

## **AGREGADO FINO RECICLADO MOLIDO COMO FINO PARA LA ELABORACIÓN DE HORMIGONES AUTOCOMPACTANTES**

Rocío D. Laurente<sup>1</sup>, Claudio J. Zega<sup>1,2</sup>, Yury A. Villagrán Zaccardi<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Laboratorio de Entrenamiento Multidisciplinario para la Investigación Tecnológica y Comisión de Investigaciones Científicas, La Plata, Argentina. e-mail: hormigones@lemit.gov.ar

<sup>2</sup> CONICET, Argentina.

**Palabras clave:** agregado fino reciclado molido, finos, hormigón autocompactante

### **RESUMEN**

El hormigón de desecho resulta un contaminante muy voluminoso, y por lo tanto con gran impacto ambiental y económico. El agregado grueso reciclado ha demostrado gran factibilidad para su uso en la elaboración de hormigón nuevo, pero el uso de agregado fino reciclado resulta más dificultoso debido a su contenido de pasta, polvo y forma de partículas, con el consecuente aumento del contenido de agua de mezclado. Es por ello, que se requieren alternativas de uso de este desecho, resultando de interés estudiar el uso del agregado fino reciclado molido (AFRM) como material suplementario a fin de mejorar la distribución de tamaños del paquete granular en hormigones con alto contenido de finos como son los hormigones autocompactantes. En este trabajo se presentan resultados preliminares de aprovechamiento del AFRM como fino para la elaboración de hormigón autocompactante, en reemplazo del tradicionalmente utilizado filler calizo. Se evaluaron propiedades en estado fresco para determinar el nivel de autocompactabilidad, determinándose en estado endurecido la resistencia a compresión y distintos parámetros de durabilidad. La factibilidad de esta aplicación requiere mayores precisiones respecto a la influencia del AFRM en la reología de las mezclas.

### **INTRODUCCIÓN**

La contaminación producida por los desechos provenientes de la industria de la construcción origina un fuerte impacto en el medio ambiente, a la vez que las fuentes de donde se extraen los recursos naturales usados como materia prima son escasas. Específicamente para el hormigón de desecho, los desperdicios generados se depositan en vertederos, muchas veces de forma no controlada. Este impacto no sólo es paisajístico, también se produce la afectación química del suelo, con consecuencias sobre aguas subterráneas y posteriormente sobre la salud de las personas.

Por otro lado, el hormigón de desecho presenta cualidades que lo hacen un material altamente aprovechable a través de su reutilización y reciclado. En este sentido, una de las aplicaciones de este material es en la producción de agregado grueso reciclado para su empleo en nuevos hormigones. La factibilidad de esta alternativa ha sido ya determinada (1-5), estableciéndose en líneas generales que con hasta un 75% de reemplazo de agregado grueso reciclado se obtienen hormigones que no difieren en la resistencia mecánica a compresión respecto a hormigones con 0% de reemplazo, aunque desde el punto de vista de la durabilidad este porcentaje se limita al 25-30% de reemplazo (6-8).

Como subproducto del reciclado de hormigón para agregado grueso se obtiene agregado fino, que presenta importantes dificultades para su empleo debido al mortero adherido y a la forma de sus partículas, que traen como consecuencia una mayor demanda de agua y una menor trabajabilidad del hormigón (9-11). Es por ello que es importante encontrar alternativas para el empleo del agregado fino reciclado, con vistas a lograr un reciclado total del hormigón de desecho. En estudios previos (12), se estudió la posibilidad de utilizar el agregado fino reciclado molido (AFRM) como adición mineral en reemplazo parcial del cemento, en contenidos de hasta el 30% en la elaboración de morteros. El AFRM mostró un efecto de dilución preponderante atribuido a la finura alcanzada durante la molienda, en específico, la dureza del granito implicó que la energía requerida para la molienda necesaria para alcanzar una finura suficiente que permita un efecto filler, no parece conveniente desde el punto de vista ambiental.

A diferencia de lo señalado, el AFRM podría ser utilizado como adición para la compensación del contenido de finos en hormigones que requieren alta cohesividad. Los hormigones autocompactantes deben tener de capacidad de relleno, capacidad de paso y resistencia a la segregación. La distribución de los tamaños de partículas de los agregados influye principalmente en las propiedades del hormigón en estado fresco (13). Los finos son los que más influyen en las características de autocompactabilidad del hormigón y mantienen la cohesión de la mezcla, evitando segregaciones y que se arrastren las partículas más gruesas cuando el hormigón se pone en movimiento (14). Estos finos no requieren en general un tamaño de partícula muy pequeño, ya que se utilizan para la complementación del paquete granular y no en reemplazo del cemento. Los hormigones autocompactantes resultan entonces una alternativa, y el AFRM permitiría entonces reducir el consumo de filler calizo habitualmente utilizado en su producción.

