

Hormigones de cementos compuestos con arcilla calcinada y material calcáreo

V. L. Bonavetti^{a*}, C. Castellano^a, H. Donza^a, V. F. Rahhal^a, G. Córdoba^a y E. F. Irassar^a

^a*Facultad de Ingeniería - Centro de Investigaciones en Física e Ingeniería del Centro de la Provincia de Buenos Aires (CIFICEN, UNCPBA-CONICET-CIC) - Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires, CP B7400JWI, Olavarría, Argentina. vbonavet@fio.unicen.edu.ar, ccastellano@fio.unicen.edu.ar, hdonza@fio.unicen.edu.ar, vrahhah@fio.unicen.edu.ar, gcordoba@fio.unicen.edu.ar, firassar@fio.unicen.edu.ar

Recibido: 17 de mayo de 2021

Aceptado: 17 de junio de 2021

RESUMEN

Las arcillas illíticas, un recurso natural abundante en el centro de la provincia de Buenos Aires, luego de un adecuado tratamiento térmico desarrollan propiedades puzolánicas y al combinarse con el material calcáreo pueden producir un cemento con propiedades mecánicas y durables adecuadas contribuyendo al desarrollo sostenible. El presente trabajo estudia los efectos de la incorporación al cemento pórtland de material calcáreo (hasta 25%) y arcilla illítica calcinada (hasta 35%) sobre el estado fresco, la resistencia mecánica, la absorción capilar y la penetración de agua a presión en hormigones. Los resultados obtenidos indican que todos los hormigones presentan un asentamiento inicial dentro del rango muy plástico a fluido y que la pérdida de asentamiento es mayor en los hormigones con alto contenido de material cementante suplementario (MCS). Hasta los 28 días las propiedades mecánicas registradas son independientes del tipo de MCS y solo dependen del contenido total de MCS presente en el cemento ternario. Por otro lado, a esta edad sólo los hormigones elaborados con 10% de arcilla calcinada más 10% de material calcáreo, y con 25% de arcilla calcinada más 10% de material calcáreo alcanzan una velocidad de absorción capilar menor a la establecida por el Reglamento CIRSOC 201:2005.

PALABRAS CLAVE: Arcilla illítica calcinada, material calcáreo, resistencia mecánica, absorción capilar, penetración de agua a presión

ABSTRACT

Illitic clays, an abundant natural resource in the center of the Buenos Aires province, after adequate thermal treatment, develop pozzolanic properties and combined with calcareous material can produce cement with good mechanical and durable properties contributing to sustainable development. The present paper studies the effects of incorporating to the portland cement calcareous material (up to 25%) and calcined illitic clay (up to 35%) on the fresh state, mechanical strength, capillary sorption, and the water penetration under pressure of concrete. Results indicate that all concretes present an initial slump in the very plastic to fluid range, and the slump loss is more significant for concretes with a high content of supplementary cementitious material (SCM). Up to 28 days, the mechanical properties are independent of the SCM type, depending on the SCM content in the ternary cement. On the other hand, concretes made with 10% calcined clay plus 10% calcareous material and 25% calcined clay plus 10% calcareous material reaches a capillary sorption rate lower than that established by the CIRSOC Regulation 201:2005.

KEYWORDS: Illitic calcined clay, calcareous material, mechanical strength, capillary sorption, water penetration under pressure

Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos de la licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC-BY-NC-SA 4.0).

Citar como: Bonavetti, V. L., Castellano, C., Donza, H., Rahhal, V. F., Córdoba, G., y Irassar, E. F. (2021). Hormigones de cementos compuestos con arcilla calcinada y material calcáreo. *Revista Hormigón*, 60, 57–67.

1. Introducción

Durante la producción de cemento pórtland se emite una considerable cantidad de CO₂ a la atmósfera debido a la descarbonatación de la piedra caliza en el horno y al empleo de combustibles fósiles. El cemento es un material que tiene alta energía incorporada, y se lo ha clasificado como un material poco amigable con el medio ambiente.

Desde hace varias décadas, la industria del cemento realiza cambios en el proceso que han permitido incrementar la eficiencia energética y reducir las emisiones, pero actualmente todos ellos resultan insuficientes para reducir la emisión global, debido al aumento en la demanda de cemento que se produce por el rápido crecimiento de la tasa de urbanización de la población en los países en vías de desarrollo [1].

Para disminuir el impacto ecológico que tiene la producción de cemento es necesario reducir el factor clínker, para ello se puede emplear una adecuada combinación de material cementante suplementario (MCS). Entre los MCSs, los más utilizados en el mundo son la ceniza volante, la escoria granulada de alto horno, las puzolanas naturales y artificiales, y el material calcáreo.

La ceniza volante, subproducto industrial de las centrales termoeléctricas de carbón, es un MCS ampliamente estudiado que mejora la resistencia tardía y la durabilidad [2]. Sin embargo, el empleo de carbón en la generación de energía según el Acuerdo de París [3] debe reducirse. En América Latina, la participación de las termoeléctricas de carbón en la matriz energética es muy baja (< 4%), por lo que su disponibilidad es muy limitada. La escoria granulada de alto horno es otro MCS muy utilizado que produce hormigones con adecuadas propiedades resistentes y durables. Pero debido a que la producción mundial de acero en base de chatarra reciclada va aumentando, alcanzando en la actualidad a ser del orden del 40%, su disponibilidad también tiende a disminuir [4]. Las puzolanas naturales [5-7] son los MCSs más antiguos y otorgan excelentes propiedades durables a los

hormigones, pero su uso está limitado por su disponibilidad regional, pues el transporte de grandes volúmenes de estos materiales produce un aumento en el costo de producción y en las emisiones del cemento.

