

FACTOR DE EFICACIA CEMENTANTE DE LA CENIZA VOLANTE EN HORMIGONES HÍBRIDOS CON ALTOS REEMPLAZOS

O.A. Cabrera¹, D. Viejo Mariño², A.M. Fernández-Jiménez², A. Palomo², O. Maltseva²

¹ Facultad de Ingeniería UNCPBA y CIFICEN (UNCPBA-CICPBA-CONICET),
Avda. del Valle 5737, 7400, Olavarría, Argentina, ocabrera@fio.unicen.edu.ar

² Instituto Eduardo Torroja de Ciencias de la Construcción (CSIC), Calle Serrano Galvache 4,
28033, Madrid, España, anafj@ietcc.csic.es

RESUMEN

Un cemento geopolimérico representaría una emisión de CO₂ entre 5 y 6 veces menor en comparación con la síntesis del cemento pórtland (CP), y la energía requerida para producir el cemento geopolimérico es 3,5 veces menor que la necesaria para un CP. El objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto de la activación físico-mecánica (molienda), la activación química y la combinación de ambos mecanismos en hormigones híbridos con altos contenidos de cenizas volantes (CV) por medio del cálculo del factor o coeficiente de eficacia cementante (*K*) de la CV. Para ello se emplearon mezclas con contenidos de materiales cementíceos de 260 y 300 kg/m³, y reemplazos de CP por CV de 50 y 70 %. Se determinó que el coeficiente "*K*" de la CV puede tener valores muy diferentes (0,068-0,609) por el tratamiento realizado, y por el porcentaje de reemplazo. Además, los incrementos del coeficiente "*K*" y de las resistencias a compresión y a tracción del hormigón se encuentran directamente relacionados.

Palabras claves: cementos híbridos, coeficiente de eficacia, cenizas volantes, hormigón.

INTRODUCCIÓN

El empleo de materiales activados alcalinamente pueden implicar beneficios ambientales por la reducción del consumo de recursos naturales, y en un menor impacto ecológico, ya que la síntesis de un cemento geopolimérico representaría una emisión de CO₂ entre 5 y 6 veces menor en comparación con la síntesis del CP. Además, la energía requerida para producir el cemento geopolimérico es 3,5 veces menor que la necesaria para un CP [1]. Por otra parte, los aglutinantes activados alcalinamente (CAA) forman parte del conjunto de herramientas actuales y a futuro, de "sistemas cementantes sostenibles". Estos aglutinantes, también denominados "geopolímeros", se pueden elaborar con una amplia gama de precursores de aluminosilicatos, con diferentes disponibilidad, reactividad, costo, valor, y además, el transporte de materiales a granel debe minimizarse, ya que esto puede dominar la huella de emisiones. Por esta razón, este tipo de cementos distan mucho de ser una solución única para satisfacer las futuras necesidades de materiales de construcción de una manera similar al uso del CP [2]. Dentro de estos conglomerantes se encuentran los cementos híbridos (CHIB) a partir de la mezcla de CAA y CP [3-5]. En la hidratación de los CHIB actúan los mecanismos del CP y los del CAA ya que se emplean materiales ricos en CaO, SiO₂ y Al₂O₃. El CHIB se caracteriza por emplear materiales como la CV y la escoria de alto horno (en cantidades del 70 % o más respecto al CP) [6]. Se debe tener en cuenta que la cantidad de adiciones minerales que se puede incorporar

a un hormigón está limitada por la disponibilidad de $\text{Ca}(\text{OH})_2$; y la reactividad de las adiciones. Al reducirse la cantidad de CP disminuye la cantidad de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ disponible para reaccionar con las adiciones, y se podría dar la circunstancia de tener un exceso de adición sin reaccionar. Por ello en los CHIB se adiciona un activador alcalino para potenciar la reacción de la CV, como en los CAA [7, 8].

