno y gracias a la dispersión de las partículas se promovió la densificación de la matriz cementicia, pero al incrementarse el tiempo de curado el desarrollo de las reacciones de hidratación del cemento disminuyó y no hubo mayor contribución del MVT debido a que es un material inerte.

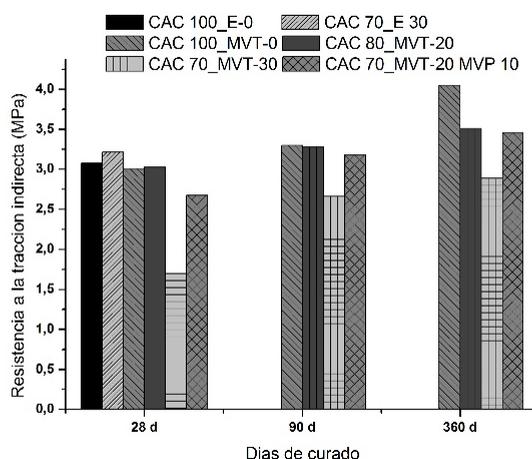


Figura 4. Resistencia a la tracción indirecta de CAC con E, MVT o MVT / MVP

4.2.3 Absorción y porosidad

Las mediciones de absorción y del de volumen de poros permeables de los CAC se realizaron, de acuerdo con ASTM C642, en probetas cilíndricas de 76,2 mm de diámetro x 152,4 mm de alto, siendo curadas a los 28 días. Los resultados de la absorción y porosidad se presentan en la Figs. 5 y 6. Los resultados indican que el efecto de la adición en las mezclas a 28 días de curado no presenta una influencia positiva, ya que no se aprecia una reducción significativa de los poros permeables y de la absorción de agua; sin embargo, la mezcla con 30% de E (CAC 70% -E-30) sí presentó una reducción de estos dos parámetros en comparación con su mezcla de referencia. La razón a esto puede deberse a la conversión de poros continuos en discontinuos debido a la reacción puzolánica en esta mezcla a los 28 días de curado, de igual manera sucede con la mezcla CAC_65 FA-35, pero en menor grado. Estas dos adiciones (E y FA) fueron las que presentaron un mayor IAR, por lo que su efecto como material cementicio suplementario se puede observar a tiempos de hidratación más cortos en comparación con los otros materiales de adición. Estas mezclas presentaron una disminución en el porcentaje de absorción de 11,2% y 3% respectivamente, en comparación a sus mezclas de referencia. Por otra parte, las mezclas con mayor contenido de poros permeables en comparación con su mezcla de referencia son las que presentaron menor resistencia a la compresión. De hecho, el aumento del contenido de poros disminuye la capacidad de carga del concreto y por lo tanto la resistencia a la compresión disminuye. En general, las mezclas con los mayores porcentajes de reemplazo del cemento presentaron mayores porosidades y absorción de agua, lo cual está acorde con lo mencionado por Mejía & Rodríguez [52].

