

PERFORMANCE DE UN NUEVO CEMENTO COMPUESTO ELABORADO CON PUZOLANAS OBTENIDAS POR MEDIO DE ARCILLA CALCINADA Y FILLER

V.L. Bonavetti¹; H. Donza¹, M. Pappalardi², C. Milanesi², D. Violini², E.F. Irassar¹

(1) Facultad de Ingeniería, CIFICEN (UNCPBA-CONICET-CIC), Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires, B7400JWI Olavarría, Argentina, email: lem@fio.unicen.edu.ar, (2) Cementos Avellaneda S.A. Defensa 113, Buenos Aires

RESUMEN

La Facultad de Ingeniería de la UNCPBA y Cementos Avellaneda S. A., han avanzado en forma individual y conjunta, en el estudio de cementos con filler calcáreo y puzolanas resultantes de un proceso de calcinación de arcilla. El desarrollo de un nuevo CPC en la fábrica Olavarría (CPC-OL), disponible en el mercado desde febrero del 2018, requiere conocer sus propiedades básicas y su comportamiento en el hormigón. En este trabajo se estudió la performance de hormigones elaborados con este nuevo cemento, tomando como referencia un cemento CPC de la fábrica San Luis (CPC-SL) de reconocida trayectoria en el mercado, elaborado con filler calcáreo y puzolana natural proveniente de Mendoza. Con ambos cementos se confeccionaron tres hormigones con relación a/c de 0.40 a 0.60, se estudiaron las propiedades en estado fresco (asentamiento, extendido, exudación y tiempo de fraguado) y las propiedades mecánicas básicas (resistencia a compresión, a flexión y tracción, módulo de elasticidad). Los resultados muestran que el nuevo CPC-OL permite alcanzar una trabajabilidad adecuada con el mismo contenido de agua y dosis de aditivo, presenta menor capacidad de exudación. La resistencia mecánica de los hormigones elaborados con CPC-OL fue superior a los 2 días y ligeramente superior a los 28 días.

Palabras claves: Puzolana, arcilla calcinada, filler, hormigón, estado fresco, propiedades mecánicas.

INTRODUCCIÓN

Para el desarrollo de viviendas e infraestructuras se requiere de materiales cementantes que reduzcan las emisiones de CO₂, con una eficiencia similar al cemento portland tradicional y una de las posibles soluciones a esta problemática es el empleo de una mayor cantidad de adiciones al cemento.

La necesidad de nuevos materiales cementantes suplementarios activos, surge de la relativa escasez de la escoria y de la ceniza volante, o de lejana localización de puzolanas naturales, que ocasionan un importante consumo de energía, impacto ambiental o costo debido al transporte de grandes volúmenes de materiales.

Por esta razón, el desarrollo de nuevos materiales suplementarios ha sido una prioridad en los últimos años [1], como así también son necesarias las investigaciones que permitan una mejor comprensión de los efectos químicos y físicos en la hidratación, y de la evolución de las propiedades ingenieriles de estos materiales [2-4]. La producción de puzolanas artificiales, tales como las arcillas calcinadas [5-7] se ha convertido en una opción muy importante y en la actualidad se avanza a nivel mundial en los cementos denominados LC3, que consisten fundamentalmente en el empleo de filler calcáreo y puzolanas obtenidas por medio de la calcinación de arcillas. En el centro de la Provincia de Buenos Aires, no se cuenta con puzolanas naturales y la disponibilidad del resto de las adiciones activas es limitada, por esta razón el uso de arcillas illíticas calcinadas surgió como una de las soluciones sustentables para este centro productivo. El uso de este material cementíceo suplementario tiene como propósito adicional un aprovechamiento más sustentable de las canteras donde se extraen los recursos naturales.

El desarrollo de un nuevo cemento, el CPC-OL que es el fruto de un trabajo común entre la Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires y Cementos Avellaneda S.A., incluyó los estudios de las arcillas locales disponibles, su activación térmica, molienda y determinación del potencial puzolánico en el laboratorio [8-10] culminando en la producción industrial de una puzolana artificial proveniente de la calcinación de arcillas illíticas. Esta puzolana, permitió el desarrollo comercial de un nuevo cemento CPC en la planta Olavarría de Cemento Avellanada SA. Actualmente, el CPC se encuentra en una etapa de optimización del proceso de producción y sólo se comercializa en bolsa. Es de destacar que este cemento es el primer CPC elaborado con una puzolana artificial en nuestro país, constituyendo un hito histórico en el desarrollo de materiales de base cementante en la Argentina.

