

VALORIZACIÓN DEL AGREGADO FINO RECICLADO MOLIDO

María E. Sosa¹ (*), Yury A. Villagrán Zaccardi^{1,2}, Claudio J. Zega^{1,2}, Ángel A. Di Maio^{1,2}

¹ LEMIT, 52 entre 121 y 122, 1900 La Plata, Argentina - hormigones@lemit.gov.ar
tel. +54 221 4831141.

² Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) Argentina.

RESUMEN

El empleo de prácticas amigables con el medioambiente resulta un hecho imprescindible para que la industria del hormigón elaborado en particular, y la de la construcción en general, alcancen un desarrollo sostenible. Estas prácticas se relacionan no solo con la disminución de los desechos generados sino también con la reutilización de los mismos y con la reducción en la explotación de los recursos naturales no renovables. La trituración de hormigones de desecho y su utilización como agregados reciclados en la elaboración de nuevos hormigones, como sustituto de los agregados naturales, es una metodología habitual en diferentes países del mundo. Al emplear el agregado grueso reciclado queda como remanente la fracción fina, cuya disposición y empleo resultan de mayor complejidad debido a las características de este material. En este trabajo se presentan una serie de estudios llevados a cabo en el LEMIT con el fin de evaluar las posibilidades de uso del filler reciclado, constituido por agregado fino reciclado molido (FR), ya sea empleándolo como sustituto del cemento, en cuyo caso se evalúan las posibilidades de que actúe como una adición mineral, o como compensador de finos en hormigones autocompactantes.

INTRODUCCIÓN

El empleo de prácticas ambientalmente amigables resulta necesario e imprescindible a fin de lograr el desarrollo sostenible en la industria del hormigón elaborado. Los importantes volúmenes de hormigón empleados anualmente, sumado a que los agregados representan alrededor del 75% del total de los materiales utilizados en su producción, van en detrimento de las fuentes naturales de materias primas necesarias para la industria del hormigón. Por otra parte, la contaminación producida por los residuos de construcción y demolición al ser depositados en diferentes sitios, origina un fuerte impacto en el medio ambiente. En el caso específico de los hormigones de desecho, los desperdicios generados se depositan en vertederos, muchas veces de forma no controlada, lo cual conduce no sólo a una contaminación paisajística sino también a una importante afectación química del suelo, con la consecuente contaminación de aguas subterráneas, hecho que puede ocasionar consecuencias sobre la salud.

La trituración de hormigones de desecho y su utilización como agregados reciclados en la elaboración de nuevos hormigones, como sustituto parcial o total de los agregados naturales, es una práctica habitual en diferentes países a nivel mundial, muchos de los cuales poseen recomendaciones o normativas que aportan un marco legal a la misma (RILEM, 1994; ACI, 2002). En general, el uso de este material está prácticamente limitado al agregado grueso reciclado (fracción de tamaño mayor a 4,75 mm), cuya utilización conduce a la obtención de hormigones con un adecuado desempeño tanto resistente como durable. En tal sentido, diferentes autores a nivel internacional como también en el ámbito nacional han verificado dicho desempeño al emplear diferentes agregados gruesos reciclados, como reemplazo parcial y/o total del agregado grueso natural, en la producción de hormigones estructurales (Nixon, 1978; Hansen y Narud, 1983; Sri Ravindrarajah y Tam, 1985; Tavakoli y Soroushian, 1996; Limbachiya et al, 2000; Vázquez y Barra, 2002; Di Maio et al, 2002; Otsuki et al, 2003; Sánchez

de Juan y Alaejos Gutiérrez, 2003; Zega et al, 2005; Zerbino et al, 2006; Zega y Di Maio, 2007; Zega, 2010; Zega y Di Maio, 2011a; Zega y Di Maio, 2012; Zega et al, 2014).

Al emplear la fracción gruesa del agregado reciclado, queda como remanente el agregado fino reciclado (AFR) cuya disposición y empleo resultan de mayor complejidad, debido a las características del mismo, especialmente su elevado contenido de polvo y contaminantes que pudiera contener. Las partículas que conforman el AFR, al igual que las del agregado grueso reciclado, presentan en su composición mortero adherido en diferentes proporciones, el cual puede considerarse como la diferencia más significativa entre el AFR y el agregado fino natural. La principal dificultad que encuentra el empleo del AFR en la producción de hormigón está relacionada con el incremento en la demanda de agua. Ello es causado por la elevada capacidad de absorción que poseen en comparación con un agregado fino natural, como consecuencia del mortero adherido que poseen (Hincapié Henao y Aguja López, 2003; Zega et al., 2010; Sosa et al., 2012), a ello debe sumarse la influencia de la forma y textura de sus partículas, las cuales conducen a la obtención de mezclas ásperas. Debido a ello, es esperable que diferentes propiedades del hormigón, tanto en estado fresco como endurecido, se vean modificadas al emplear AFR (Hansen, 1986; Dhir et al., 1999; Masood et al., 2002; de Brito et al., 2005; Zega y Di Maio, 2006; Zega y Di Maio, 2011b; RILEM, 2013). Es por ello que resulta importante encontrar alternativas para el empleo del AFR, con vistas a lograr un reciclado total del hormigón de desecho.