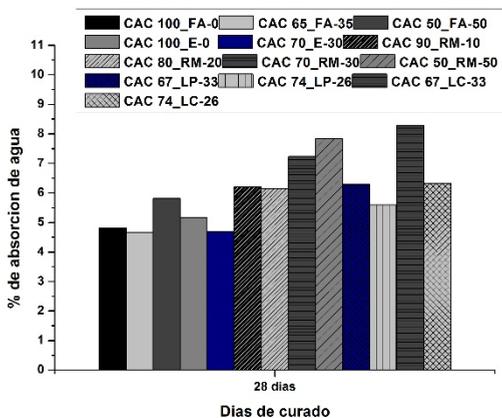


Figura 5. Absorción después de inmersión de los CACs

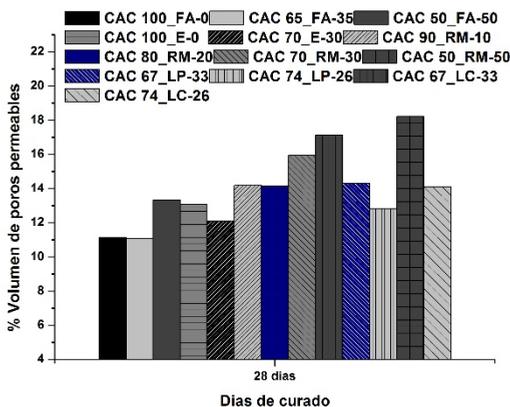


Figura 6. Volumen de poros permeables de los CACs

5.- CONCLUSIONES

Con base en los resultados experimentales, se extraen las siguientes conclusiones:

- Los materiales estudiados: FA, E, LP, y el RM, MVP y MVT si tienen potencial para ser adicionados en los CAC y obtener propiedades adecuadas en las mezclas, tanto en estado fresco como endurecido. Todas las mezclas de CAC conteniendo adiciones cumplieron con el flujo de asentamiento de acuerdo con el criterio expuesto en las Directrices Europeas para concreto autocompactante – EFNARC, ya que el diámetro

de los concretos después de elevar el cono de manera vertical se encontraba entre 623 y 750 mm. Sin embargo, al emplear más de 30% de escoria como reemplazo de OPC en CAC la mezcla (CAC 50_E-50) no superó el límite inferior (550 mm), especificado en esa directriz.

- El empleo de escoria de carbón (E) como puzolana en la elaboración de CAC permitió la reducción del contenido de cemento hasta un 30%, destacando su aporte en la resistencia de las mezclas a tempranas edades, siendo excelente a edades prolongadas o superiores a los 28 días.
- La incorporación de los finos de mampostería (RM) como sustitución parcial del cemento Portland no afecta de gran manera el comportamiento mecánico de los concretos elaborados cuando se utilizaron porcentajes bajos (10% y 20%). Sin embargo, se resalta, que el desarrollo de la resistencia a la compresión a edades cortas fue aceptable, logrando incluso valores muy similares a los de la mezcla de control hasta con un 30% de reemplazo del cemento por RM.
- El reemplazo de cemento Portland en cantidades elevadas como el 50% por RM o E afecta de gran manera el desempeño mecánico y en estado fresco de las mezclas de CAC, por el contrario, la presencia de FA en las mezclas de CAC aumentó el flujo de asentamiento, la relación de bloqueo y aumento de la fluidez.
- La incorporación de material volcánico a la mezcla de CAC como reemplazo del cemento Portland produce diferentes efectos sobre las propiedades mecánicas, tales como el efecto de relleno o la dilución dependiendo de las proporciones, donde es más notorio el efecto dilución para la mezcla con 30% de MVT, lo que genera una pérdida significativa en las propiedades mecánicas.

AGRADECIMIENTOS

Los autores presentan sus agradecimientos al proyecto “Investigación de un material cementicio ecoeficiente para elementos de construcción de bajo costo”, contrato FP44842-399- 2015, soportado financieramente por COLCIENCIAS- “EL PATRIMONIO AUTONOMO FONDO NACIONAL DE FINANCIAMIENTO PARA LA CIENCIA, LA TECNOLOGIA Y LA INNOVACIÓN, FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS” y al Departamento Administrativo de Ciencia y Tecnología (COLCIENCIAS) por el soporte brindado. Asimismo, se reconoce el apoyo logístico brindado por el Centro de Excelencia de Nuevos Materiales (CENM).

REFERENCIAS

- [1] Shi, C., Wu, Z., Lv, K. and Wu, L., 'A review on mixture design methods for self-compacting concrete', *Construction and Building Materials* 84 (2015) 387–398.

