

DEMANDA DE AGUA Y ADITIVO SUPERFLUIDIFICANTE EN PASTAS DE CEMENTO Y FILLER CUARCÍTICO

Ignacio A. Billiot¹, Gabriela Coelho dos Santos², Claudio J. Zega³, Anahí Lopez⁴

¹LEMIT / CICIPBA 52 entre 121 y 122; La Plata, ignaciobilliot@hotmail.com

²LEMIT / CICIPBA 52 entre 121 y 122; La Plata, gabrielacoelho.lemmit@gmail.com

³LEMIT / CONICET, 52 entre 121 y 122; La Plata, hormigones@lemmit.gov.ar

⁴LEMIT / CICIPBA, 52 entre 121 y 122; La Plata, colores@lemmit.gov.ar

RESUMEN

El uso de residuo proveniente de la minería en las mezclas cementíceas es una alternativa para solucionar la problemáticas de su disposición final y del menor consumo de energía en la fabricación de cemento. Una propuesta a esta problemática fue optimizar el lodo proveniente del lavado de arena de trituración cuarcítica. Así, quedó conformado el filler compuesto por cuarzo cubierto por arcillas, para determinar la demanda de agua y la dosis óptima de aditivo superfluidificante en pastas. Las pastas se realizaron con 0, 20, 30, 40 y 50 % de filler y según el ensayo de pasta de consistencia normal el requerimiento de agua aumentó de 26 a 38%. También, se repitieron las pastas con relación agua/cemento 0,45 y aditivo superplastificante. Según los ensayos de minislump y cono de Marsh la demanda de aditivo fue muy importante para el uso de 50 % de filler y moderada para contenidos menores. Las mezclas presentaron elevada viscosidad y buenas características de cohesión al utilizarse filler. El comportamiento fresco de las pastas con filler favorece la obtención de hormigones autocompactantes

Palabras claves: filler cuarcítico, superfluidificante, compatibilidad, sustentabilidad.

INTRODUCCIÓN

Los procesos constructivos producen un efecto adverso sobre el ecosistema y la salud si no son debidamente planificados y ejecutados, generando degradación del medio, incluyendo la contaminación del aire, suelo y agua [1]. A su vez el avance de la civilización requiere cada vez un mayor aporte de este sector, aumentándose la contaminación producida. En consecuencia, surge la urgente necesidad de buscar alternativas que permitan disminuir estos impactos negativos.

Uno de los materiales estructurales de uso más frecuentes en la construcción es el hormigón, compuesto en parte por cemento el cual conlleva para su producción un gran impacto ambiental. La reducción de la contaminación de este sector se puede simplificar en tres alternativas, el uso controlado de los recursos, la reducción de los contaminantes emitidos y la correcta gestión de los residuos generados.

Otro sector vinculado a la construcción que también genera impacto ambiental es el de las canteras de producción de agregados, en tamaños de piedra y arena. La producción del denominado material 0-6mm conlleva muchas veces un proceso de lavado en pos de reducir el contenido de polvo y mejorar así las propiedades del material. Esta situación se

está produciendo puntualmente en una cantera de producción de agregados cuarcíticos de la provincia de Buenos Aires, donde luego del lavado se genera una reserva de material muy fino en forma de fango cuarcítico-arcilloso. Este residuo constituye un pasivo ambiental minero [2], de características físicas y mineralógicas factibles de convertirlo en un subproducto con disposición final en la industria del hormigón. Además, con prometedoras propiedades autocompactantes si es remplazado por menos de 75 % de volumen de filler calizo y resistencia a compresión de 25 MPa [3].

El volumen de fango generado en el período Mayo 2016- Abril 2017 fue de 10 t, equivalente al 10 % del peso del material lavado, el cuales significativo para la industria del hormigón considerando que podría aprovecharse como filler mineral. Por otra parte, considerando que durante los últimos 10 años en el país la producción de HAC fue sólo del 1,5 % de la producción de hormigón elaborado [4], la cantidad producida (10 t) podría llegar a cubrir la demanda del mercado regional.

El uso de nuevos materiales para la elaboración de hormigón requiere evaluar el comportamiento de las mezclas cementíceas en estado fresco y endurecido. El empleo de polvos de canteras, principalmente de diabasa, granito y basalto, como alternativa al uso convencional de filler calizo o de cuarzo, resulta técnicamente factible para la producción de pasta de elevada performance y eco-amigable, sin desventajas en el estado fresco, endurecido y microestructural, lo que contribuye a la ecoeficiencia de la construcción [5].