Algunos estudios sugieren la posibilidad de encontrar partículas de cemento anhidro en la fracción de AFR menor a los 2 mm, las cuales podrían aportar un remanente de productos de hidratación de C-S-H (Katz, 2003; Khatib, 2005; Khoshkenari et al., 2014). Al respecto, se pudo constatar que capas de materiales sueltos realizadas con agregados de hormigón triturado (sin el adición de material ligante) mostraron mayor rigidez que capas similares de agregados naturales de trituración, elaboradas bajo idénticas condiciones, observando un aumento de la rigidez con la edad a la cual fueron evaluadas (Arm, 2001). Poon et al (2006) observaron la presencia de C_2S en la composición de las partículas de AFR de tamaños menores a 75 μm , lo cual puede ser la causa de las propiedades cementantes antes mencionadas. A pesar de que este componente no fue hallado en las fracciones comprendidas entre 0,30 y 0,60 mm, las mismas mostraron igualmente capacidad cementante.

A partir de lo indicado, resulta evidente que el uso del AFR constituye una práctica que requiere aún de mayor cantidad de estudios en el futuro próximo (Zega et al, 2010; Letelier et al, 2015a; Letelier et al, 2015b). Estudios preliminares sobre el uso de AFR como adición mineral han indicado una afectación de las propiedades de morteros y hormigones, tanto en el estado fresco como endurecido (Letelier et al, 2015a).

Respecto a las prácticas amigables con el medioambiente, la industria del cemento genera 5% de la emisión de CO_2 a nivel global. Además, durante la producción del clínker se expulsan otros contaminantes como partículas de polvo, monóxido de carbono, óxido de nitrógeno, dióxido de azufre, cloruro, fluoruro y metales pesados. Con el fin de reducir las emisiones de CO_2 se han tomado varias medidas, siendo una de las más eficaces la incorporación de materiales cementicios suplementarios (adiciones) en la producción del cemento portland, reduciendo así la proporción de clínker. De este modo se reducen las emisiones de CO_2 en la producción de cemento a la vez que se logra disponer y dar valor agregado a dichas adiciones, las cuales son en su mayoría sub-productos industriales.

A partir de lo indicado anteriormente y tomando en consideración la necesidad de establecer prácticas o metodologías que resulten amigables en pos del cuidado del ambiente, con miras a favorecer un desarrollo sustentable de la industria del hormigón, surge la posibilidad de emplear el agregado fino reciclado (AFR) resultante de la trituración de los hormigones de desecho, a partir de su molienda a tamaño polvo. Este nuevo material, que denominaremos filler reciclado (FR), podría ser utilizado como reemplazo parcial del cemento (Oksri-Nelfia et al,

2015), tal cual una adición mineral, o bien como compensador de finos en hormigones que requieran de elevada cohesividad.

EXPERIENCIAS

Para llevar adelante estas experiencias se plantearon tres etapas en función de los antecedentes hallados en la literatura. Primero se estudió su capacidad cementante. Considerando los beneficios que trae aparejado la inclusión de las adiciones minerales en la producción y empleo del cemento, resulta muy promisorio el uso de agregado fino reciclado molido, denominado filler reciclado (FR), como reemplazo del cemento. De este modo, sería posible reducir el uso de cemento a partir de su reemplazo por FR, para lo cual habrá que considerar también un progreso en el ahorro de energía que pueda obtenerse a partir del uso conveniente del FR.

En principio, el FR actuaría como un filler inerte, por lo que fue necesario estudiar su efecto sobre la hidratación del cemento, para lo cual el nivel de finura resulta decisivo (Lawrence et al, 2003). Las partículas finas facilitan la hidratación a partir de la generación de puntos de nucleación, proporcionando espacio adicional para el crecimiento de los productos de hidratación del cemento en su superficie, acelerando la hidratación temprana del cemento y por lo tanto el desarrollo de resistencia (Lohtia y Ramesh, 1995, Lawrence et al, 2003; Arvaniti et al, 2015). Por otro lado, la distribución del tamaño de partículas de los materiales cementicios puede tener un impacto importante en la demanda de agua de las mezclas. Una mayor finura del ligante incrementará la cantidad de agua requerida para alcanzar una determinada trabajabilidad, lo cual redundará en modificaciones de la resistencia y la durabilidad. Sin embargo, una mejora en la distribución del tamaño de partículas puede aumentar la densidad de empaquetamiento y consecuentemente reducir la demanda de agua. En este sentido, la inclusión de partículas más finas que las del cemento mejorará el desempeño del ligante frente a la exudación, tiempo de fraguado, evolución de temperatura, resistencia y durabilidad (Swamy 1998).