En los productos de hidratación de los CHIB existe una mezcla de geles cementantes: el C-S-H de la hidratación del CP, el C-(A)-S-H de la reacción puzolánica de la CV, con pequeños contenidos de Al, y el N-A-S-H de la activación alcalina de la CV. Según la bibliografía, estos geles tienden a evolucionar a geles C-A-S-H, [6, 9, 10]. La proporción de cada gel en la mezcla depende de la alcalinidad generada en el medio, del porcentaje de CV en el aglomerante y del tiempo de hidratación.

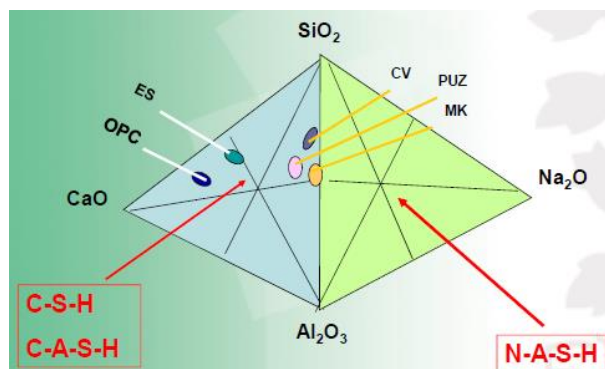


Figura 1: Geles de los cementos híbridos [11].

Por otra parte, el coeficiente “*K*” está relacionado con la parte del material cementíceo en un hormigón especial que se considera equivalente al CP. La norma cubana [12] establece que el coeficiente “*K*” de las puzolanas es el valor obtenido en la práctica que indica la parte de CP que se puede sustituir con una parte de material cementíceo suplementario sin afectar la resistencia a la compresión de un hormigón curado hasta los 28 días [13]. Cuando $K > 1$, indica que la adición es más eficiente que el CP, ya que el proceso de hidratación es más rápido, y entonces es posible ahorrar CP. Pero cuando $K < 1$, indica que la adición es menos eficiente que el CP ya que el proceso de hidratación es lento en comparación al PC, y en tal caso, se debe usar más cantidad de adición para lograr la resistencia requerida [14]. El objetivo de este trabajo es evaluar el efecto de la activación físico-mecánica (molienda), la activación química, y la combinación de ambos mecanismos en hormigones con CHIB y altos contenidos de CV por medio del cálculo del coeficiente de eficacia cementante “*K*” de la CV.

MATERIALES, DOSIFICACIONES Y METODOLOGIA

Los materiales aglomerantes empleados fueron un cemento Pórtland CEM I 52.5 R [15] y una CV cuya composición química se ajusta a los requisitos de la norma ASTM C618 [16] para las CV clase F. La CV se empleó en su estado original (CO), molida durante 30 minutos en un molino de bolas (CM) y activada alcalinamente (COA y CMA). La molienda incrementó el contenido de partículas de 10, 45 y 90 μm en un 13, 10 y 4 %, respectivamente, valores determinados con un granulómetro láser. Ambas CV tienen más del 80 % de sus partículas menores a 45 μm para lograr una activación alcalina óptima [17]. Las densidades de la CO y la CM fueron de 2,42 y 2,62, respectivamente. En la Tabla 1 se muestra la composición química de los materiales cementíceos. Como agregados, se empleó una arena natural silíceo (MF=2,89), y como agregado grueso se usó una mezcla al 50 % de canto rodado silíceo triturado “10-20 mm” y de piedra partida gabroídica “6-12 mm”. Las granulometrías de los agregados se ajustaron a los límites establecidos en la Instrucción española EHE-08 [18]. La base del diseño de los hormigones fue mantener el contenido de material cementíceo (CP+CV) constante, relativamente bajo y con un alto contenido de CV. Las mezclas tuvieron una relación a/mc de $0,60 \pm 0,20$, aunque predominantemente de 0,58. En todos los casos se empleó un aditivo superplastificante (G, V, S), y el aditivo activador (AL) se añadió a determinadas muestras. Las dosificaciones de los hormigones se muestran en la Tabla 2.

Tabla 1: Composición química del CP y de la CV (expresados como óxidos, en peso).