En este trabajo utiliza AFRM como fino en reemplazo del filler calizo en un 50 y 100% para la elaboración de hormigones autocompactantes. Las propiedades en estado fresco y endurecido de los hormigones con AFRM se comparan con las de un hormigón de referencia con 100% de filler calizo. El estudio de las propiedades en estado fresco incluye ensayos de tiempo de extendido, diámetro final y tiempo de pasaje en el embudo en V. En estado endurecido se determinaron resistencia a compresión, densidad, absorción de agua, resistividad eléctrica, velocidad de secado, velocidad de succión capilar y penetración de agua a presión.

## **EXPERIENCIAS**

### **Materiales y mezclas**

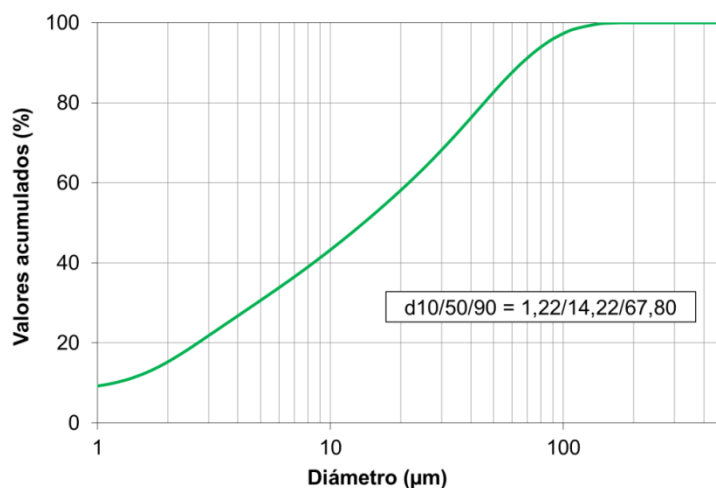
En la elaboración de los hormigones se empleó un cemento Portland fillerizado (CPF40), filler calizo, arena silícea de río como agregado fino y piedra partida granítica (tamaño nominal 6-12) como agregado grueso. El agregado fino reciclado se obtuvo de la fracción que pasó el tamiz de abertura de malla de 4,75 mm, luego de la molienda de un hormigón con nivel de resistencia a la compresión de 30 MPa. Las propiedades determinadas a los agregados empleados se presentan en la Tabla 1. Se empleó también un aditivo superfluidificante de cuarta generación de base policarboxilato.

**Tabla 1:** Propiedades físicas y químicas del agregado fino reciclado.

Propiedades físicas				Propiedades químicas		
Material	Arena	PPG 6-12	AFR	AFR		
Módulo de finura/TMA	1,99	12mm	3,38	CaO (%)	8,97	
Densidad	2,67	2,65	2,60	RI (%)	67,80	
Absorción de agua (%)	0,14	0,40	8,5%	PxC (%)	110°	0,94
Material < 75 µm (%)	0,14	0,55	2,5%		550°	6,34
					950°	10,10

RI: residuo insoluble; PxC: pérdida por calcinación.

A partir del AFR se obtuvo el agregado fino reciclado molido (AFRM), cuya distribución de tamaño de partículas determinada por difracción láser se presenta en la Figura 1. El agregado fino reciclado se secó a 50°C durante 48 horas, a fin de no producir alteraciones en la pasta endurecida presente en los mismos, y luego se lo procesó en un molino rotatorio de laboratorio para cemento de aproximadamente 0,055 m<sup>3</sup>, con una relación de 10 kg de material + 90 kg de cylpebs, durante 3:30 horas.



**Figura 1:** Distribución de tamaño de partículas.

Con los materiales seleccionados se realizaron hormigones autocompactantes: patrón (A0) con filler calizo como adición mineral, y reciclados reemplazando el filler calizo por 50 y 100% de AFRM (A50 y A100). En la Tabla 2 se presentan las proporciones de los materiales para cada hormigón.