En este trabajo se estudian las características en estado fresco y las propiedades mecánicas de hormigones elaborados con un nuevo cemento CPC (filler-puzolana artificial). Los resultados obtenidos son comparados con hormigones elaborados con un cemento CPC del mercado compuesto en base a filler calcáreo y puzolana natural proveniente de Mendoza, con el objetivo de brindar información sistemática para su uso en hormigones estructurales.

MATERIALES Y PROCEDIMIENTOS

Materiales: Para la realización de las experiencias se utilizaron: un cemento compuesto comercial con adición de filler calcáreo y puzolana natural (CPC-SL) que fue empleado como control y un nuevo cemento CPC con adición de filler calcáreo y puzolana artificial (CPC-OL), ambos de clase resistente CP40 (IRAM 50000). Estos cementos están diseñando para un uso general y son despachados en bolsa. El CPC-SL y el CPC-OL provienen de las fábricas de Cemento Avellanada SA ubicadas en San Luis y Olavarría, respectivamente. Dichos CPC se diferencian por la composición del clinker, el tipo y los porcentajes de adiciones y la tecnología de molienda utilizada. Las características de ambos cementos se informan en la Tabla 1.

Como agregado fino se empleó una mezcla 60:40 de arena natural silíceo fina (MF: 1.25) y gruesa (MF: 2.27). El agregado grueso utilizado fue piedra partida granítica 6-12 (MF: 5.85) y 6-20 (MF: 6.98), en proporción 20 y 80%, respectivamente.

Para este estudio se empleó un aditivo multifuncional de medio rango de reducción de agua (MIRA 353, *GCP Applied Technology*) de uso habitual para hormigones con cemento CPF de la compañía, pero que no ha sido optimizado para los cementos CPC.

Tabla 1: Composición y características de los cementos CPC.

Propiedades	CPC-OL	CPC-SL	
Contenido de filler calcáreo, %	20,0	12,4	
Contenido de puzolana, %	7,5	12,6	
Retenido en tamiz 75 μm , %	1,0	2,4	
Superficie específica Blaine, m^2/kg	393	455	
SO_3 , %	2,3	1,8	
Pérdida por calcinación, %	8,5	6,6	
Parámetros granulométricos	d_{90} , μm	46,50	65,56
	d_{50} , μm	15,52	20,48
	d_{10} , μm	1,80	1,89
Resistencia a compresión (IRAM 1622), MPa	2 días	24.7	19.0
	28 días	49.3	45.4

Tabla 2: Proporciones estudiadas de los hormigones.

Hormigón	Proporciones, kg/m^3							
	Agua	Cemento	Aditivo		Arena gruesa	Arena fina	Piedra 6-12	Piedra 6-20
			CPC-OL	CPC-SL				
0,40	165	410	2.46	3.28	293	439	215	860
0,50	165	330	1.65	2.64	325	485	215	860
0,60	162	270	2.16*	2.16*	346	520	215	860

* Dosis máxima recomendada por el fabricante

El aditivo tiene una densidad de $1.16 \text{ g}/\text{cm}^3$ y la dosis recomendada por el fabricante está comprendida entre 0.40 y 0.80% del contenido unitario de cemento.

Proporciones de las mezclas: Se estudiaron tres series de hormigones con relación agua/cemento (a/c) de 0.40, 0.50 y 0.60. Como criterio de diseño de la mezcla se mantuvo constante el contenido total de agregado grueso y se modificó el contenido de arena de acuerdo a la cantidad de cemento y agua utilizada. Las proporciones de las mezclas utilizadas se informan en la Tabla 2.

Ensayos en estado fresco: Se evaluaron el asentamiento (IRAM 1536), la fluidez a través de la mesa de Graff (IRAM 1690), la exudación (IRAM 1604) y el tiempo de fraguado (IRAM 1662). Además, se determinó la pérdida de asentamiento y del escurrimiento a los 15 y 45 minutos.