Este trabajo tiene como objetivo el estudio de la demanda de agua y de aditivo en pastas cementíceas con la incorporación de un residuo cuarcítico de cantera para su futuro uso en hormigones autocompactantes. Por ello, se ideó una metodología con normativa argentina, europea y guías internacionales para optimizar la verificación del residuo, principalmente sobre la compatibilidad de los materiales.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se utilizó un cemento pórtland con filler calizo (C) a granel identificado como CPF40, cuya composición química se presenta en la Tabla 1. El cemento presentó una densidad de 3,01 g/cm³ [6], una finura Blaine de 490 m²/kg [7] y el contenido de partículas mayor a 75 µm fue de 1,5 % [8]. La resistencia a compresión fue de 28,5 MPa y 48,4 MPa a 2 y 28 días respectivamente [9]. El requerimiento de agua para obtener la pasta de consistencia normal fue de 26 % [10] y el tiempo inicial y final de fraguado de 2:05 h y 3:10 h [11], respectivamente.

El filler cuarcítico (FQ) provino del lavado de arena de trituración cuarcítica, y está conformado principalmente por cuarzo (67 %), caolinita (20 %) e illita (11 %). Su composición química se presenta en la Tabla 1. El acondicionamiento del lodo se realizó en laboratorio secado a 80±5 °C en horno eléctrico durante 24 horas y luego fue disgregado en un molino de laboratorio durante 15 minutos, utilizando cylpebs y bolas de acero. La carga del molino fue 1:(1+1) (lodo:cylpebs+bolas).

El límite plástico y el límite líquido del FQ fue realizado según normas de ensayos de la Dirección Nacional de Vialidad [12, 13]. El límite plástico fue de 19,6 % y el límite líquido de 33,4 %, siendo la diferencia entre ambos el índice de plasticidad (IP) igual a 13,8 %. El límite líquido indica la humedad necesaria para que el material se comporte como un líquido. La carta de Plasticidad de Casagrande considera los dos parámetros de LL y de IP, así el material corresponde a una arcilla de baja plasticidad (CL). Por lo tanto, para lograr su mejor movilidad deberá absorber aproximadamente el 33,4 % de agua de mezclado.

La Tabla 2 muestra la distribución granulométrica del FQ, si bien esta metodología no está documentada en normativas que indiquen su ejecución por vía seca. La industria minera ha utilizado evaluaciones de este tipo a través de tamices entre 0,038 mm y 1,18 mm para pruebas de moliendas en seco [14].

Tabla 1: Composición química [%] del cemento (C) y del fillercuarcítico (FQ).

Material	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	SO ₃	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₃	PC
C	63,67	18,55	3,14	3,02	nd	1,57	1,59	0,61	0,22	nd	9,2
FQ	0,36	67,68	18,98	0,69	0,52	0,09	1,81	1,72	2,20	0,65	5,3

El 88,2 % del material seco muestra que las partículas tienen un tamaño inferior a 125 µm, hecho que haría factible su utilización en HAC, ya que contribuiría a la viscosidad requerida en dichos hormigones [15]. Este gran aporte realizado por el filler permitiría satisfacer la demanda de finos, la cual es de entre 400 y 600 kg/m³. Por otro lado, el tamizado por vía húmeda según el procedimiento de la norma [8] indicó que el 95 % de FQ es inferior a 125µm.

Tabla 2: Distribución granulométrica del FQ.

Tamiz N°	#30	#16	#30	#50	#100	#120	#200
[mm]	2,36	1,18	0,59	0,297	0,149	0,125	0,075
Pasante [%]	100,0	99,9	99,9	98,3	92,5	88,2	48,6

El aditivo utilizado fue un superfluidificante experimental formulado específicamente para su empleo en combinación con el FQ. Es un policarboxilato (aporte sólido: 48 %) [16] de color ámbar uniforme y aspecto viscoso. La dosis de aditivo se ha expresado en porcentaje sólido del peso del cemento [sp/c, %].