**Tabla 2:** Proporciones de los materiales (kg/m<sup>3</sup>).

Materiales	Hormigón		
	A0	A50	A100
Agua	170	168	193
Cemento	330	326	343
Filler calizo	213	106	0
AFRM	0	114	212
Arena	815	810	767
PPG 6-12	810	506	763
Aditivo	2,5	3,2	3,7
a/c	0,52	0,52	0,56

Para determinar la autocompactabilidad de las mezclas, en estado fresco se evaluaron los parámetros de diámetro final (Df) y tiempo de extendido (T50) en el ensayo de extendido, y el tiempo de pasaje (Tv) en el embudo en V.

Con cada hormigón se moldearon probetas cilíndricas y cúbicas para la determinación de distintas propiedades en estado endurecido. Se evaluó la resistencia a compresión a la edad de 28 días sobre probetas cilíndricas de 15cmx30cm (IRAM 1546). Además, se realizó el ensayo de penetración de agua a presión sobre probetas cúbicas de 15cm de lado (IRAM 1554). Este ensayo es exigido por el Reglamento CIRSOC 201:2005 (15) en estructuras donde se requiere una adecuada impermeabilidad y cuya finalidad es la contención de agua, estableciendo limitaciones en las penetraciones medias y máximas de 30mm y 50mm, respectivamente.

También, se determinaron la velocidad y capacidad de succión capilar, según IRAM 1871, sobre probetas cilíndricas de 10cm de diámetro y 5cm de espesor. El Reglamento CIRSOC 201 exige como requisito de durabilidad una velocidad de succión máxima de  $4 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{1/2})$  para estructuras ubicadas en todos los ambientes diferentes del A1. Las mismas muestras sirvieron también para evaluar la velocidad de secado y la resistividad eléctrica en estado saturado por inmersión y por capilaridad. La resistividad se determinó mediante la constatación de la corriente pasando a través de la muestra con un potencial eléctrico de  $12 \pm 0,5 \text{ V CA}$ . Para ello, se dispusieron discos como electrodos a cada lado de las muestras, facilitando el contacto de los electrodos con las superficies mediante paños humedecidos. Finalmente, se determinó la densidad y la absorción de agua en 24h de cada hormigón elaborado.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Estado fresco

Los resultados de tiempo de extendido (T50), diámetro final (Df) y tiempo de pasaje (Tv) en el embudo en V, determinados en los tres hormigones en estado fresco se presentan en la Tabla 3.

**Tabla 3:** Propiedades en estado fresco.

Hormigón	T50 (s)	Df (cm)	Tv (s)
A0	4,06	69,5	7,33
A50	2,90	61,0	5,73
A100	2,43	58,0	4,77

Puede observarse un menor tiempo de fluidez a medida que aumenta el porcentaje de AFRM utilizado, mientras que el diámetro final alcanzado sigue la misma tendencia. El mismo comportamiento fue evidenciado en los tiempos de pasaje del embudo en V. Los resultados muestran una disminución de la viscosidad y cohesión de la muestra con el aumento del contenido de AFRM. La microestructura del AFRM difiere de la del polvo calizo y a la vez es un material más higroscópico debido a su contenido de silicato de calcio hidratado (9). La absorción del AFRM hizo necesario incrementar el contenido unitario de agua para mantener la fluidez de la mezcla, y se incrementó asimismo el contenido de cemento para evitar que la resistencia a compresión se afecte sensiblemente.