Propiedades mecánicas: Los ensayos realizados a 2, 7, 28 y 90 días, se detallan en la Tabla 3. Todas las probetas fueron curadas 24 horas en moldes y luego sumergidas en agua saturada con cal a $20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ hasta la edad de ensayo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Estado fresco: La Tabla 4 muestra los resultados obtenidos en estado fresco. Todos los hormigones presentaron un asentamiento inicial dentro del rango plástico ($100 \pm 20 \text{ mm}$) con una muy buena cohesión sin segregación.

La tasa de pérdida de asentamiento para las tres relaciones a/c presenta un comportamiento similar para el CPC-OL y CPC-SL (Figura 1) causando una pérdida entre 20 y 60 mm a los 15 minutos y entre 50 a 90 mm a los 45 minutos.

Tabla 3: Ensayos realizados.

Ensayo	Resistencia a compresión	Módulo de rotura	Resistencia a tracción por compresión diametral	Módulo de elasticidad
Norma	IRAM 1546	IRAM 1547	IRAM 1658	IRAM 1865
Tipo de probeta	Cilíndricas (10 x 20cm)	Prismáticas (7.5 x 10 x 45 cm)	Cilíndricas (10 x 20 cm)	Cilíndrica (10 x 20 cm)
Número de ensayos por edad	3	2	3	2

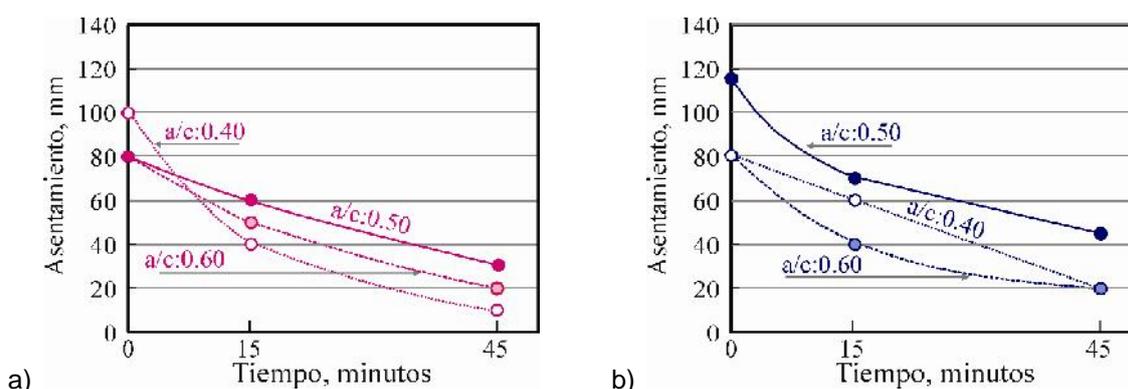


Figura 1: Pérdida de asentamiento en el tiempo. a) CPC-OL y b) CPC-SL.

Tabla 4: Resultados en estado fresco.

Muestra		CPC-OL (0,40)	CPC-SL (0,40)	CPC-OL (0,50)	CPC-SL (0,50)	CPC-OL (0,60)	CPC-SL (0,60)
Temperatura, °C		19.1	20.7	20.3	20.0	20.7	20.2
Asentamiento, mm	0 min	100	80	80	115	80	80
	15 min	40	60	60	70	50	40
	45 min	10	20	30	45	20	20
Ecurrimiento, cm	0 min	32	35	36	35	37	34
	15 min	30	33	33	32	34	28
	45 min	25	29	31	29	29	27
Exudación	Tipo	---	---	Uniforme	Uniforme	Uniforme	Uniforme
	Capacidad, %	---	---	3.5	7,2	15,0	17.8
	Velocidad, cm/s*10 ⁻⁶	---	---	10	10	22	20
Tiempo de fraguado	Inicial, h:min	7:10	12:20	9:10	15:15	11:45	17:55
	Final, h:min	11:30	18:10	11:30	23:10	15:15	22:35

Los resultados de la mesa de Graff (Tabla 3) muestran que el escurrimiento inicial de todos los hormigones se encuentra entre 32 y 37 cm, y no se observaron problemas de segregación o corona de agua. La Figura 2 muestra la variación de la fluidez (escurrimiento) en el tiempo de los hormigones elaborados con relación $a/c = 0.50$. La pérdida de escurrimiento fue independiente del cemento con una reducción de ~10% y ~20% del diámetro inicial a los 15 y 45 minutos, respectivamente.