Óxidos (%)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	Otros	P.I.
CP	20,51	5,37	2,10	57,05	3,86	6,37	0,64	1,44	---	0,31	2,35
CV (Teruel)	39,03	27,06	19,5	6,401	1,04	1,76	0,162	1,41	0,958	0,85	1,82

Tabla 2: Composición de las mezclas de hormigones, en kg/m³.

Hormigones	Aglomerantes			Agregados		Aditivos		Agua	a/mc (en peso)	
	CP	Ceniza		Grueso	Fino	1SF	2AL			
		CO	CM							
P-260 (Patrón 1-2)	260	--	--	1130	820	2,50	--	162	0,62	
Serie 1	CO-50	130	130	--	1130	800	1,82	--	150	0,58
	CM-50	130	--	130	1130	800	1,82	--	156	0,60
	COA-50	130	130	--	1130	800	1,82	77	73	0,58
	CMA-50	130	--	130	1130	800	1,82	77	73	0,58
Serie 2	CO-70	75	175	--	1100	757	1,19	--	207	0,85
	CM-70	78	--	182	1169	807	1,30	--	141	0,55
	COA-70	78	--	182	1170	810	1,82	77	73	0,58
	CMA-70	78	--	182	1173	810	1,82	77	73	0,58
P-300 (Patrón 3)	300	--	--	984	784	1,50	--	174	0,58	
Serie 3	CO-50-V	150	150	--	984	784	1,50	--	174	0,58
	CM-50-V	150	--	150	984	784	1,50	--	174	0,58
	CMO-50-V	150	--	150	984	784	1,50	77	73	0,58
	CMA-50-S	150	--	150	984	784	1,50	77	73	0,58

¹En el P-260 y en las Series 1 y 2 se empleó Master Glenium ACE 425. En el P-300 y las mezclas identificadas con V de la Serie 3 se utilizó Sika Viscocrete 5940. En CMA-50-S, Sikament 250.

²AL = Aditivo desarrollado en el Instituto E. Torroja. Este aditivo se disuelve en una importante cantidad de agua, por ello se contabiliza como líquido al calcular la relación a/mc.

Se elaboraron tres series de hormigones: Serie 1, con 260 kg/m³ de material cementíceo y un 50 % de reemplazo de CP por CV. El cemento se hidrata con agua, en ausencia (CO-50 y CM-50) y en presencia del aditivo AL (COA-50 y CMA-50); la Serie 2, es igual a la anterior pero con un 70 % de reemplazo, y la Serie 3, con 300 kg/m³ de material cementíceo con un 50 % reemplazo. La compactación del hormigón fue por varillado en las mezclas plásticas y con mesa vibratoria en las secas. Las probetas cilíndricas de 100x200 mm fueron curadas en cámara húmeda (HR > 95 % y 20±2 °C) hasta la edad de 28 días. Existen varios criterios para calcular el coeficiente "K" [13, 14, 19, 20, 21, 22], en este caso se considero para una determinada edad, plantear la resistencia en función de la relación a/c para los hormigones con CP, y la relación a/(c+K.cv), para los que contienen CV. Luego, se estableció la relación entre las resistencias obtenidas, y de allí se calculó el coeficiente "K".

RESULTADOS EXPERIMENTALES Y SU DISCUSION

Índice de actividad resistente de la CV con cemento pórtland (IAR)

La norma UNE-EN 196-1 evalúa la puzolanicidad comparando la resistencia mecánica de dos morteros de CP, elaborados sin adición mineral y con un 25 % del material puzolánico [23]. Los morteros tuvieron una relación "arena/material cementíceo = 3/1", y una relación a/mc = 0,50 de acuerdo a la norma EN [24]. El ensayo IAR es un requisito indispensable para la utilización de una adición puzolánica en el hormigón. El valor del IAR se calcula por medio de la ecuación (1).

$$IAR (\%) = 100 \cdot (A/B) \quad (1)$$

Donde: *A* y *B* son los valores promedio de la resistencia a compresión de morteros, en MPa, con CV, y con el 100% de CP, respectivamente.