## Estado endurecido

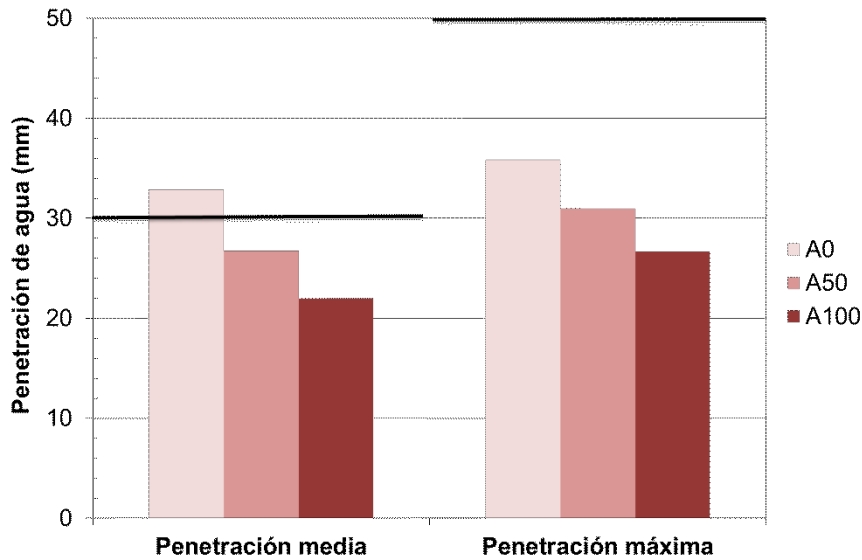
En la Tabla 4 se presentan los resultados de resistencia a compresión, densidad, absorción y resistividad eléctrica de los hormigones en estudio. La resistividad luego de inmersión se midió sobre las muestras saturadas en inmersión, al igual que la absorción total por inmersión. Por su parte, la resistividad luego de succión capilar se midió sobre las muestras una vez que se alcanzó la capacidad de succión capilar, determinándose para ese estado de humedad la absorción parcial por succión capilar (con la observación de que todas las muestras presentaron la cara superior húmeda al finalizar el ensayo de succión capilar). La capacidad de succión capilar involucra una fracción de la porosidad que determina la absorción de agua, por lo que significa un grado de saturación menor determinado por la porosidad capilar, mientras que la saturación involucra a la porosidad total accesible del hormigón.

**Tabla 4:** Resistencia a compresión, densidad, absorción y resistividad de los hormigones en estudio.

Hormigón	Resistencia (MPa)	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	Absorción (%)		Resistividad (kohm-cm)	
			Total, por inmersión	Parcial, por succión capilar	Luego de inmersión	Luego de succión capilar
A0	36,6	2,25	6,5	4,2	8,37	10,15
A50	34,5	2,22	7,0	4,7	6,67	7,63
A100	36,0	2,23	6,9	4,5	6,08	7,71

Puede observarse una mayor absorción en los hormigones con 50% de reemplazo de AFR, en correspondencia con una menor densidad y resistencia. Los resultados indican que no se manifiesta una influencia del contenido de AFRM en las propiedades en estado endurecido. Como hipótesis, podría plantearse que la diferencia se debe simplemente a la variabilidad de los métodos, o a que con el AFRM existe una mejora de la zona de interfaz al mismo tiempo que se incrementa la porosidad de la matriz, por lo que se tiene una estructura más porosa, pero con mayor compatibilidad agregado-matriz que mejora la resistencia. De todas formas, no puede determinarse si las diferencias son estadísticamente significativas y por lo tanto hacen falta estudios complementarios al respecto. El incremento en la resistividad debido al menor grado de saturación por capilaridad respecto a la saturación por inmersión es relativamente bajo. Ello se debe primordialmente a que los hormigones autocompactantes presentan mayor volumen relativo de pasta al de los hormigones convencionales donde la misma relación entre resistividades en general se encuentra en 0,5-0,6.

Respecto a la penetración de agua a presión, los valores medios y máximos obtenidos para los hormigones en estudio se presentan en la Figura 2.



**Figura 2:** Penetraciones media y máxima de agua a presión.

En la Tabla 5 se presentan los valores de capacidad y velocidad de succión capilar y velocidad de secado. En las Figuras 3 y 4 pueden observarse las series de datos y las regresiones correspondientes a partir de las cuales se obtuvieron los valores de velocidad de succión capilar y de secado, los cuales están dados por las pendientes de las respectivas rectas.

El hormigón A50 presenta mayores velocidad y capacidad de succión capilar y velocidad de secado, en correspondencia con la mayor absorción observada. En el hormigón A100, dichos parámetros resultaron equivalentes a los del hormigón A0. Sin embargo, las penetraciones de agua a presión indican otra tendencia, con una clara disminución al incrementarse el contenido de AFRM. En todos los casos, las diferencias son pequeñas, y no podría considerarse como significativa para el número de resultados obtenidos. Por lo que los resultados indican que la influencia del reemplazo de filler calizo por AFRM sobre las propiedades del hormigón endurecido evaluadas no es significativa.