El estudio se dividió en dos partes: 1) la primera con el objetivo de identificar la demanda de agua ocasionada por incremento de FQ en remplazo del peso de cemento, según el ensayo de la pasta de consistencia normal (PCN) [10]. Luego de analizar este comportamiento y teniendo la referencia del límite líquido del FQ, se fijó una relación agua/cemento de 0,45 para la siguiente parte; y así 2) La segunda tuvo el fin de evaluar la fluidez [17] y deformabilidad de pastas que incrementaban el contenido de aditivo en pastas también con diferente contenido de FQ. Se utilizó el equipamiento detallado en la Figura 1 para estimar la cantidad óptima de aditivo que permita mantener los materiales homogéneos, el menor tiempo de pasaje por el Cono de Marsh y el mayor diámetro final con el cono de Kantro o minislump [18]. En ambos ensayos se realizaba la inspección visual destacando la homogeneidad del material. El procedimiento de mezclado que se adoptó fue modificado de la normativa [10] para lograr una mejor homogenización de los materiales ya que la cantidad fue considerablemente mayor y se detalla en la Figura 2. Se puede observar que para el estudio de la demanda de agua el tiempo de mezclado total fue de 3 minutos y 15 segundos, y para el estudio de la demanda de aditivo de 3 minutos y 45 segundos. Las principales diferencias respecto a la normativa para PCN fueron que 2/3 del aditivo se adicionó al agua de mezclado junto al cemento y al residuo, que durante 30 segundos permanecieron en reposo (esto para facilitar la distribución del material), y transcurrido 60 segundos de mezclado lento se agregó el 1/3 de aditivo restante.

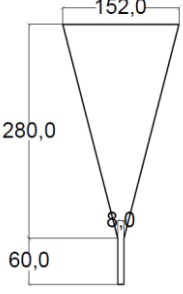
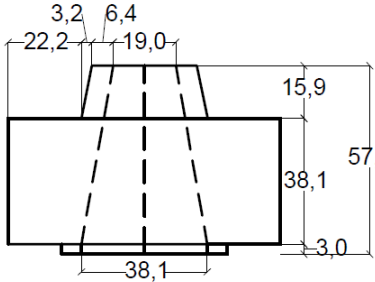
	
<p>El cono se llena con 1000 mL de pasta y se mide el tiempo en segundos [s] de la descarga de 300 mL. Promedio de tres mediciones, Tm</p>	<p>El cono se llena y luego de 5 segundos se levanta suavemente. Cuando deja de escurrir se realizan las mediciones del diámetro final en milímetros [mm]. Promedio de dos mediciones, Dm.</p>
<p>Cono de Marsh [19]</p>	<p>Minislump [18]</p>

Figura 1: Dimensiones en mm del cono de Marsh y Minislump.

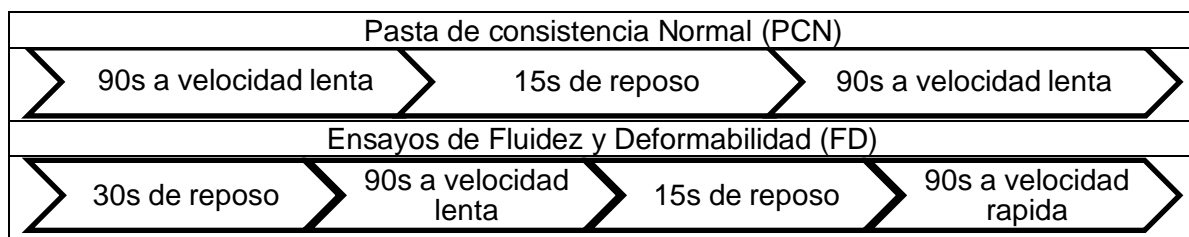


Figura 2: Procedimientos de mezclado para PCN y FD.