Las pérdidas de asentamiento y escurrimiento en los hormigones con ambos CPC son atribuidas a la pobre compatibilidad del aditivo empleado con los cementos utilizados, siendo necesarios estudios complementarios para dar respuesta esta necesidad tecnológica.



Figura 2: Variación del escurrimiento en el tiempo. a) Hormigón CPC-OL (0.50) y b) Hormigón CPC-SL (0.50).

En la Tabla 3 se informan los resultados del tiempo de fraguado inicial y final. Los hormigones elaborados con CPC-SL registraron un tiempo inicial de fraguado más prolongado que los obtenidos para los hormigones con CPC-OL.

Para las relaciones a/c de 0.40, 0.50 y 0.60, estos incrementos fueron: 72, 66 y 52 %, respectivamente. Este comportamiento puede ser atribuido a la menor reactividad del cemento y a la falta de compatibilidad del cemento CPC-SL con el aditivo plastificante utilizado.

La capacidad de exudación del hormigón CPC-SL (0.50) fue el doble de la alcanzada por el hormigón CPC-OL (0.50), mientras que ambos hormigones registraron una exudación uniforme con igual velocidad (Tabla 3). Debido a que la exudación prosigue hasta que se inicia el fraguado, la mayor capacidad de exudación en el hormigón CPC-SL (0.50) puede atribuirse al retraso de ~6 horas en el inicio de fraguado. Los hormigones elaborados con relación a/c de 0.60, registraron una similar capacidad de exudación, con valores sensiblemente mayores a los alcanzados para la relación a/c de 0.50 (Tabla 3).

Propiedades mecánicas: La Figura 3 muestra la evolución de la resistencia a compresión de los hormigones con diferentes relaciones a/c. En todos los casos los hormigones elaborados con el CPC-OL, registraron una resistencia superior que la correspondiente a los hormigones con CPC-SL. La mayor diferencia se observó en los resultados de 2 días donde el hormigón con CPC-OL alcanzó una resistencia 14, 39 y 79 % mayor que la alcanzada por el hormigón CPC-SL para las relaciones a/c de 0.40, 0.50 y 0.60, respectivamente. Esta diferencia es atribuida a la distinta composición del clinker que tienen ambos cementos, la cual determina la mayor resistencia a compresión a temprana edad en el CPC-OL (ver Tabla 1). A partir de los 28 días, las diferencias entre la resistencia a compresión de los hormigones elaborados con ambos CPC se reducen sensiblemente a 5, 9 y 21 %, para las relaciones a/c de 0.40, 0.50 y 0.60, respectivamente. La resistencia a compresión de los hormigones con ambos CPC supera los 45, 35 y 20 MPa a los 28 días para una relación a/c de 0.40, 0.50 y 0.60, respectivamente.

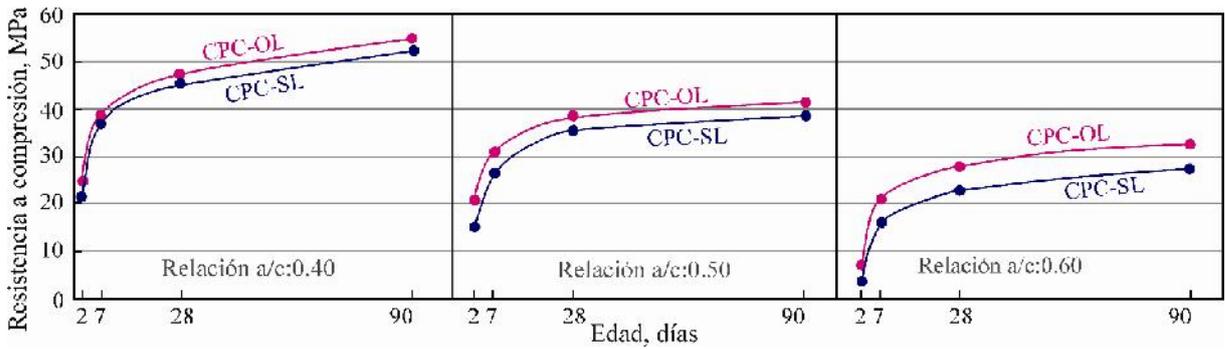


Figura 3: Resistencia a compresión de los hormigones con distintas relaciones a/c.