**Tabla 5:** Valores de capacidad y velocidad de succión capilar.

Hormigón	Capacidad de succión capilar (g/cm <sup>2</sup> )	Velocidad de succión capilar (g/(m <sup>2</sup> ·s <sup>1/2</sup> ))	Velocidad de secado (g/(m <sup>2</sup> ·seg <sup>1/2</sup> ))
A0	4506	8,12	3,44
A50	4981	9,44	3,95
A100	4596	7,89	3,74

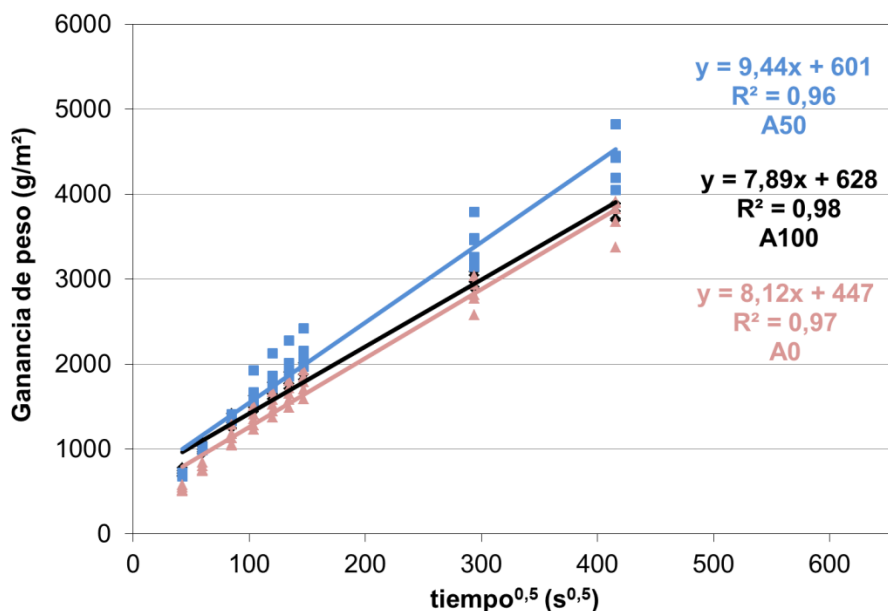


Figura 3: Velocidad de succión capilar.

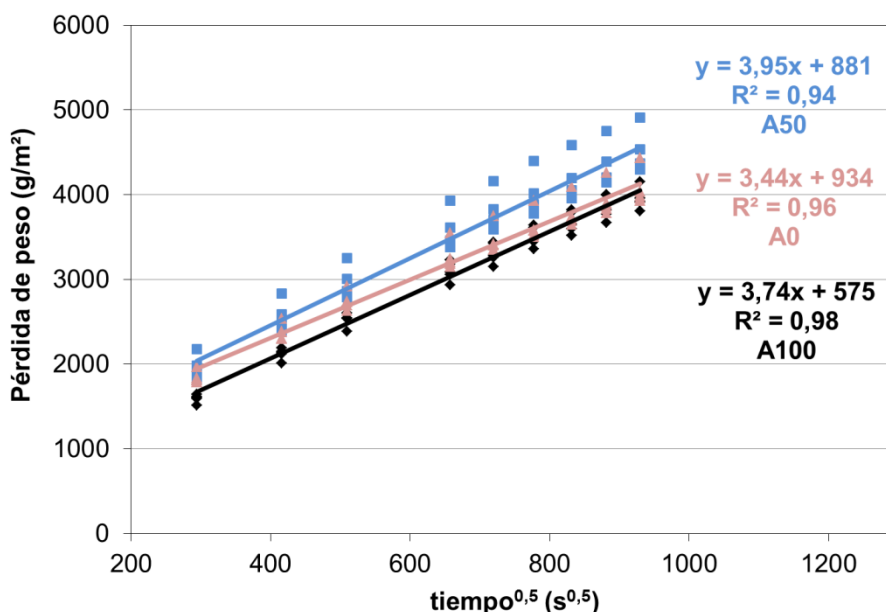


Figura 4: Velocidad de secado.

Debe mencionarse que los resultados de las propiedades de transporte evaluadas no cumplen con los límites establecidos por el Reglamento CIRSOC 201:2005 (15). Ello ocurre a pesar de que los hormigones sí verifican los límites establecidos para la resistencia a compresión mínima para hormigón armado en ambientes A2, A3 y M1. Sin embargo, los hormigones autocompactantes contienen un volumen mayor de pasta que los hormigones convencionales, lo que implica una disminución del contenido de agregado y un aumento de la porosidad del hormigón. Por lo tanto, parece necesario verificar la durabilidad de los hormigones autocompactantes y su relación con los límites prescriptivos del Reglamento CIRSOC 201, debido a las condiciones particulares de composición de este tipo de hormigones.