Las puzolanas artificiales aparecen como una solución potencial a todos estos inconvenientes [8-11]. En nuestra región geológica (sistema de Tandilia), dependiendo de la profundidad y la ubicación del depósito, las arcillas están compuestas por diferentes minerales (illita, esmectita, clorita y en menor proporción caolinita) asociados con cuarzo, óxido de hierro, feldespatos, carbonatos y anatasa.

La arcilla para ser empleada como puzolana artificial, requiere de la activación térmica (550 °C a 950 °C) a temperaturas inferiores a la de clinkerización (1450 °C), lo que implica un menor consumo de energía y una disminución en la emisión de CO₂ equivalente producido por la combustión [12,13]. La calcinación se realiza para lograr la deshidroxilación del mineral arcilloso y producir una fase amorfa reactiva. La potencialidad de las arcillas calcinadas como puzolanas, ha sido estudiada por diferentes investigadores [14-17].

En la región pampeana, el uso de arcillas illíticas calcinadas como MCS surge como una de las soluciones sustentables para el sector productivo del centro de la provincia de Buenos Aires, con una mejora del aprovechamiento de los recursos naturales. El material calcáreo también se utiliza como MCS, con los siguientes beneficios: completa la curva de distribución del tamaño de partículas, llenando los espacios entre las partículas y mejorando la densidad de empaquetamiento del cemento [18,19]; aumenta la velocidad de hidratación de los componentes del cemento pórtland [20,21], produce la formación de monocarboaluminato de calcio hidratado estabilizando a la ettringita [22,23]; e incrementa la resistencia a edades tempranas de morteros y hormigones [24]. A edades avanzadas, como el material calcáreo no genera durante su hidratación silicato de calcio hidratado (SCH), el efecto de dilución es preponderante [25,26], y no se produce

una ganancia de resistencia, no se reduce la porosidad capilar y la durabilidad puede verse afectada [27].

Los cementos ternarios combinan dos MCSs con efectos complementarios o sinérgicos. Algunos ejemplos de sistemas ternarios estudiados para la producción de cemento de uso general son: escoria-material calcáreo [28,29], puzolana natural-escoria [30], ceniza volante-material calcáreo [31] y recientemente, el cemento LC³ a base de arcilla illítica calcinada y material calcáreo [32].

Este trabajo analiza la acción conjunta de la incorporación al cemento pórtland de material calcáreo (hasta 25%) y arcilla illítica calcinada (hasta 35%) sobre el estado fresco, la resistencia mecánica, la absorción capilar y la penetración de agua a presión en hormigones.

2. Parte experimental

2.1 Cemento y adiciones

Para la realización de los ensayos se utilizó un cemento pórtland normal (CP, IRAM 50000 [33]), categoría resistente CP40 y como MCSs se emplearon arcilla illítica calcinada y material calcáreo.

La composición mineralógica aproximada de la arcilla, obtenida por difracción de rayos X utilizando Rietveld fue: 48% de illita, 47% de

cuarzo y 5% de hematita. Este material se trituró a un tamaño inferior a 4,75 mm y se calcinó en un horno eléctrico de laboratorio hasta 950 °C (AC), posteriormente se molió en un molino de bolas hasta obtener un retenido sobre tamiz IRAM 45 µm menor al 12%. El material calcáreo (MC), estaba constituido por CaCO₃ bajo la forma de calcita y su principal impureza fue cuarzo. La Tabla 1 muestra las propiedades físicas de los materiales utilizados.

Los cementos ternarios se obtuvieron por reemplazos variables en peso de cemento CP por arcilla illítica calcinada (10 a 25%) y material calcáreo (10 a 25%), así se definieron 5 cementos mezclas: (10AC, 10MC), (17,5AC, 17,5MC), (25AC, 10MC), (10AC, 25MC) y (25AC, 25MC).

2.2 Agregados

Como agregado fino se utilizó una arena silícea, con módulo de finura de 2,02 y densidad 2,636, mientras que como agregado grueso se empleó una piedra partida granítica, con tamaño máximo de 19 mm, módulo de finura 6,97 y densidad 2,717.

2.3 Aditivo

Con el objetivo de obtener un hormigón con un asentamiento muy plástico, se empleó un aditivo polifuncional de alto rango de reducción de agua (Protex 2011) con una densidad de 1,1 g/cm³.

Tabla 1. Propiedades físicas del cemento y los MCSs.

Propiedad		Cemento (CP)	Arcilla illítica calcinada (AC)	Material calcáreo (MC)
Densidad		3,13	2,63	2,70
Material retenido sobre tamiz IRAM (%)	75 µm	7,7	3,9	16,5
	45 µm	16,4	9,3	28,3
	d10	2,0	1,2	1,5
Parámetros granulométricos (µm) (*)	d50	20,7	9,6	10,8
	d90	85,8	43,2	171,0

(*) Tamaños de partículas por debajo del cual queda el 10%, 50% y 90% del volumen de la muestra.

2.4 Proporciones de los hormigones y curado

Los hormigones se elaboraron con 350 kg/m³ de material cementante (mc), una relación a/mc de 0,45 y una relación agregado fino/agregado total de 43%; las proporciones de las mezclas estudiadas se informan en la Tabla 2.

Las probetas fueron moldeadas y compactadas, mantenidas 24 horas en los moldes, y luego de desmoldadas fueron sumergidas en agua saturada con cal a 20 ± 1 °C hasta las edades de ensayo (2, 7, 28 y 90 días).