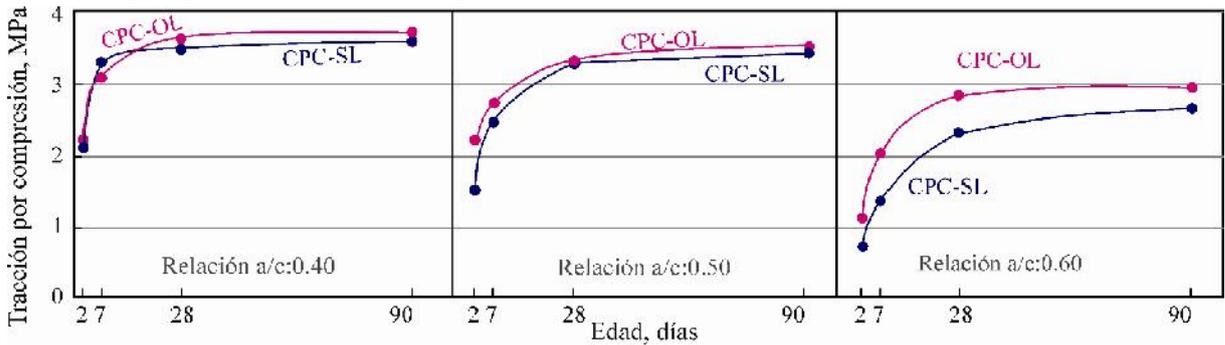


Figura 4: Resistencia a tracción por compresión diametral de los hormigones con distintas relaciones a/c.

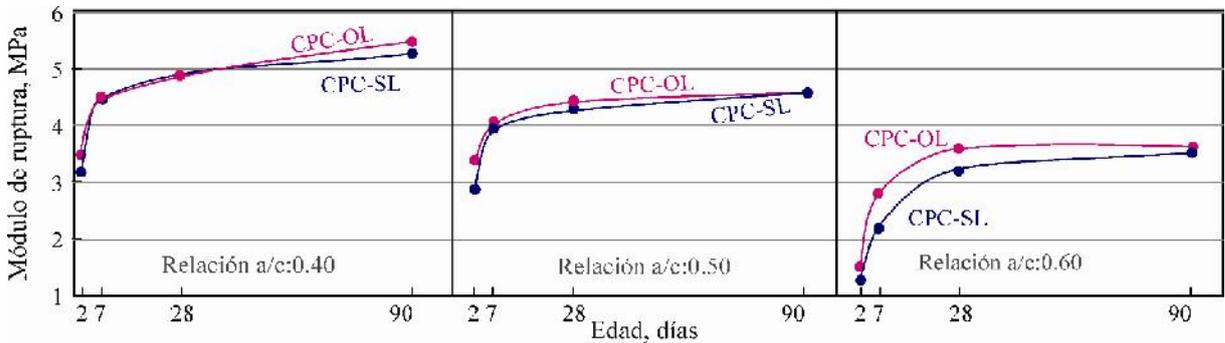


Figura 5: Módulo de ruptura de los hormigones con distintas relaciones a/c.