El índice *IAR* se obtuvo para la CV en estado original, molida, y molida y activada alcalinamente (25%CO, 25%CM y 25%CMA, respectivamente). Los resultados de la resistencia a compresión de los morteros y del índice *IAR* se muestran en la Figura 2. En dicha figura se destaca que en todos los casos los valores del *IAR* cumplen con el valor mínimo del 75 % que especifican la norma UNE-EN 196 y la Instrucción EHE-08 para el uso de las CV en hormigones [18, 23].

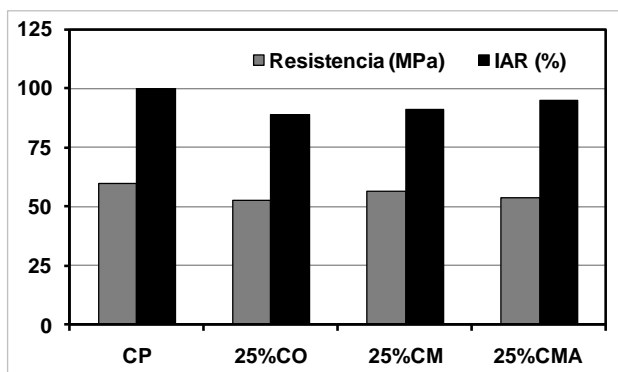


Figura 2: Resistencia de los morteros e índice *IAR*.

Método de cálculo del coeficiente de eficiencia “*K*” de la ceniza volante

La instrucción EHE-08 establece un límite de reemplazo del 20 % para el hormigón pretensado. En hormigones de alta resistencia se permite la adición simultánea de CV y humo de sílice (HS), siempre que el porcentaje de HS no sea superior al 10 %, y que el total de adiciones no supere al 20 %. En este caso la CV sólo se contempla a efecto de mejorar la compactación y la reología del hormigón, sin que se contabilice como parte del conglomerante. Para el resto de los hormigones el límite es un 35 % de reemplazo, y para la CV el valor de “*K*” es de 0,30. La Instrucción especifica que los hormigones con adición de CV tienen que fabricarse exclusivamente con cemento CEM I [15]. Este código no incluye a los CAA ni a los CHIB, y por ello no establece un valor de “*K*” para estos tipos de cementos activados alcalinamente.

Algunos autores han observado que el valor “*K*” de las CV con respecto a la resistencia a la compresión a 28 días varía en un amplio rango dependiendo de la cantidad de CV, la incorporación de aditivos químicos, el tipo de CP, y el nivel de resistencia elegido [25]. Otros, opinan que la reacción de las CV comienza después de una o más semanas, y los valores de eficacia pueden ser muy bajos o incluso negativos en edades tempranas [26]. El valor de “*K*” según diferentes códigos puede valer, para reemplazos de hasta el 25 %, 0,3, 0,4 y 0,4 para los códigos alemanes, británicos y del CEB-FIP, respectivamente [27].

En este trabajo para determinar el coeficiente “*K*” se partió de fijar una curva similar a la indicada por el ACI 211 [28], donde relaciona la resistencia a compresión y la relación *a/c* de acuerdo con la ecuación (2), donde: *A* y *B* son dos constantes que valen 122,18 MPa y 13,92, respectivamente. En el caso de incluir CV con el criterio de la EHE-08 la ecuación (2) pasa a ser la (3), donde se sustituye el valor del contenido de CP, “*c*”, por “*K.cv*”.

$$f'_{cp} = A/B^{a/c} \quad (2)$$

$$f'_{cp+cv} = A/B^{a/(c+K.cv)} \quad (3)$$

$$\frac{f'_{cp}}{f'_{cp+cv}} = \frac{[A/B^{a/c}]}{[A/B^{a/(c+K.cv)}]} \quad (4)$$

Luego, realizando el cociente entre las resistencias a 28 días (Figura 3), f'_{cp} y f'_{cp+Kcv} $K = \left\{ \frac{a}{\left[\left(\frac{a}{c} \right) + \left(\log \frac{f'_{cp}}{f'_{cp+cv}} \right) / (\log B) \right]} - c \right\} / cv$ (5) (4), se despejó el coeficiente “K” según la ecuación (5).