2.5 Ensayos en estado fresco

Se evaluaron el asentamiento (IRAM 1536 [34]), la fluidez a través de la mesa de Graff (IRAM 1690 [35]), y el tiempo de fraguado (IRAM 1662 [36]). Además, se determinaron la pérdida de asentamiento y del escurrimiento (fluidez) a los 15 y 45 minutos.

2.6 Ensayos en estado endurecido

La resistencia a compresión se evaluó en probetas cilíndricas de 100 x 200 mm encabezadas con mortero de cemento de acuerdo a la norma IRAM 1546 [37], mientras que la resistencia a flexión se determinó de acuerdo a la norma IRAM 1547 [38] sobre probetas prismáticas de 75 x 100 x 450 mm.

La succión capilar y la penetración de agua a presión se determinaron a 28 días de acuerdo a las normas IRAM 1871 [39] y 1554 [40], respectivamente.

3. Resultados y discusión

3.1 Estado fresco

La Tabla 3 y la Fig. 1 muestran los resultados obtenidos sobre el asentamiento y la mesa de Graff, mientras que en la Fig. 2 se puede observar la variación del escurrimiento de los hormigones con menor y mayor contenido de MCS.

Los hormigones resultaron trabajables, con muy buena cohesión, sin exudación apreciable y excelente terminación. El asentamiento inicial de todos ellos estuvo comprendido entre 15 ± 3,5 cm, con importantes pérdidas de asentamiento en el tiempo. La menor pérdida de asentamiento a los 15 (18%) y los 45 (43%) minutos fue registrada por el hormigón (10AC, 10MC), mientras que para el resto de los hormigones éstas alcanzan a ser de 68 ± 9%.

Los resultados de la mesa de Graff (Fig. 1) muestran que todos los hormigones registran un escurrimiento inicial de 45,5 ± 6,5 cm y no se observaron problemas de segregación o corona de agua (Fig. 2). Además, la pérdida

Tabla 2. Proporciones de los hormigones.

Hormigón	Proporciones del hormigón (kg/m ³)						
	Agua	Cemento	Arcilla illítica calcinada	Material calcáreo	Aditivo 2011 (*)	Arena silícea	Piedra partida 6-20
(10AC, 10MC)	158	280	35	35		810	
(17,5AC, 17,5MC)	158	228	61	61		802	
(25AC, 10MC)	158	228	88	35	3,5	801	1075
(10AC ,25MC)	158	228	35	88		803	
(25AC, 25MC)	158	175	88	88		794	

(*) Porcentaje en peso de material cementante.

Tabla 3. Resultados en estado fresco y tiempo de fraguado de los hormigones.

Hormigón	Temp. (°C)	Asentamiento inicial (cm)	Esgurrimiento inicial (cm)	Tiempo de fraguado (h:min)	
				Inicial	Final
(10AC, 10MC)	23,1	14,0	46,9	07:38	10:33
(17,5AC, 17,5MC)	22,3	16,0	39,5	07:50:	10:13
(25AC, 10MC)	24,1	11,0	38,0	07:07	09:55
(10AC, 25MC)	25,2	12,0	34,0	06:27	09:13
(25AC, 25MC)	23,2	18,5	44,0	09:13	12:41

de escurrimiento en el tiempo resultó considerablemente menor que las registradas por el asentamiento, tendiendo a ser más independiente del contenido de adiciones presentes en el hormigón.

En la Tabla 3 se informan los resultados del tiempo de fraguado inicial y final. Los menores valores de estos parámetros fueron registrados por el hormigón (10AC, 25MC), mientras que los mayores fueron alcanzados por el hormigón (25AC, 25MC). La duración del fraguado resultó similar en todos los hormigones, pues estuvo comprendida entre las 2:20 y 2:55 h:min, excepto por el hormigón (25AC, 25MC) que presentó un leve incremento de 3:30 h:min en su duración.

3.2 Propiedades mecánicas

Las Fig. 3 y 4 muestran los resultados obtenidos de la resistencia a compresión y del módulo de rotura de los hormigones, mientras que la Fig. 5 informa la relación entre ambos parámetros.

A 2 y 7 días (Fig. 3), la mayor resistencia a compresión es para el hormigón (10AC, 10MC), 14,6 y 27,0 MPa, respectivamente. Un incremento de 30% en el contenido de MCS produce una disminución de la resistencia del 47 y 38% (25AC, 25MC), respectivamente. Por su parte, los hormigones con 35% de MCS alcanzan una resistencia similar entre sí, $11,4 \pm 1,0$ y $22,0 \pm 0,7$ MPa a 2 y 7 días, respectivamente.