La nomenclatura adoptada consistió en la letra q, minúscula para el estudio de la demanda de agua y mayúscula para el estudio de la fluidez y deformabilidad, acompañada de un número referente al porcentaje de filler que poseían las pastas. Es decir, para el primer estudio se refirió a las pastas como q0, q2, q3, q4, q5 y q10 para porcentajes de filler de 0, 20, 30, 40,50 y 100 %. Mientras que para el estudio de la fluidez se adoptó Q0, Q2, Q3, Q4 y Q5 para los mismos porcentajes excluyendo el 100 % de reemplazo de FQ.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Figura 3a muestra la resistencia a la penetración de las pastas q0, q2, q3, q4, q5 y q10, en el ensayo de Vicat. En el eje de abscisas inferior se ubica la penetración en porcentaje y en el eje superior la penetración en milímetros, mientras que en las ordenadas se presenta la cantidad de agua en porcentaje. Cabe destacar que según el procedimiento de la norma IRAM 1612, una pasta es de consistencia normal cuando al realizar el ensayo la aguja queda a 5 ± 1 mm del fondo, lo que sería equivalente a decir que penetró 35 ± 1 mm debido a que el molde en el cual se realiza el ensayo tiene 40 mm de profundidad.

Se determinó una demanda del 26% para la pasta de consistencia normal en la mezcla sin incorporación del residuo (q0), luego aumentó un 7 % (PCN: 33 %), 8 % (PCN: 34 %), 11 % (PCN: 37 %) y 12 % (PCN: 38 %) para las mezclas que reemplazaron 20, 30, 40 y 50 % FQ respectivamente (ver Figura 3b). El incremento de remplazo de FQ aumenta la demanda de agua debido al mayor contenido de material arcilloso existente en la mezcla, alertando sobre la disminución de la resistencia mecánica si no se toman medidas compensadoras. La mezcla q10 tuvo una demanda de agua (34,4 %) que fue muy similar al límite líquido del material. La semejanza del porcentaje de agua determinado según los dos métodos para el 100 % de FQ, puede alertar que el LL sea un ensayo más aplicado a

la tecnología del hormigón autocompactante para predecir el comportamiento fresco de un sistema cemento-agua-filler cuarcítico-superfluidificantes.

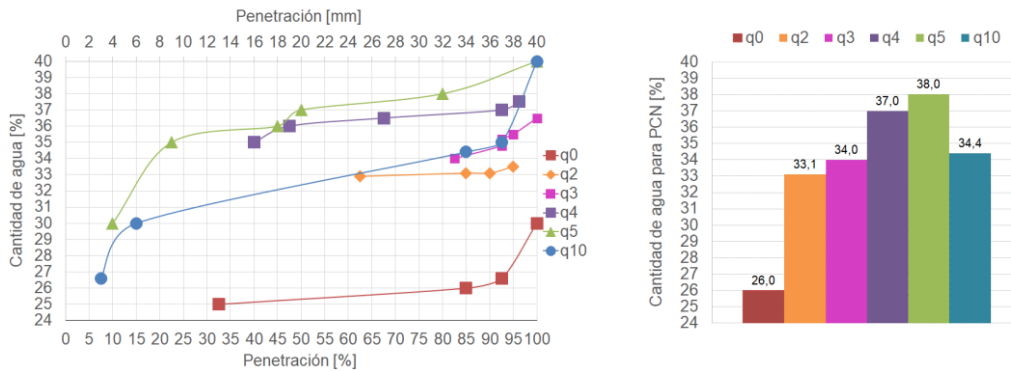


Figura 3: Variación de la penetración con respecto a la cantidad de agua (izq.), Cantidad de agua para PCN (der.)

Para una demanda de agua del 35 %, se observaron avances de la aguja de 3, 24, y 31 mm para las pastas de 30, 40 y 50 % de filler respectivamente, mientras que para la de un contenido de 100 % del residuo sólo avanzó 3 mm. A su vez para una penetración de 6mm (correspondiente a PCN) se obtuvieron demandas de agua del 26 % (q0), 33 % (q2) y 34,4 % (q10), siendo estos dos últimos muy similares. A partir de ello, se observa claramente la sensibilidad del ensayo a los incrementos en el contenido de FQ. Un hecho particular es el del q10, el cual muestra un comportamiento intermedio entre los otros porcentajes. Es necesario entonces profundizar en el estudio de la interacción entre las partículas del FQ y del cemento, especialmente para reemplazos superiores al 50 %.