Análisis de la resistencia a compresión de los hormigones híbridos

Los hormigones de la Serie 1 tuvieron una consistencia entre seca y plástica, con una elevada cohesividad. A los 28 días, presentaron una resistencia a compresión de 23 ± 4 MPa, es decir, del 60 ± 11 % de la resistencia del hormigón patrón (38 MPa). En la Serie 2, en el estado fresco los hormigones tuvieron una consistencia entre seca y plástica. En el caso de la CO absorbe más agua que la CV molida, y su densidad es un 7,6 % menor.

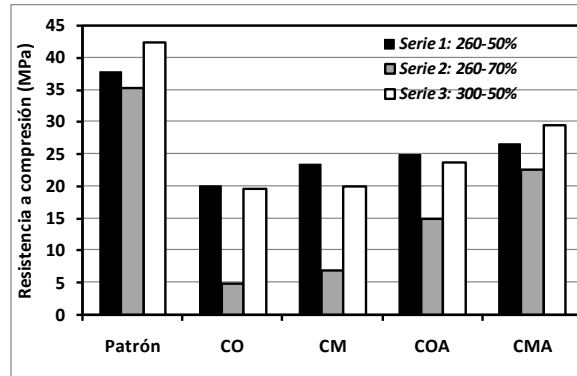


Figura 3: Resistencia a 28 días, para las 3 series.

Este comportamiento se relaciona con que el agua sustituye al aire de las esferas de la CV [4], y no se tiene certeza sobre la relación a/c efectiva. En el estado endurecido, con un reemplazo del 70 %, los hormigones no activados presentaron una resistencia baja (5-7 MPa). Este desempeño se atribuye al efecto de dilución al compararlos con la resistencia del patrón, y al hacerlo con las otras series, al menor contenido de CP (78 kg/m^3 , respecto a 130 y 150 kg/m^3 de las Series 1 y 3, respectivamente). Con un menor contenido de CP habrá una disminución de la cantidad de CSH y del Ca(OH)_2 . El menor contenido de portlandita desarrollará una menor cantidad de geles de la reacción puzolánica, y parte de la CV no reaccionará. En cambio, los hormigones que contenían el aditivo activador alcanzaron 19 ± 4 MPa a los 28 días (54 ± 11 % del P-260, 35 MPa).

Además, los hormigones de la Serie 3, con mayor contenido de materiales cementíceos, presentaron una consistencia muy plástica. A los 28 días, la resistencia a compresión fue de 25 ± 5 MPa, es decir, un 59 ± 12 % de la resistencia del P-300 (42 MPa). Por otra parte, los incrementos de resistencia debidos a los tratamientos sobre la CV respecto a los hormigones con CV en estado original, se muestran en la Tabla 3. Los valores para reemplazos del 50 % (Series 1 y 3) son relativamente similares. En cambio para un reemplazo del 70 % de CP por CV (Serie 2) el incremento de resistencia es de varios órdenes de magnitud en los que la CV fue activada y/o molida y activada, debido a que se comparan con valores muy bajos de resistencia (CO y CM) por el gran contenido de CV.

Tabla 3: Efecto de los tratamientos de la CV s/la resistencia de los hormigones, en %.

Mezcla/Contenido material cementíceo	CP+CV= 260 kg/m^3		CP+CV= 300 kg/m^3
% reemplazo de CP por CV – (Serie)	50 – (1)	70 – (2)	50 – (3)
Efecto de la molienda, CO-CM	17	45	1
Efecto de la activación, CO-COA	24	214	20
Efecto de la activación, CM-CMA	14	226	48
Efecto conjunto, CO-CMA	33	374	50

En las tres series el mayor efecto sobre la resistencia se obtiene cuando la CV es molida y activada alcalinamente (efecto conjunto, comparando la CO con la CMA). En un trabajo

previo [17], para el hormigón CMA a los 28 días se observó por medio de un equipo SEM/EDAX la formación de geles cementantes compuestos por sílice, calcio, aluminio, y en algunos casos algo de sodio. En el CHIB hidratado se determinó la existencia de una mezcla de geles: el C-S-H de la hidratación del CP con pequeños contenidos de Al, C-(A)-S-H de la reacción puzolánica de la CV, y el N-A-S-H de la activación alcalina de la CV. En este caso, como la CV es pobre en calcio se obtiene como principal producto de reacción un aluminosilicato alcalino amorfo, gel tipo N-A-S-H que es considerado como una masa sólida densa, compacta, duradera y resistente [29].