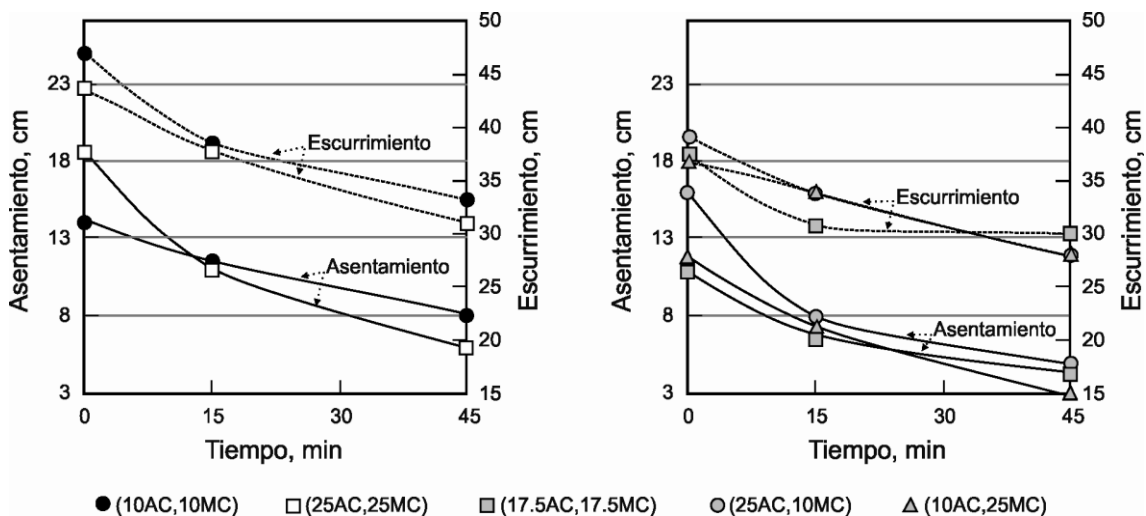


Figura 1. Pérdida de asentamiento y de escurrimiento en el tiempo de los hormigones elaborados con cementos ternarios.

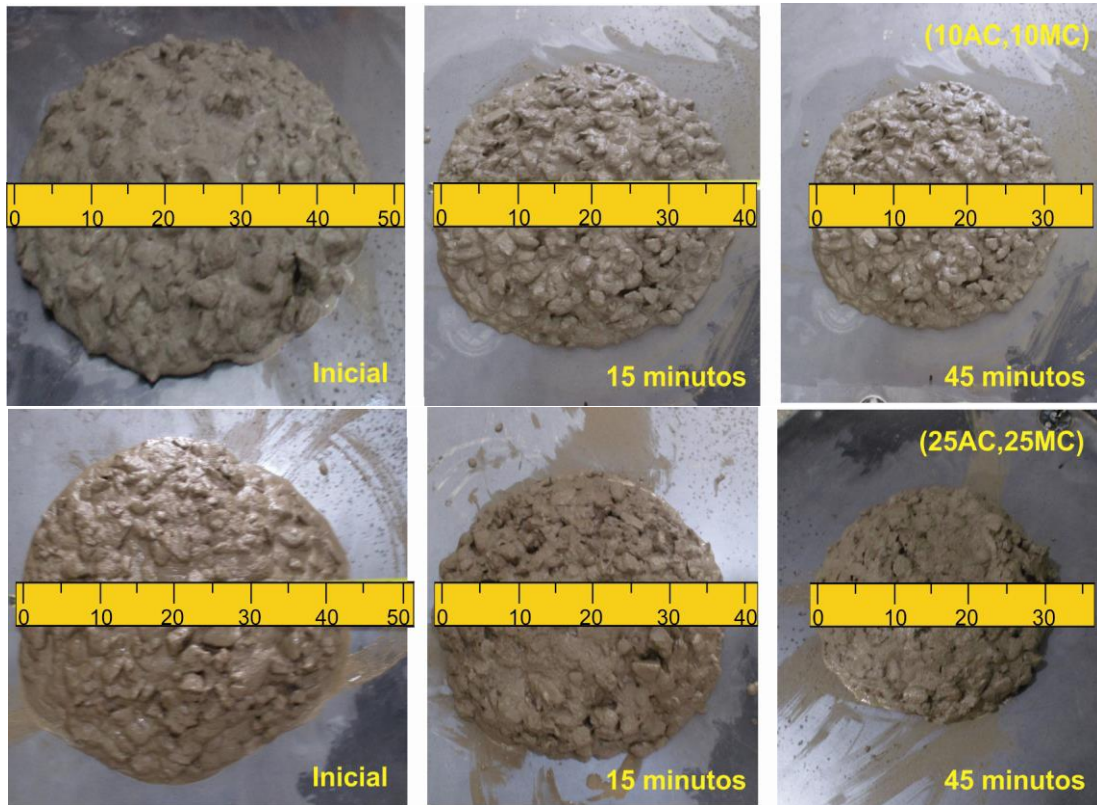


Figura 2. Variación del escurrimiento en el tiempo. a) Hormigón (10AC, 10MC) y b) Hormigón (25AC, 25MC).

A 28 y 90 días el hormigón (25AC, 25MC) registra una resistencia hasta 24% menor que la alcanzada por el hormigón (10AC, 10MC). Los hormigones con 35% de MCS comienzan a evidenciar un comportamiento diferente al registrado en las primeras edades, pues este parámetro se incrementa a medida que

aumenta el contenido de arcilla calcinada en el cemento, así a 90 días el hormigón (25AC, 10MC) tiene una resistencia 14% (36,4 MPa) mayor que la alcanzada por el hormigón (10AC, 25MC) y similar a la obtenida por el hormigón (10AC, 10MC) (35,8 MPa). A estas edades la reacción de la arcilla calcinada