Concreto autocompactante con materiales cementicios suplementarios de Colombia

HAC2018 | V Congreso Iberoamericano de Hormigón Autocompactante y Hormigones Especiales

- [2] Zhao, H., Sun, W., Wu, X. and Gao B., 'The properties of the self-compacting concrete with fly ash and ground granulated blast furnace slag mineral admixtures', *Journal of Cleaner Production* **95** (2015) 66-74.
- [3] Ozawa, K., Maekawa, K., Kunishima M. and Okamura, H., 'Performance of concrete based on the durability design of concrete structures'. In 'Proceedings of the Second East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction', Chiang Mai, Thailand, (1989) 1346-2354.
- [4] Okamura H. and Ouchi, M., 'Self-compacting high-performance concrete', *Progress in Structural Engineering and Materials* **1**(4) (1998) 378-383.
- [5] Sua-Iam G., Makul, N., 'Effect of incinerated sugarcane filter cake on the properties of self-compacting concrete', *Construction and Building Materials* **130** (2017) 32–40.
- [6] Shi, C., 'Design and application of self-compacting lightweight concrete'. In: SCC'2005-China: 1st international symposium on design, performance and use of self-consolidating concrete. RILEM Publications SARL; 2005.
- [7] Shi, C. and Wu, Y., 'Mixture proportioning and properties of self-consolidating lightweight concrete containing glass powder', *ACI Materials Journal* **102** (5) (2005) 355-363.
- [8] Ardalan, R., Joshaghani, A. and Douglas Hooton, R., 'Workability retention and compressive strength of self-compacting concrete incorporating pumice powder and silica fume', *Construction and Building Materials* **134** (2017)116–122.
- [9] Granata, M.F., 'Pumice powder as filler of self-compacting concrete', *Construction and Building Materials* **96** (2015) 581–590.
- [10] EFNARC. 'Specification and Guidelines for Self-compacting Concrete'. English. European Federation for Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems, (2002) Norfolk, UK.
- [11] Puthipad, N., Ouchi, M., Rath, S. and Attachaiyawuth, A., 'Enhancement in self-compactability and stability in volume of entrained air in self-compacting concrete with high volume fly ash' *Construction and Building Materials* **128** (2016) 349–360.
- [12] Habert, G., Lacaillerie, de E.D.J.B. and Roussel, N., 'An environmental evaluation of geopolymer based concrete production reviewing current research trends', *Journal of Cleaner Production* **19** (11) (2011) 1229-1238.
- [13] Barluenga, G., Puentes, J. and Palomar, I., 'Early age monitoring of self-compacting concrete with mineral additions', *Construction and Building Materials* **77** (2015) 66–73.

- [14] Dinakar, P., Sethy, K.P. and Sahoo, U.C., 'Design of self-compacting concrete with ground granulated blast furnace slag', *Materials & Design* **43** (2013) 161–169.
- [15] Ramezani-pour, A.A., Kazemian, A., Sarvari, M. and Ahmadi, B., 'Use of natural zeolite to produce self-consolidating concrete with low Portland cement content and high durability', *Journal of Materials in Civil Engineering* **25** (5) (2013) 589–596.
- [16] Mahalingama, B., Nagamani, K., Kannanc, L.S., Mohammed Haneefaa, K. and Bahurudeen, A., 'Assessment of hardened characteristics of raw fly ash blended self-compacting concrete', *Perspectives in Science* **8** (2016) 709-711.
- [17] Van den Heede, P., Gruyaerta, E. and De Belie, N., 'Transport properties of high-volume fly ash concrete: capillary water sorption, water sorption under vacuum and gas permeability', *Cement Concrete and Composites*. **32** (10) (2010) 749-756.
- [18] Harison, A., Srivastava, V. and Herbert, A., 'Effect of fly ash on compressive strength of Portland pozzolona cement concrete', *Journal of Academia and Industrial Research (JAIR)* **2** (8) (2015) 476-479.
- [19] Saleh Ahari, R., Kemal Erdem, T. and Ramyar, K., 'Effect of various supplementary cementitious materials on rheological properties of self-consolidating concrete', *Construction and Building Materials* **75** (2015) 89-98.
- [20] Özbay, E., Erdemir, M. and Ibrahim H. 'Utilization and efficiency of ground granulated blast furnace slag on concrete properties – A review', *Construction and Building Materials* **105** (2016) 423–434.
- [21] Silva Y. 'Investigación sobre utilización de agregado reciclado de concreto y material de muros de mampostería en concretos autocompactantes', Tesis de Maestría. Universidad del Valle, (2015) Cali-Colombia.
- [22] Boukendakdji, O., Kadri, E-H. and Kenai, S., 'Effects of granulated blast furnace slag and superplasticizer type on the fresh properties and compressive strength of self-compacting concrete', *Cement & Concrete Composites* **34** (2012) 583–590.
- [23] EFNARC. The European Guidelines for Self-Compacting Concrete Specification, Production and Use. (2005). <http://www.efnarc.org/pdf/SCCGuidelinesMay2005.pdf>
- [24] Altoubat, S., Badran, D., Junaid, M.T. and Leblouba, M., 'Restrained shrinkage behavior of Self-Compacting Concrete containing ground-granulated blast-furnace slag', *Construction and Building Materials* **129** (2016) 98–105.
- [25] Sua-Iam, G. and Makul, N., 'Use of increasing amounts of bagasse ash waste to produce self-compacting concrete by adding limestone powder waste', *Journal of Cleaner Production* **57** (2013) 308-319.