Análisis del coeficiente eficiencia “K” de la CV con distintos tratamientos

El valor del coeficiente “K” en las tres series se incrementa a medida que los tratamientos mejoran la reactividad de la CV (Tabla 4 y Figura 4). Ese incremento pasa de 0,265 a 0,512, de 0,068 a 0,609 y de 0,184 a 0,513, para las Series 1, 2 y 3, respectivamente. Además, el valor de “K” es menor para el reemplazo del 70 % que en el del 50 %, sin activación alcalina. En el caso de la CV molida y activada, el valor de “K” es similar para las tres series de hormigones híbridos, y además, las correspondientes resistencias de las mezclas CMA fue de $26,5 \pm 3,5$ MPa. Tal vez esto se deba a que han alcanzado un alto grado de reacción de la CV ya que a los 90 días, el coeficiente “K” estuvo entre 0,468 y 0,628 para la COA, y entre 0,463 y 0,627 para la CMA, valores prácticamente similares que a los 28 días. En estos hormigones de bajo contenido de material cementíceo y altos valores de reemplazo, el efecto de la molienda, la activación alcalina, y ambos tratamientos conjuntos, respecto a la CO, genera incrementos de la eficacia de la CV.

Tabla 4: Coeficiente “K” de la CV y efecto de los tratamientos de la CV s/el coef. “K”.

Contenido material cementíceo	CP+CV=260 kg/m ³		CP+CV=300 kg/m ³
% reemplazo de CP por CV – (Serie)	50 – (1)	70 – (2)	50 – (3)
Coeficiente “K” para CO	0,265	0,068	0,184
Coeficiente “K” para CM	0,390	0,135	0,194
Coeficiente “K” para COA	0,443	0,609	0,315
Coeficiente “K” para CMA	0,512	0,544	0,513
Efecto de la molienda, CO-CM, en %	47	99	6
Efecto de la activación, CO-COA, en %	67	790	71
Efecto de la activación, CM-CMA, en %	31	303	164
Efecto conjunto, CO-CMA, en %	93	700	179

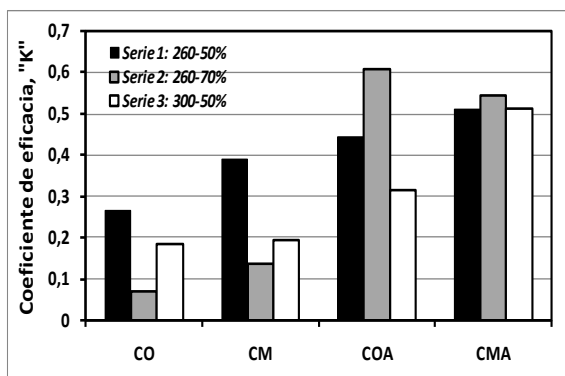


Figura 4: Coeficiente de eficacia “K” a los 28 días, para las 3 series de hormigones híbridos.

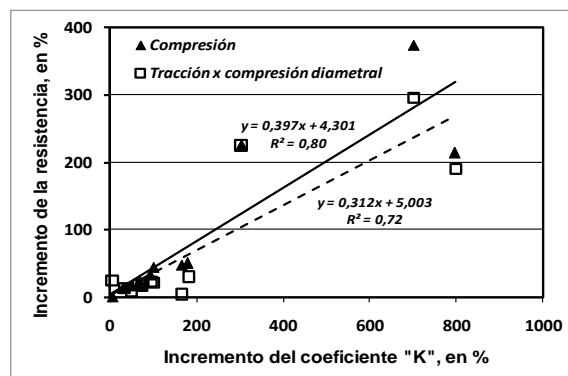


Figura 5: Relación e/los incrementos del coef. “K” y de las resistencias mecánicas.