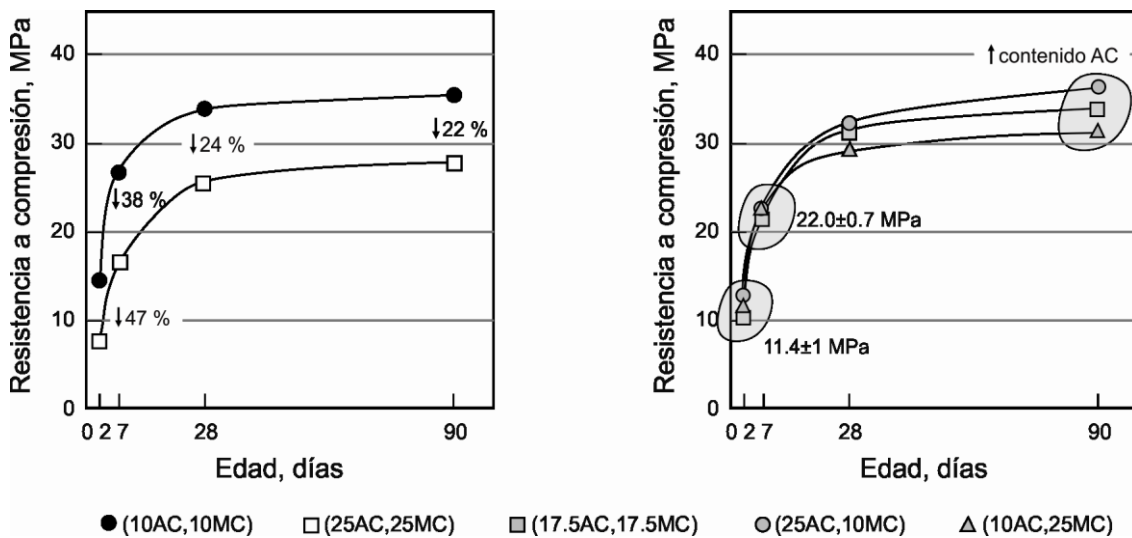


Figura 3. Resistencia a compresión de los hormigones.

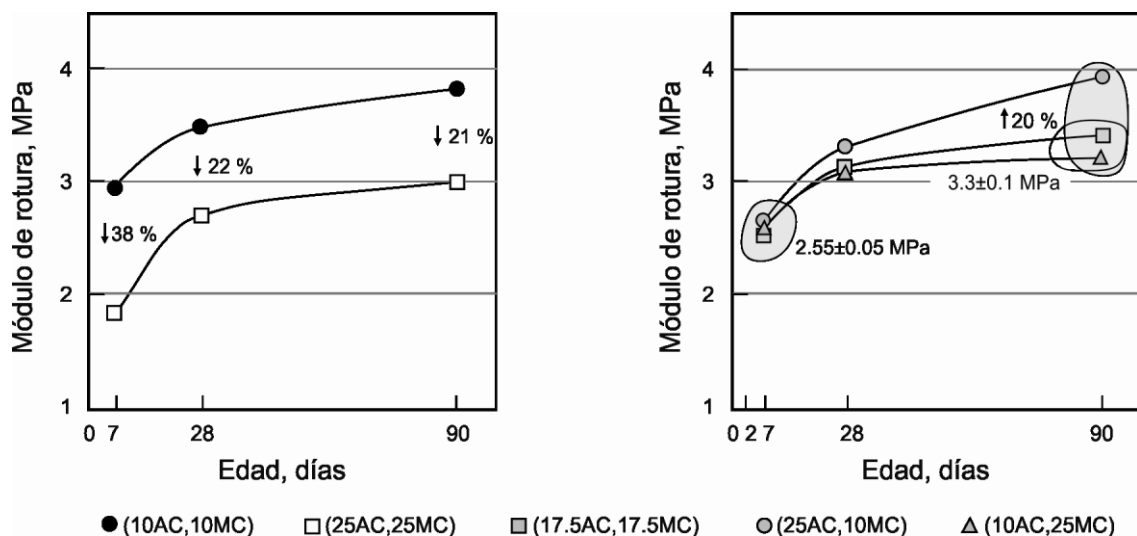


Figura 4. Módulo de rotura de los hormigones.

permite compensar parcialmente el efecto de dilución del cemento provocado por la porción no reactiva de la arcilla calcinada (aproximadamente 52%) y por el material calcáreo.

Un comportamiento similar al obtenido en la resistencia a compresión es registrado por los hormigones en el módulo de rotura (Fig. 4).

El hormigón (25AC, 25MC) registra un menor módulo que el resto de los hormigones, siendo esta diferencia más pronunciada a 7 días (38%). Por otra parte, los hormigones con 35% de MCS y menores contenidos de arcilla calcinada (10 y 17,5%) registran un módulo muy similar a todas las edades, mientras que el hormigón (25AC, 10MC) presenta el mayor módulo dentro del grupo de 35% de MCS, resultando similar al registrado por el hormigón (10AC, 10MC).

La Fig. 5 muestra la relación entre los resultados obtenidos de la resistencia a la compresión (R_c) y el módulo de rotura (MR) para todos los hormigones estudiados hasta los 90 días. La línea de puntos es la curva de tendencia ($MR = 0,178 \times R_c^{0,85}$, $R^2 = 0,96$) que indica que el desarrollo del módulo de rotura coincide con la resistencia a la compresión.

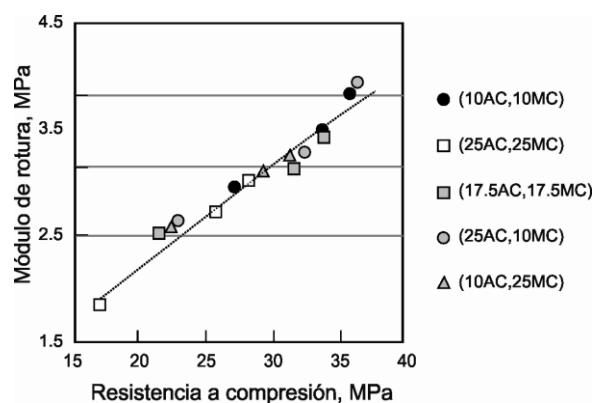


Figura 5. Módulo de rotura vs resistencia a compresión.

3.3 Succión capilar

La Tabla 4 y la Fig. 6 muestran los resultados obtenidos de este parámetro a 28 días. Las menores capacidad y velocidad de succión capilar son registradas por los hormigones (10AC, 10MC) y (25AC, 10MC), mientras que los mayores valores los alcanza el hormigón (10AC, 25MC). A igual contenido de adición (35%), a medida que aumenta el contenido de material calcáreo en el cemento, la capacidad y la velocidad de absorción del hormigón se incrementan.