La Tabla 3 muestra los valores promedios de tiempo (T_m , s) y diámetro final (D_m , mm) con sus respectivos desvíos estándares, resultantes de los ensayos de fluidez y deformabilidad. A medida que se aumentó el contenido de FQ fue necesario incrementar la dosis de aditivo a fin de lograr una adecuada fluidez de las pastas. En tal sentido, para alcanzar un diámetro final de 141 mm en la mezcla Q2 fue necesario 0,25 % de aditivo, mientras que para los 138 mm en la Q3 fue necesario 0,40 % de aditivo. A su vez, con dicha dosis (0,40 %) en Q3 se obtuvo un tiempo de descarga T_m de 37,22 s, mientras que para obtener un tiempo de 39 s en Q4 fue necesario incrementar la dosis del aditivo hasta 1,20 %. Esta tendencia se ve incrementada al observar el cambio entre el 40 % y 50 % del residuo, donde para obtener un T_m entorno a los 50 s se precisaron dosis de 0,90 % y 4,55 % respectivamente.











Es necesario señalar que para el 20 % de incorporación de filler (Q2) y una dosis de aditivo de 0,1 % no fue posible medir los parámetros de deformabilidad, debido a la poca fluidez de la mezcla.

Un parámetro que resulta de importancia al momento de evaluar la compatibilidad de los sistemas cemento-adición-aditivo es el denominado punto de saturación. Este se define como la dosis la aditivo por encima de la cual no se consiguen mejoras en la fluidez de la mezcla. En este estudio, el punto de saturación en cada pasta fue muy difícil de determinarlo entre las dosis empleadas. Sin embargo, según las fotografías indicadas en la Tabla 4 se podría adoptar dosis menores a 0,25 % en la pasta Q0. Para la pasta Q2 el punto de saturación se encontraría entre de 0,20 % y 0,25 %, el diámetro final mostró una pequeña segregación para esta última cantidad de aditivo. Similar comportamiento sucedió con 0,45 % de aditivo en la pasta Q3 ya que mayor contenido de aditivo implicaría mayor segregación. Si bien con esta mezcla no se logró obtener menos tiempo no fue posible la incorporación de más aditivo debido a la segregación de la mezcla.

Tabla 3: Resultados de los ensayos de fluidez.

Serie	sp/c (sólido) (%)	sp/c (líquido) (%)	Cono de Marsh		Mini slump	
			Tm	Desvío	Dm	Desvío
Q0	0,000	0,00	nd	nd	70,0	0,00
	0,025	0,05	17,06	0,51	87,0	2,83
	0,050	0,10	9,41	0,13	127,5	3,54
	0,250	0,52	7,88	0,82	197,5	3,54
Q2	0,100	0,21	nd	nd	nd	nd
	0,150	0,31	nd	nd	68,5	2,12
	0,175	0,36	105,08	51,31	70,0	0,00
	0,200	0,42	32,83	3,17	106,5	2,12
Q3	0,250	0,52	21,63	0,44	141,0	1,41
	0,250	0,52	nd	nd	nd	nd
	0,300	0,63	105,30	nd	77,5	0,71
	0,350	0,73	42,24	3,25	120,0	0,00
Q4	0,400	0,83	37,22	nd	138,0	5,66
	0,450	0,94	29,65	3,43	154,0	1,41
	0,450	0,94	nd	nd	85,0	0,00
	0,900	1,88	50,40	10,17	136,0	1,41
Q5	1,000	2,08	46,48	6,97	138,0	1,41
	1,200	2,50	39,66	4,69	151,5	2,12
	1,400	2,92	34,10	2,38	174,5	0,71
	2,000	4,17	99,99	21,49	108,5	2,12
Q5	3,000	6,25	87,81	17,16	117,5	3,54
	4,000	8,33	55,71	3,28	140,5	0,71
	4,550	9,48	51,81	2,44	142,5	0,71

Tabla 4: Aspecto de las pastas cercanas al punto de saturación.

Q0 0,05 %	Q2 0,20 %	Q3 0,40 %	Q4 1,20 %	Q5 4,00 %
				
Bordes con leve cambio de color. Círculo bien definido.	Bordes con leve cambio de color. Círculo bien definido.	Bordes sin segregación. Círculo bien definido.	Bordes sin segregación. Círculo bien definido.	Bordes sin segregación. Círculo bien definido.
0,25 %	0,25 %	0,45 %	1,40 %	4,55 %
				
Pasta segregada.	Bordes con leve cambio de color. Círculo bien definido.	Bordes con leve cambio de color. Círculo bien definido.	Pasta homogénea pero Círculo muy irregular.	Bordes sin segregación. Círculo bien definido.