- [26] Sua-Iam, G. and Makul, N., 'Use of limestone powder during incorporation of Pb-containing cathode ray tube waste in self-compacting concrete', *Journal of Environmental Management* **128** (2013) 931-940.
- [27] Da Silva, P.R. and De Brito, J., 'Experimental study of the porosity and microstructure of self-compacting concrete (SCC) with binary and ternary mixes of fly ash and limestone filler', *Construction and Building Materials* **86** (2015) 101–112.
- [28] Massazza F., 'Pozzolanic Cements'. *Cement and Concrete Composites* **15** (4) (1993) 185–214.
- [29] Burgos, D., Cardona, L., Gordillo, M. and Delvasto S. 'Valoración y efectos puzolánicos del material volcánico del puracé', *Revista EIA* **12** (23) (2015) 83-93.
- [30] Ardalan, R.B., Joshaghani, A. and Douglas Hooton, R., 'Workability retention and compressive strength of self-compacting concrete incorporating pumice powder and silica fume', *Construction and Building Materials* **134** (2015) 116–122.
- [31] Kavitha, O.R., Shanthi, V.M., Prince Arulraj, G. and Sivakumar, P., 'Fresh, micro- and macrolevel studies of metakaolin blended self-compacting concrete', *Applied Clay Science* **114** (2015) 370–374.
- [32] Kannan, V. and Ganesan, K., 'Chloride and chemical resistance of self compacting concrete containing rice husk ash and metakaolin', *Construction and Building Materials* **51** (2014) 225–234.
- [33] Liu, Q., Tong, T., Liu, S., Yang, D. and Yu, Q., 'Investigation of using hybrid recycled powder from demolished concrete solids and clay bricks as a pozzolanic supplement for cement', *Construction and Building Materials* **73** (2014) 754–763.
- [34] Xiao, J., Li, W., Fan, Y. and Huang X. 'An overview of study on recycled aggregate concrete in China (1996–2011) ', *Construction and Building Materials*. **31** (2011) 364–83.
- [35] Guojue, W., Yingmin, L., Nina, Z. and Ingham, J.M., 'Testing and modelling the in-plane seismic response of clay brick masonry walls with boundary columns made of precast concrete interlocking blocks', *Engineering Structures* **131** (2017) 513–529.
- [36] Molnar, M. and Ivanov O.L., 'Clay brick masonry facades with cracks caused by corroding bed joint reinforcement – Findings from field survey and laboratory study', *Construction and Building Materials* **30** (2016) 775–783.
- [37] Silva, Y., Burgos, D., Valencia, W., Delvasto, S. and Alvarez J., 'Concretos autocompactantes a partir de lodo calcáreo de la industria papelera', *Revista de la Construcción* **12** (2) (2013) 166-176.