## CONCLUSIONES

Se realizaron hormigones autocompactantes con finos constituidos por 100% filler calizo, 50% filler calizo + 50% agregado fino reciclado molido (AFRM), y 100% AFRM. En todos los hormigones se mantuvo aproximadamente constante el contenido unitario de cemento. Los resultados de las evaluaciones en estado fresco y endurecido revelan lo siguiente:

- El reemplazo de filler calizo por AFRM aumenta la fluidez del hormigón autocompactante a la vez que disminuye su cohesividad. Ello conduciría a mezclas más segregables, pero aún así se lograron mezclas aptas con 100% de AFRM. Igualmente, parece conveniente continuar los estudios con reemplazos parciales de los finos por AFRM con vistas a mantener niveles de certidumbre aceptables de la autocompactabilidad en la aplicación en obra.
- El AFRM mostró baja influencia sobre las propiedades en estado endurecido que incluyeron resistencia a compresión, penetración de agua a presión, velocidad de secado, velocidad de succión capilar y resistividad eléctrica.

## REFERENCIAS

- (1) Hansen, T.C., Narud, H., "Strength of recycled concrete made from crushed concrete coarse aggregate", *Concrete International*, Vol. 5, N°1, (1983), 79-83.
- (2) Zega C.J., Di Maio A.A., "Influencia de las características de los agregados reciclados en la elaboración de hormigones", 15° Reunión Técnica de la AATH, Santa Fe, (2003). (Ed. en CD)
- (3) Di Maio, A.A., Zega, C.J., Traversa, L.P., "Estimation of Compressive Strength of Recycled Concretes with the Ultrasonic Method", *Journal of ASTM International*, Vol. 2, N° 5, (2005). (Disponible en: [www.astm.org](http://www.astm.org))
- (4) Zega, C.J., Di Maio, A.A., "Efecto del agregado grueso reciclado sobre las propiedades del hormigón", *Boletín Técnico IMME*, Vol. 45, N° 2, (2007), 1-11.
- (5) Zega, C.J., "Propiedades Físico-Mecánicas y Durables de Hormigones Reciclados", Tesis Doctoral, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Nacional de La Plata, (2010).
- (6) Señas, L., Priano, C., "Influencia del uso de agregados reciclados en hormigón autocompactante", 2° Congreso Argentino de Áridos, Tomo I, (2014), 215-224.
- (7) Otsuki, N., Miyazato, S., Yodsudjai, W., "Influence of recycled aggregate on interfacial transition zone, strength, chloride penetration and carbonation of concrete", *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 15, N° 5, (2003), 443-451.
- (8) Gonçalves, A., Esteves, A., Vieira, M., "Influence of recycled concrete aggregates on concrete durability", *International RILEM Conference "The use of recycled materials in building and structures"*, (2004), 554-562.
- (9) Hansen, T.C., "Recycled aggregates and recycled aggregate concrete. Second State-of-the-art. Report developments 1945-1985", *RILEM Technical Committee-37-DRC, Demolition and Recycling of Concrete, Materials and Structures*, Vol. 19, N° 111, (1986), pp. 201-246.
- (10) Zega, C.J., Di Maio, A.A., "Comportamiento de hormigones elaborados con agregado fino reciclado", 16° Reunión Técnica de la AATH, Mendoza, (2006), 47-54.
- (11) Sosa, M.E., Zega, C.J., Di Maio, A.A., "Influence of fine recycled aggregate on compressive strength, static modulus of elasticity and drying shrinkage of concretes", *Conferencia Internacional sobre Hormigón Estructural Sostenible*, La Plata, (2015), 311-319.
- (12) Laurente, R.D., Zega, C.J., Villagrán, Y.A. "Recycled Powder as Filler Admixture in Cementitious Systems: Production and Characterization", 6th Amazon & Pacific Green Materials Congress and Sustainable Construction Materials LAT-RILEM Conference. 2016.
- (13) RILEM Report rep023, "Self-Compacting Concrete - State-of-the-Art Report of RILEM TC 174-SCC", Ed. Å. Skarendahl and Ö. Petersson, (2000), 168p.
- (14) RILEM Report rep035, "Casting of Self Compacting Concrete - Final Report of RILEM TC 188-CSC", Ed. Å. Skarendahl and Peter Billberg, (2006), 26p.
- (15) CIRSOC 201, "Proyecto de Reglamento Argentino de Estructuras de Hormigón", Instituto Nacional de Tecnología Industrial, Argentina, (2005).