A la pasta Q4 se le designó un punto de saturación de 1,20 % debido a que mayor cantidad de aditivo se observaba una gran segregación y a en la pasta Q5 puede estar entre 4,00 % y 4,55 %.

En la Figura 4 se muestran las curvas resultantes de las determinaciones del tiempo de pasaje (Tm) y del diámetro final del minislump. El punto de saturación se encuentra

rápidamente en la pasta Q0 al disminuir la dosis de aditivo. En las pastas con diferentes % de reemplazo del FQ, se observa que a partir de los cambios en las curvas no es posible definir fácilmente el punto de saturación ya que un aumento de la dosis de aditivo más allá de las graficadas producía la segregación de las pastas. Similar comportamiento mostró el ensayo de minislump, con menor sensibilidad al aumento en la dosis de aditivo conforme se incrementó el porcentaje de FQ.

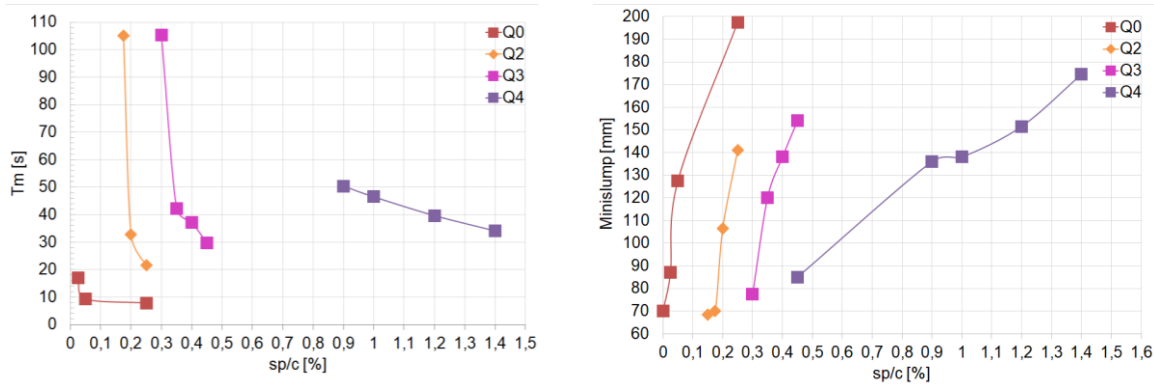


Figura 4: Valor de Tiempo de pasaje Tm y diámetro final (minislump).

CONCLUSIONES

Del estudio de la compatibilidad de sistemas cementíceos formados por cemento pórtland y filler cuarcítico, proveniente del lavado de arenas de trituración, surge que:

Se produce un aumento en la demanda de agua para obtener una pasta de consistencia a medida que se incorpora una mayor cantidad de filler. No obstante, la pasta con 100 % de filler no sigue el comportamiento del resto de las mezclas, hecho que requiere mayores estudios a fin de analizar la interacción entre las partículas de ambos materiales sólidos.

Los ensayos de fluidez y deformabilidad muestran un similar comportamiento, requiriendo para una misma fluidez utilizar una dosis mayor de aditivo al incrementarse el porcentaje de filler cuarcítico incorporado.

A mayor porcentaje de filler las mezclas adquieren mayor robustez, volviéndose poco sensible a cambios en la dosis de aditivo pero es muy sensible con pequeños cambios si no se utiliza FQ. Las pastas con un contenido de filler del 20 % tienen cambios importantes en su comportamiento con variaciones de aditivo del orden de 0,05 %, mientras que para las pastas con 50 % de filler es necesario incorporar más de 0,5 % para lograr diferencias en su comportamiento. Según los resultados obtenidos, reemplazos de 30 % a 40 % de FQ serían recomendados para garantizar comportamiento autocompactante y habría amplia disponibilidad del residuo para la producción de HAC en Argentina.

AGRADECIMIENTOS

El trabajo es un aporte al proyecto "Filler cuarcítico obtenido del fango residual de cantera para la optimización de hormigones" financiado por CICPBA y desarrollado en el LEMIT con la colaboración de Alejandro Pittori (PA-CICPBA), Belen Scarponi (LEMIT), Victor Celis (Técnico-CICPBA), Mario Fleitas (LEMIT) y personal de las áreas Durabilidad y Química.