Tabla 4. Succión capilar de los hormigones.

Hormigón	Succión capilar		
	Capacidad (g/m ²)	Velocidad, (g/m ² s ^{1/2})	R ²
(10AC, 10MC)	2052,5	3,3	0,93
(17,5AC, 17,5MC)	2848,9	4,9	0,94
(25AC, 10MC)	2369,1	3,4	0,94
(10AC, 25MC)	3425,0	5,7	0,90
(25AC, 25MC)	2885,7	5,2	0,95

Además, el empleo de 25% de arcilla calcinada permite aumentar el contenido de material calcáreo de 10 a 25% obteniendo una capacidad y una velocidad de succión capilar de 16 y 9% menores a las alcanzadas por el hormigón (10AC, 25MC).

Por último, sólo los hormigones elaborados con cementos ternarios con menor contenido de material calcáreo ((10AC, 10MC) y (25AC, 10MC)) cumplen el requisito estipulado por el Reglamento CIRSOC 201 [41] de tener una velocidad de succión menor o igual a 4 g/m² s^{1/2} a 28 días.

3.4 Penetración de agua a presión

La Tabla 5 muestra los resultados obtenidos de penetración de agua a presión a los 28 días. La menor penetración de agua a presión es registrada por el hormigón (10AC, 10MC) (Fig. 7). Los hormigones con igual contenido de adición (35%) registran una penetración similar (20,5 ± 0,7 mm), mientras que el hormigón (25AC, 25MC) registra el mayor valor de este parámetro (Fig. 7).

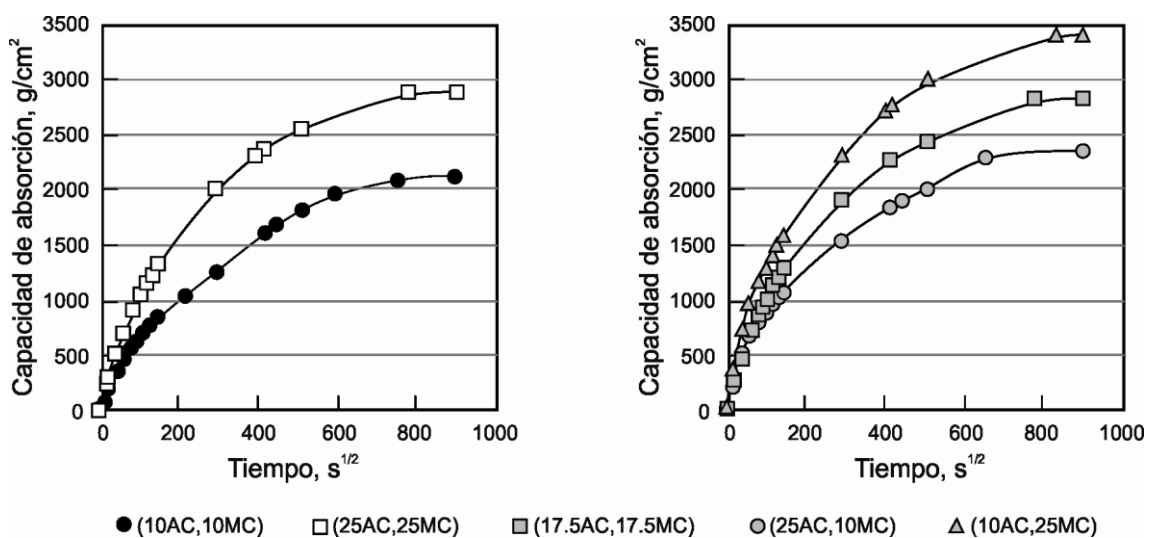


Figura 6. Succión capilar en función del tiempo de los hormigones.

Tabla 5. Penetración de agua de los hormigones.

Hormigón	Penetración de agua a presión (mm)		
	Media	Máxima	Mínima
(10AC, 10MC)	13,6	18,0	10,0
(17,5AC, 17,5MC)	19,8	24,5	12,0
(25AC, 10MC)	21,4	30,0	15,0
(10AC, 25MC)	20,4	25,0	13,0
(25AC, 25MC)	26,2	40,0	17,0

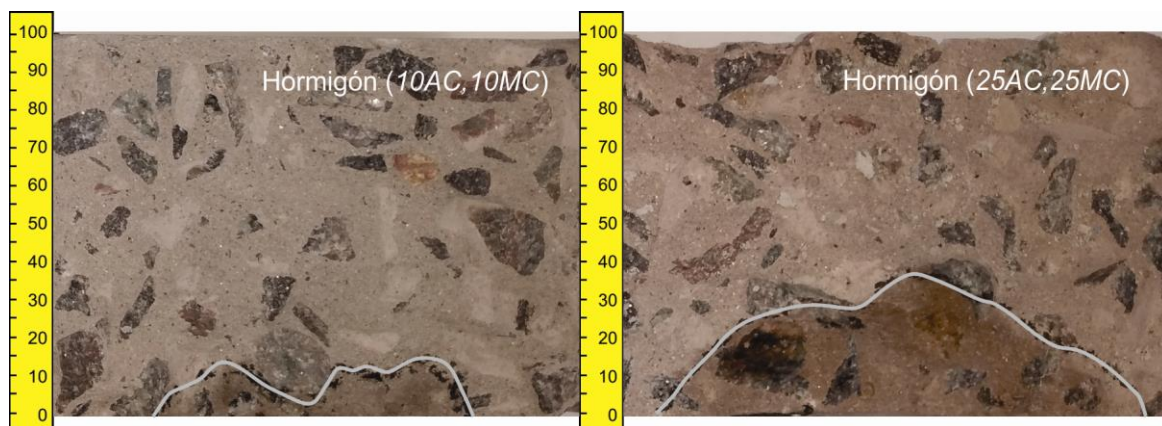


Figura 7. Penetración de agua a presión de los hormigones (10AC, 10MC) y (25AC, 25MC).