En la Figura 5, se muestra la relación entre los incrementos de las resistencias a compresión y tracción, y del coeficiente “K”. Esta relación indica que conforme se incrementa la eficacia de la CV, generando mayor cantidad de geles cementantes, la

resistencia del hormigón crece, independientemente del porcentaje de reemplazo. Para este grupo de materiales, si por un determinado tratamiento se logra incrementar un 100% la eficacia de la CV (clase F, de Teruel, España), el incremento en la resistencia a compresión y a tracción del hormigón será del orden de 44 y 36 %, respectivamente.

CONCLUSIONES

En base a los estudios realizados con hormigones híbridos, con contenidos de 260 y 300 kg/m³ de material cementíceo, y con reemplazos de 50 y 70 % de CP por CV, se pueden establecer las siguientes consideraciones:

- La metodología empleada permitió calcular el coeficiente de eficiencia cementante “*K*” de la CV en estado original y con tratamientos físico-químicos, en base a un estudio realizado sobre hormigones con CHIB.
- Al coeficiente “*K*” no se le puede asignar un valor único dado que depende del contenido y tipo de CP por la disponibilidad de hidróxido de calcio para la reacción puzolánica, del tipo y estado de la CV (original, molida o activada), de la presencia de aditivos y de activadores alcalinos, de la relación *a/mc*, de la edad, de la temperatura de curado, etc. En este caso el valor de “*K*” a los 28 días estuvo comprendido entre 0,068 y 0,609, siendo los valores más altos para el caso de la ceniza volante molida y activada alcalinamente.
- Para un 50 % de reemplazo los incrementos del coeficiente “*K*” respecto al de la CV sin tratamiento fueron por la molienda entre 6 y 47 %, por la activación química entre 31 y 164 %, y por los dos procesos en conjunto, entre 93 y 179 %. Estos incrementos para un reemplazo del 70 %, fueron del 99 %, 303-790 % y 700 %, respectivamente.
- Existe una relación lineal entre los incrementos de las resistencias a compresión y a tracción por compresión diametral, y el del coeficiente “*K*”. Conforme se incrementa la eficacia de la CV, generando mayor cantidad de geles cementantes, la resistencia del hormigón crece, independientemente del porcentaje de reemplazo. Para este grupo de materiales, si por un determinado tratamiento se logra incrementar un 100 % la eficacia de la CV, el incremento en la resistencia a compresión y a tracción del hormigón será del orden de 44 y 36 %, respectivamente.

REFERENCIAS

- [1] Davidovits J, “Geopolymer chemistry and sustainable development. The poly(sialate) terminology: a very useful and simple model for the promotion and understanding of green-chemistry”, Proc. of the World Congress Geopolymer, Saint Quentin, France, (2005), 9-15.
- [2] Provis JL, “Alkali-activated materials”, Cement and Concrete Research, Vol. 114, (2018), 40-48.
- [3] Lothenbach B, Scrivener K, Hooton R, “Supplementary cementitious materials”, Cement and Concrete Research, Vol. 41, (2011), 1244-1256.
- [4] Lorca Aranda P, “Efecto de la adición de hidróxido cálcico sobre mezclas con alta sustitución de cemento por ceniza volante”, Tesis doctoral, U. Politécnica de Valencia, España, (2014).
- [5] Cárdenas Pulido J, Lizarazo-Marriaga J, Aperador Chaparro W, “comportamiento mecánico de sistemas cementantes binarios”, Rev. LatinAm. Metal. Mat. Vol. 36, (2016), 78-98.
- [6] García-Lodeiro I, Donatello S, Fernández-Jiménez A, Palomo A, “Hydration of hybrid alkaline cement containing a very large proportion of fly ash: a descriptive model”, Materials 9, (2016), 605.
- [7] Dunstan Jr. ER, “How does pozzolanic reaction make concrete green?”, World of Coal Ash (WOCA) Conference, May 9-12, Denver, CO, USA, (2011).
- [8] Hoyos Montilla AA, “Evolución de la reacción y estructura del sistema portlandita - Ceniza volante de carbón activado alcalinamente”, Tesis doctoral, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia, (2018), 155p.