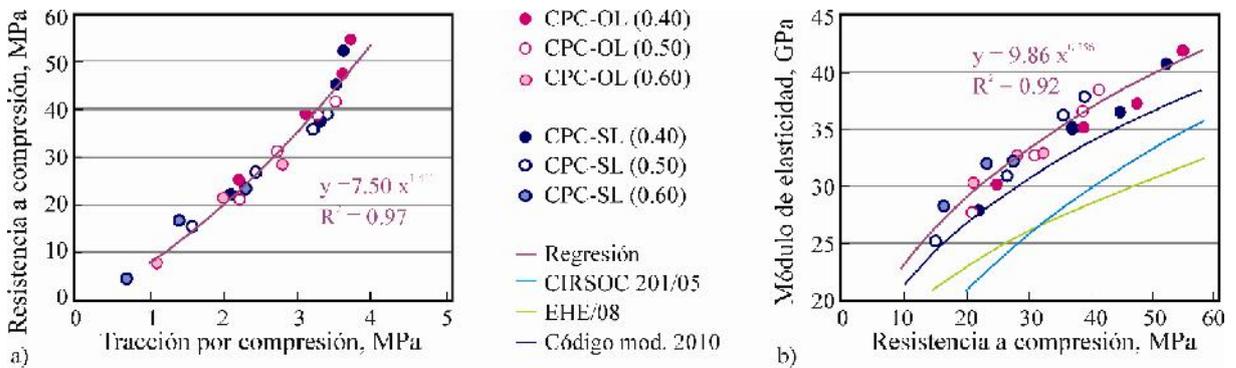
Para los hormigones con relación a/c 0.40 y 0.50, el rendimiento del CPC-OL y CPC-SL es 0.115 y 0.108 MPa/kg de cemento, respectivamente. Para los hormigones con alta relación a/c el rendimiento es ligeramente menor (0.104 y 0.086 MPa/kg de cemento).

La Figura 4 muestra la resistencia a tracción por compresión diametral de los hormigones estudiados. Para los hormigones con relación a/c de 0.40 y 0.50, la resistencia a tracción es similar para ambos cementos empleados, con excepción de la resistencia a 2 días debido a la reactividad del clinker comentada. Sin embargo, para la relación a/c de 0.60, el hormigón con CPC-OL alcanza una resistencia mayor que la del hormigón elaborado con CPC-SL, (77, 27, 21 y 17 % a 2, 7, 28 y 90 días, respectivamente).

El módulo de ruptura (Figura 5) muestra un comportamiento similar a la resistencia a tracción por compresión diametral. A los 28 días, el valor promedio de todas las determinaciones independiente del cemento usado fue 4.88 ± 0.25 , 4.42 ± 0.27 y 3.48 ± 0.20 MPa para las relaciones a/c de 0.40, 0.50 y 0.60, respectivamente.

Tabla 4: Módulo de elasticidad de los hormigones en GPa.

Edad, días	CPC-OL			CPC-SL		
	0,40	0,50	0,60	0,40	0,50	0,60
2	30,2	27,8	---	27,9	25,2	---
7	35,2	32,7	30,3	35,1	30,9	28,3
28	37,3	36,6	32,7	36,5	36,3	32,0
90	42,0	38,5	32,8	40,8	37,9	32,3

**Figura 6:** a) Tracción por compresión diametral vs Resistencia a compresión y b) Resistencia a compresión vs Módulo de elasticidad.

El módulo de elasticidad determinado para los hormigones hasta 90 días se informa en la Tabla 4. Debido a que el contenido de agregado grueso se mantuvo constante en cada serie de hormigón, la variación del módulo puede ser asignada al cemento empleado. A 2 días los hormigones elaborados con CPC-OL registran un módulo de elasticidad entre 8 y 10 % mayor que el alcanzado por el hormigón con CPC-SL, para las relaciones a/c de 0.40 y 0.50, respectivamente. A edades avanzadas (28 y 90 días), el módulo de elasticidad para cada relación a/c elaborada con distinto CPC registran valores similares con una variación (1 a 3 %) que supera el error del propio ensayo.

La relación entre la resistencia a compresión y la resistencia a tracción por compresión se muestra en la Figura 6a. En la misma puede observarse que el comportamiento de los hormigones es independiente del cemento compuesto y la relación a/c empleada, y todos los valores se agrupan alrededor de una única curva de tendencia.

En la Figura 6b se representa la relación entre la resistencia a compresión y el módulo de elasticidad. También se han superpuesto las curvas de predicción establecidas por el Reglamento CIRSOC 201/05, el Código Modelo 2010 y el EHE/08 (Instructivo de hormigón estructural). En la misma puede observarse que tanto el Reglamento CIRSOC 201 como el Instructivo EHE/08, resultan conservadores para estimar el módulo de elasticidad de estos hormigones, en tanto que la mejor aproximación la establece el Código modelo 2010.