Aún así, los hormigones cumplen con las condiciones estipuladas por el Reglamento CIRSOC 201 [41] para hormigones de elevada impermeabilidad, presentado en todos los casos una penetración media y máxima menor a 30 y 50 mm, respectivamente.

4. Conclusiones

De acuerdo a los materiales y proporciones de MCS empleados en este estudio, y a los resultados obtenidos, se puede considerar que:

Los hormigones con hasta 50% de arcilla calcinada y material calcáreo resultaron trabajables, con muy buena cohesión, sin exudación apreciable y excelente terminación.

Hasta los 28 días, las propiedades mecánicas de los hormigones resultan dependientes del contenido total de MCS incorporado en el cemento y prácticamente independiente del tipo de MCS. A edades más avanzadas el mejor comportamiento se registró para los hormigones con mayor contenido de arcilla calcinada.

Una velocidad de succión capilar menor a la estipulada por el Reglamento CIRSOC 201 [41] sólo es alcanzada por los hormigones con menor contenido de material calcáreo (10AC, 10MC) y (25AC, 10MC), mientras que todos los hormigones estudiados verifican el límite del Reglamento dado para la penetración de agua a presión para hormigones impermeables.

Referencias

- [1] IEA, IRENA, UNSD, WB, W. Global Status Report for Buildings and Construction. (2019). En *UN Environment programme* (Vol. 224).
- [2] Giergiczny, Z. (2019). Fly ash and slag. *Cement and Concrete Research*. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.105826>
- [3] <https://unfccc.int/es/process-and-meetings/the-paris-agreement/el-acuerdo-de-paris>
- [4] Miller, S. A., John, V. M., Pacca, S. A., y Horvath, A. (2016). Carbon dioxide reduction potential in the global cement industry by 2050. *Cement and Concrete Research*, 114, 115–124. <https://doi.org/ggfzpb8>
- [5] American Concrete Institute. (2012). 232-Committee. 232.1R-12: Report on the Use of Raw or Processed Natural Pozzolans in Concrete. *Technical Documents*.
- [6] Massazza, F. (2003). Pozzolana y Pozzolanic Cements. *Lea's Chemistry of Cement and Concrete* (pp. 471–635). Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/bbsdpx>
- [7] Snellings, R., Mertens, G., y Elsen, J. (2012). Supplementary cementitious materials. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 74, 211–278. <https://doi.org/gjzkrq>
- [8] Danner, T., Norden, G., y Justnes, H. (2018). Characterisation of calcined raw clays suitable as supplementary cementitious materials. *Applied Clay Science*, 162, 391–402. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2018.06.030>
- [9] Habert, G., Choupay, N., Escadeillas, G., Guillaume, D., y Montel, J. M. (2009). Clay content of argillites: Influence on cement based mortars. *Applied Clay Science*, 43(3–4), 322–330. <https://doi.org/bwd2qq>
- [10] Maier, M., Beuntner, N. y Thienel, K. C. (2021). Mineralogical characterization and reactivity test of common clays suitable as supplementary cementitious material. *Applied Clay Science*, 202, 105990. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2021.105990>
- [11] Taylor-Lange, S. C., Lamon, E. L., Riding, K. A. y Juenger, M. C. G. (2015). Calcined kaolinite-bentonite clay blends as supplementary cementitious materials. *Applied Clay Science*, 108. <https://doi.org/f67t7x>
- [12] Sabir, B. B., Wild, S., y Bai, J. (2001). Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: a review. *Cement and Concrete Composites*, 23, 441–454. <https://doi.org/dscwv7>
- [13] Sidique R., y Klaus J. (2009). Influence of metakaolin on the properties of mortar and concrete: a review. *Applied Clay Science*, 43, 392–400. <https://doi.org/fhcr7q>
- [14] Lemma, R., Irassar, E. F., y Rahhal, V. (2015). Calcined illitic clays as portland cement replacements. *Calcined Clays Sustain. Concr.*, 10, 269–276. <https://doi.org/gms7>
- [15] Lemma, R., Castellano, C., Bonavetti, V., Trezza, M., Rahhal, V., y Irassar, E. F. (2018). Thermal transformation of illitic-chlorite clay and its pozzolanic activity. *Calcined Clays for Sustainable Concrete RILEM Bookseries 16* (pp.266–272). Springer. <https://doi.org/gms8>
- [16] Irassar, E. F., Bonavetti, V. L., Castellano, C. C., Trezza, M. A., Rahhal, V. F., Cordoba, G., y Lemma, R. (2019). Calcined illite-chlorite shale as supplementary cementing material: Thermal treatment, grinding, color and pozzolanic activity. *Applied Clay Science*, 179 (January). <https://doi.org/gmtb>
- [17] Marchetti, G., Pokorny, J., Tironi, A., Trezza, M. A., Rahhal, V. F., Pavlík, Z., Černý, R., y Irassar, E. F. (2018). Blended cements with calcined illitic clay: Workability and hydration. *Calcined Clays for Sustainable Concrete RILEM Bookseries 16* (pp.310–317) https://doi.org/10.1007/978-94-024-1207-9_50
- [18] Di Salvo Barsi, A., Marchetti, G., Trezza, M. A., y Irassar, E. F. (2020). Carbonate rocks as fillers in blended cements: Physical and mechanical properties. *Construction and Building Materials*, 248, 118697 <https://doi.org/gmtc>
- [19] Kwan, A. K. H. y McKinley, M. (2014). Effects of limestone fines on water film thickness, paste film thickness and performance of mortar. *Powder Technology*, 261, 33–41. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2014.04.027>
- [20] Bonavetti, V., Donza, H., Menéndez, G., Cabrera, O., y Irassar, E. F. (2003). Limestone filler cement in low w/c concrete: A rational use of energy. *Cement and Concrete Research*, 33(6), 865–871. <https://doi.org/d47989>
- [21] Scrivener, K. L., Juilland, P., y Monteiro, P. J. M. (2015). Advances in understanding hydration of Portland cement. *Cement and Concrete Research*, 78, 38–56 <https://doi.org/gg25xk>
- [22] Bonavetti, V. L., Rahhal, V. F., y Irassar, E. F. (2001). Studies on the carboaluminate formation in limestone filler-blended cements. *Cement and Concrete Research*, 31(6), 853–859. <https://doi.org/bs8h7c>