El residuo fue facilitado por Canteras Yaravi S.A., por intermedio del Dr. Luis del Río. El aditivo fue proporcionado por el Ing. Sebastián Mora de la firma GCP Applied Technologies, y formulado por Danila Ferraz del laboratorio de R&D de Brasil, a quienes también agradecemos por su dedicación y continuo apoyo.

REFERENCIAS

- [1] Enshassi A, Kochendoerfer B, Rizq E, "Evolución de los impactos medioambientales de los proyectos de construcción", Revista Ingeniería de Construcción, Vol. 29, N°3, (2014), 234-254.
- [2] "Pasivos Ambientales Mineros Barriendo bajo la alfombra Consuelo Infante", Observatorio de Conflictos Mineros de América Latina. (2011), Disponible en: <https://es.slideshare.net/BiigJvliOo/pasivos-22-49659993>. (acceso: 03/2020).
- [3] López A, Zega CJ, Coelho Dos Santos GS, Carrizo LE, Etcheverry JM, Villagrán Zaccardi YA, "Potential use of a quarry waste for the production of self-compacting concrete", Proceedings of the International Conference of Sustainable Production and Use of Cement and Concrete, RILEM 2020 Book, series 22, (2020), 409-415.
- [4] Fornasier G, "Tecnología del hormigón aplicada a construcción industrializada de viviendas de ejecución in situ", Disponible en: <https://web.icpa.org.ar/index.php/2020/05/27/tecnologia-hormigon-aplicada-construccion-industrializada-viviendas-insitu/>. (acceso: 09/06/2020).
- [5] Ricardo de Matos P, Sakata RD, Paul Gleize PJ, de Brito J, Repette WL, "Ecofriendly ultra-high performance cement pastes produced with quarry wastes as alternative fillers", Journal of Cleaner Production, (2020), doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122308>
- [6] IRAM 1624, "Cemento. Método de ensayo para la determinación de la densidad", Instituto Argentino de Normalización y Certificación, (2002).
- [7] IRAM 1623, "Cemento pórtland. Método de ensayo de finura por tamizado seco y por determinación de la superficie específica por permeabilidad al aire (método de Blaine), Instituto Argentino de Normalización y Certificación, (2002).
- [8] IRAM 1621, "Cemento pórtland. Método de ensayo de finura por tamizado húmedo", Instituto Argentino de Normalización y Certificación, (2002).
- [9] IRAM 1622, "Cemento pórtland. Método de determinación de las resistencias mecánica", Instituto Argentino de Normalización y Certificación, (2002).
- [10] IRAM 1612, "Método de ensayo para la determinación de la consistencia normal", Instituto Argentino de Normalización y Certificación, (2003).
- [11] IRAM 1619, "Cemento pórtland. Método de determinación del tiempo de fraguado", Instituto Argentino de Normalización y Certificación, (1966).
- [12] Norma de ensayo VN-E2-65. Límite Líquido. Normas de ensayos de la Dirección Nacional de Vialidad, Argentina.
- [13] Norma de ensayo VN-E3-65. Límite Plástico. Normas de ensayos de la Dirección Nacional de Vialidad, Argentina.
- [14] Shi F, "Comparison of grinding media-Cylpebs versus balls", Minerals Engineering, (2004), doi: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2004.05.019>
- [15] TheConcreteinitiative.eu, "The European Guidelines for Self-Compacting Concrete Specification, Production and Use", disponible en: https://www.theconcreteinitiative.eu/images/ECP_Documents/EuropeanGuidelinesSelfCompactingConcrete.pdf (2005). (acceso: 12/2006).
- [16] IRAM 1663, "Hormigón de Cemento. Aditivos químicos", Instituto Argentino de Normalización y Certificación, (2003).
- [17] Agulló A, Torralles-Carbonari B, Gettu R, Aguado A, "Fluidity of cement pastes with mineral admixtures and superplasticizer - A study based on the Marsh cone tests", Materials and Structures, Vol. 32, (1999), 479-485.
- [18] Aitcin PC, "Modern concrete technology 5. High-performance concrete", Taylor & Francis e-Library, (204), 175-179.
- [19] UNE-EN 445, "Lechadas para tendones de pretensado. Métodos de ensayo", Asociación Española de Normalización y Certificación, (2009), 17p.