- [38] Silva, Y. and Delvasto S., 'Concreto autocompactante con diferentes niveles de ceniza volante y escoria de combustión de carbón', *Revista Colombiana de Materiales* **5** (2013) 1-9.
- [39] Silva, Y., Robayo, R., Matthey, P. and Delvasto, S., 'Obtención de concretos autocompactantes empleando residuos de demolición', *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales* **35** (1) (2015) 86-94.
- [40] Robayo, R., Matthey, P., Silva, Y. and Delvasto, S., 'Comportamiento en estados fresco y endurecido de un concreto autocompactante, adicionado con escoria de carbón, y elaborado con agregado grueso de concreto reciclado', *Informador Tecnico* **78** (2) (2014) 128-139.
- [41] Burgos, D., Cardona, L., Delvasto, S., 'Estudio de dos materiales volcánicos y efecto del tipo de molienda en su reactividad', *Revista Ingeniería de Construcción* **29** (2) (2014) 159-174.
- [42] Burgos, D., Cardona, L., Gordillo, M. and Delvasto, S., 'Valoración y efectos puzolánicos del material volcánico del Puracé', *Revista EIA* **23** (12) (2015) 83-93.
- [43] Iqbal, S., Ali, A., Holschemacher, K., Ribakov, Y. and Bier, T., 'Effect of Fly Ash on Properties of Self-Compacting High Strength Lightweight Concrete', *Periodica Polytechnica Civil Engineering* **61** (1) (2017) 81-87.
- [44] Gesoglu, M., Guneyisi, E., Kocabag, M. E., Bayram, V. and Mermerdas, K., 'Fresh and hardened characteristics of self-compacting concrete made with combine use of marble powder, limestone filler and fly ash', *Construction and Building Materials* **37** (2012) 160-170.
- [45] Diederich, P., Mouret, M. and Ponchon, F., 'Simple tools achieving self-compacting ability of concrete according to the nature of the limestone filler' *Construction and Building Materials* **48** (2013) 840-852.
- [46] Shatat, M.R., 'Hydration behavior and mechanical properties of blended cement containing various amounts of rice husk ash in presence of metakaolin', *Arabian Journal of Chemistry* **9** (2016) 1869–1874.
- [47] Itim, A., Ezziane, K., Kadri, E-H., 'Compressive strength and shrinkage of mortar containing various amounts of mineral additions', *Construction and Building Materials* **25** (2011) 3603–3609.
- [48] Moon, G.D., Oh, S., Jung, S.H. and Choi, Y.C., 'Effects of the fineness of limestone powder and cement on the hydration and strength development of PLC concrete', *Construction and Building Materials* **135** (2017) 129-136.

Concreto autocompactante con materiales cementicios suplementarios de Colombia

HAC2018 | V Congreso Iberoamericano de Hormigón Autocompactante y Hormigones Especiales

- [49] Al-Chaar, G., Alkadi, M., Yaksic, D. and Kallemeyn L., 'The use of natural pozzolan in concrete as an additive or substitute for cement. U.S', Army Corps of Engineers (2011) Washington, DC.
- [50] Burgos, D., 'Concreto autocompactante adicionado con material volcánico'. Tesis Doctoral. Universidad del Valle (2017), Cali-Colombia.
- [51] Sabet, F.A., Ali Libre, N. and Shekarchi, M., 'Mechanical and durability properties of self-consolidating high performance concrete incorporating natural zeolite, silica fume and fly ash', *Construction and Building Materials* **44** (2013) 175– 184.
- [52] Mejía, R. and Rodríguez, P., 'Durabilidad y corrosión en materiales cementicios. En curso internacional sobre durabilidad y corrosión de materiales cementicios', CYTED (1999) San José de Costa Rica.