- [9] Yip C et al., "The coexistence of geopolymetric gel and calcium silicate hydrate at the early stage of alkaline activation", *Cement and Concrete Research*, Vol. 35, (2005), 1688-1697.
- [10] García-Lodeiro I, Palomo A, Fernández-Jiménez A, Macphee D, "Compatibility studies between N-A-S-H and C-A-S-H gels. Study in the ternary diagram $\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$ ", *Cement and Concrete Research*, Vol. 41, (2011), 923-931.
- [11] Blanco Varela MT, "Cementos alcalinos: Introducción", *Curso de Activación Alcalina*, IETCC, (2016), Madrid, España.
- [12] NC-120, "Hormigón hidráulico. Especificaciones", *Oficina Nacional de Normalización*, La Habana, Cuba, (2014), p74.
- [13] Cuetara Ricardo JR, Howland Albear JJ, "Empleo de la metodología de superficies de respuesta para determinar el factor K de las puzolanas naturales y su influencia en la durabilidad de los hormigones", *Hormigón y Acero*; Vol. 70, N° 287, (2019), 67-73.
- [14] Khan AN, Magar RB, Chore HS, "Efficiency factor of supplementary cementitious materials: A state of art", *Int. J. Optim. Civil Eng.*, Vol. 8, N° 2, (2018), 247-253.
- [15] UNE EN 197.1, "Cemento Parte 1: Composición, especificaciones y criterios de conformidad de los cementos comunes", (2011).
- [16] ASTM C618, "Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete", (2003).
- [17] Cabrera OA, Viejo Mariño D, Palomo A, Fernández-Jiménez AM, Maltseva O, "Mechanochemical activation of fly ashes a way to make concretes with high levels of substitution: hybrid concretes", *Proc. 15th International Congress on the Chemistry of Cement*, Prague, Czech Republic, September 16-20, (2019).
- [18] EHE-08, "Instrucción de Hormigón Estructural", *Ministerio de Fomento*, España, (2008), 702p.
- [19] I-Cheng Yeh, "Modeling efficiency factor of fly ash in concrete using an unification approach", *IACSIT International Journal of Engineering and Technology*, Vol. 5, N° 5, (2013), 546-549.
- [20] Alaejos Gutiérrez MP, Fernández Canovas M, "El coeficiente de eficacia del humo de sílice", *Materiales de Construcción*, Vol. 49, (1999), 57-63.
- [21] Payá J et al., "El factor de eficacia cementante de puzolanas silíceas y silicoaluminosas muy reactivas", *Proc. VIII Congreso Nacional de Propiedades Mecánicas de Sólidos*, Gandia, (2002), 591-600.
- [22] Cho H, Jee NY, "Prediction model for cementing efficiency of fly ash concrete by statistical analyses", *Advanced Materials Research*, Vol. 250-253, (2011), 1293-1296.
- [23] UNE-EN 196, "Métodos de ensayo de cementos. Parte 1: determinación de resistencias", (2018).
- [24] UNE 83-451, "Adiciones al hormigón: cenizas volantes: determinación del índice de actividad resistente con cemento portland", (1986).
- [25] Ho DWS, Lewis RK, "Effectiveness of fly ash for strength and durability of concrete", *Cement and Concrete Research*, Vol. 15, (1985), 793-800.
- [26] Fraay ALA, Bijen JM, De Haan YM, "The reaction of fly ash in concrete. A critical examination", *Cement and Concrete Research*, Vol. 19, (1989), 235-46.
- [27] Babu KG, Rao GSN, "Efficiency of fly ash in concrete", *Cement and Concrete Composite*, Vol. 15, (1993), 223-229.
- [28] ACI Committee 211, "Recommended practice for selecting proportions for normal weight concrete", *ACI Manual of Concrete Practice*, Part 1, Farmington Hill, USA, (1998).
- [29] Rendón Belmonte M et al, "Desarrollo de nuevos cementos: cementos alcalinos y cementos híbridos", *Instituto Mexicano del Transporte*, *Publicación Técnica N° 444*, Sanfandila, Qro., (2015).