- [23] Lothenbach, B., Le Saout, G., Gallucci, E., y Scrivener, K. (2008). Influence of limestone on the hydration of Portland cements. *Cement and Concrete Research*, 38(6), 848–860. <https://doi.org/b3nxtc>
- [24] Gutteridge, W. A., y Dalziel, J. A. (1990). Filler cement: The effect of the secondary component on the hydration of Portland cement. Part I. A fine non-hydraulic filler. *Cement and Concrete Research*, 20(5), 778–782. <https://doi.org/fbdq96>
- [25] Sersale, K. (1992). Advances in portland and blended cement. *Proceedings of the 9th International Congress of the Chemistry of Cement* (pp. 277-279).
- [26] Cyr, M., Lawrence, P. y, Ringot, E. (2005). Mineral admixtures in mortars: Quantification of the physical effects of inert materials on short-term hydration. *Cement and Concrete Research*, 35(4), 719–730. <https://doi.org/cbbq54>
- [27] Bonavetti, V. L., Castellano, C., Donza, H., Rahhal, V., y Irassar, E. F. (2013). The Powers model and limits of calcareous material content in blended cements. *Revista IMCYC*, 5, (1), 40-50.
- [28] Menéndez, G., Bonavetti, V. L., y Irassar, E. F. (2003). Strength development of ternary blended cement with limestone filler and blast-furnace slag. *Cement and Concrete Composites*, 25, (1), 57-63. <https://doi.org/ch3frp>
- [29] Carrasco, M. F., Menéndez, G., Bonavetti, V. L., y Irassar, E. F. (2005). Strength Optimization of “Tailor Made Cement” with Limestone Filler and Blast Furnace Slag. *Cement and Concrete Research*, 35, 1324-1331. <https://doi.org/cmt7rt>
- [30] Bonavetti, V. L., Menéndez, G., Donza, H. A., Rahhal, V. F., y Irassar, E. F. (2006). Composite cements containing natural pozzolan and granulated blast furnace slag. *Materiales de Construcción*, 56(283), 25-36. <https://doi.org/10.3989/mc.2006.v56.i283.6>
- [31] Bonavetti, V. L., Castellano, C. C., y Irassar, E. F. (2016). Hidratación y Resistencia de sistemas ceniza volante – material calcáreo. *7º Congreso Internacional y 21ª Reunión Técnica de la Asociación Argentina del Hormigón*.
- [32] Bonavetti, V. L., Castellano, C. C., y Irassar, E. F. (2019). Blended cement with illitic calcined clay and calcareous material. *International Congress on the Chemistry of Cement Prague (ICCC 2019)* ID: 379.
- [33] Instituto Argentino de Racionalización de Materiales (2000). *NORMA IRAM 50000. Cementos para uso general*.
- [34] Instituto Argentino de Racionalización de Materiales (2020). *NORMA IRAM 1536. Hormigón fresco de cemento. Método de ensayo de la consistencia utilizando el tronco de cono*.
- [35] Instituto Argentino de Racionalización de Materiales (1986). *NORMA IRAM 1690. Hormigón de cemento portland. Método de ensayo de la consistencia utilizando la mesa de Graff*.
- [36] Instituto Argentino de Racionalización de Materiales (1995). *NORMA IRAM 1662. Hormigones y morteros. Determinación del tiempo de fraguado. Método de resistencia a la penetración*.
- [37] Instituto Argentino de Racionalización de Materiales (2013). *NORMA IRAM 1546. Hormigón de cemento. Método de ensayo de compresión*.
- [38] Instituto Argentino de Racionalización de Materiales (1992). *NORMA IRAM 1547. Hormigón de cemento portland. Ensayo de tracción por flexión*.
- [39] Instituto Argentino de Racionalización de Materiales (2004). *NORMA IRAM 1871. Hormigón. Método de ensayo para la determinación de la capacidad y el coeficiente de succión capilar de agua del hormigón endurecido*.
- [40] Instituto Argentino de Racionalización de Materiales (1983). *NORMA IRAM 1554. Hormigón de cemento portland. Método de determinación de la penetración de agua a presión en el hormigón endurecido*.
- [41] Ministerio de Planificación Federal, Inversión Pública y Servicios, Secretaría de Obras Públicas de la Nación (2005). *INTI-CIRSOC. Reglamento argentino de estructuras de hormigón CIRSOC 201*. (<https://www.inti.gob.ar/assets/uploads/files/cirsoc/vigencia-2013/area100/area100a/reglamento201completo.pdf>).