CONCLUSIONES

El desarrollo en el campo de los materiales cementíceos ha permitido aprovechar los recursos naturales disponibles por medio de un trabajo común entre el campo científico-tecnológico y la industria, produciéndose en primera instancia una puzolana artificial (arcilla illítica calcinada), y a partir de la misma el desarrollo y salida al mercado de un nuevo cemento CPC. Los resultados presentados en este trabajo sobre hormigones elaborados nuevo cemento CPC permiten establecer las siguientes consideraciones:

Para las tres relaciones a/c estudiadas, el nuevo CPC presenta un comportamiento en estado fresco y mecánico similar o levemente superior al cemento CPC elaborado con filler calcáreo y puzolana natural que se comercializa en la zona de San Luis.

Las propiedades de los hormigones en estado fresco se diferenciaron fundamentalmente por: la distinta naturaleza de los clinkers, la granulometría de los CPC y el efecto del aditivo, razón por la cual se deben profundizar los estudios de compatibilidad entre los CPC y los aditivos plastificantes.

A los 2 días, la resistencia del CPC-OL es mayor que la correspondiente al CPC-SL. Esta propiedad de CPC-OL determina una mayor la resistencia a compresión, a tracción y a flexión de los hormigones con distintas relaciones a/c. A los 28 y 90 días, el comportamiento mecánico es equivalente para los hormigones elaborados con ambos CPC, resultando ligeramente superior para los hormigones elaborados con el CPC-OL. El rendimiento de ambos cementos es similar.

Los estudios relacionados con la contracción por secado y de durabilidad de estos hormigones están en marcha para comprobar que los hormigones elaborados con el nuevo CPC confieran una mayor vida útil a las estructuras contribuyendo al desarrollo sustentable de los materiales de base cementícea.

REFERENCIAS

- [1] Østnor T, 2008. "Alternative pozzolans" as supplementary cementitious materials in concrete: State of the art; Report SBF BK A07032, SINTEF Building and Infrastructure, Concrete Innovation Centre, Norway, 25p
- [2] Lothenbach B, Scrivener K, Hooton RD, 2011. Supplementary Cementitious Materials. *Cement and Concrete Research* 41 (3): 217–229.
- [3] Damtoft JS, Lukasik J, Herfort D, Sorrentino D, Gartner EM, 2008. Sustainable development and climate change initiatives. *Cement and Concrete Research*, 38, 15-127
- [4] Gartner E, 2004. Industrially interesting approaches to "low CO₂" cements. *Cement and Concrete Research* 34, 1489-1498
- [5] He C, Osbaeck B, Makovicky E, 1995. Pozzolanic Reactions of Six Principal Clay Minerals: Activation, Reactivity Assessments and Technological Effects. *Cement and Concrete Research* 25 (8): 1691–1702.
- [6] Fernandez R, Martirena F, Scrivener K, 2011. The Origin of the Pozzolanic Activity of Calcined Clay Minerals: A Comparison between Kaolinite, Illite and Montmorillonite. *Cement and Concrete Research* 41 (1): 113–122.
- [7] Tironi A, Trezza MA, Scian AN, Irassar EF, 2012. Kaolinitic calcined clays: Factors affecting its performance as pozzolans. *Construction and Building Materials* 28, 276–281.
- [8] Lemma, R., Irassar, E. F., Rahhal, V.F. (2015). Calcined Illitic Clays as Portland Cement Replacements. *Calcined Clays for Sustainable Concrete*, 10, 269–276.
- [9] Lemma, R., Castellano, C. C., Bonavetti, V. L. V. L., Trezza, M. A. M. A., Rahhal, V. F. F., & Irassar, E. F. (2017). Thermal Transformation of Illitic-Chlorite Clay and its Pozzolanic Activity. In *Rilem Bookseries* (Vol. 16, Pp. 266–272).
- [10] Irassar, E. F., Bonavetti, V. L., Castellano, C. C., Trezza, M. A., Rahhal, V. F., Cordoba, G., Lemma, R. (2018). Situability of Calcined Illitic Shale for Industrial SCM Production: Thermal Treatment, Grinding, Color and Pozzolanic Activity. En preparation.