Otra posibilidad es emplear el FR como adición para la compensación del contenido de finos en hormigones que requieren alta cohesividad. Los hormigones autocompactantes deben tener 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 (RILEM, 2000). 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 (RILEM, 2006). 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 FR permitiría por lo tanto reducir el consumo de filler calizo habitualmente utilizado en su producción.

Para los estudios propuestos se seleccionó un agregado fino reciclado (AFR) obtenido a partir de la trituración y posterior tamizado (pasa tamiz 4,75 mm) de un hormigón de 35 MPa de resistencia media a compresión, elaborado con agregado grueso natural granítico. En la Tabla 1 se presentan las propiedades físicas y químicas determinadas al AFR.

A partir de dicho AFR se obtuvieron los distintos filler reciclados que luego fueron empleados en cada una de las etapas antes mencionadas. Para ello se empleó un molino de bolas (de aproximadamente 0,055m³ de capacidad total). A continuación se desarrollan las experiencias realizadas a fin de dar cumplimiento a los objetivos planteados para cada etapa.

Tabla 1: Propiedades físicas y químicas del AFR

Propiedades físicas		Propiedades químicas		
Densidad (g/cm ³)	2,60	CaO (%)	8,97	
Absorción (%)	8,5	RI (%)	67,80	
Material < 75 μm (%)	2,5	PxC (%)	110°	0,94
			550°	6,34
			950°	10,10

RI: residuo insoluble; PxC: Pérdida por calcinación

ESTUDIO DE LA CAPACIDAD CEMENTANTE DEL FINO RECICLADO MOLIDO

En una primera etapa se buscó evaluar la capacidad cementante que puede presentar el filler reciclado (FR), considerando para ello las partículas más finas (< 600 μm) que componen el agregado fino reciclado. Para ello, se obtuvieron dos fillers reciclados. El primero correspondiente al pasante por el tamiz de 75 μm (denominado FR75), sin ningún tipo de procesamiento. El segundo filler reciclado estuvo compuesto por el agregado fino reciclado molido en el molino de bolas mencionado anteriormente, el cual fue llevado a tamaño filler menor a 600 μm (denominado FR600). La distribución granulométrica de cada filler y del cemento utilizado se presentan en la Figura 1.

En la Tabla 2 se presentan la densidad y la finura Blaine determinadas a los fillers reciclados FR75 y FR600, junto con la del cemento portland normal (CPN) utilizado como referencia, el cual fue de clase resistente CP40. Se realizó además un análisis de DRX de los fillers reciclados (FR75 y FR600) en donde pudieron identificarse componentes como el cuarzo (Q) y el feldespato (F), los cuales corresponden al agregado natural original, y componentes como calcita (C) y portlandita (CH), pertenecientes al mortero adherido. En particular, no se pudieron identificar picos relacionados con la presencia de partículas de cemento anhidro (C₂S).

Tabla 2: Propiedades físicas de los fillers reciclados FR75 y FR600, y del cemento

Materiales	Densidad (g/cm ³)	Finura Blaine (m ² /kg)
FR75	2,60	270
FR600	2,70	11400
CPN	3,10	320

Se elaboraron morteros con ambos fillers reciclados (M75 y M600) y con el CPN, el cual sirvió como referencia (MN), a fin de determinar el índice de actividad puzolánica (I_p) (IRAM 1654, partes 1 y 2). Este método compara la resistencia a compresión alcanzada por un mortero conteniendo el material a estudiar respecto a la obtenida en un mortero de referencia elaborado con cemento portland normal. El resultado se considera positivo cuando, a la edad de 28 días, la resistencia a compresión del mortero en estudio es mayor o igual al 75% de la resistencia del mortero de referencia (ASTM C 618-03). En la Tabla 3 se presentan las proporciones de los morteros elaborados.

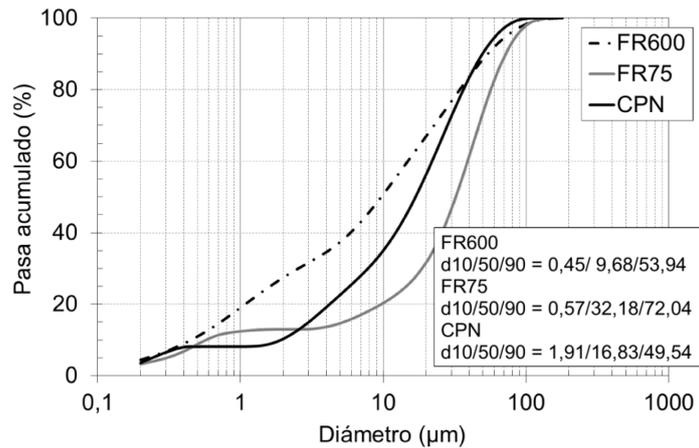


Figura 1: Distribución de tamaño de partículas de los fillers reciclado y del CPN

Tabla 3: Proporciones de las mezclas (g)

Materiales	MN	M75	M600
Agua	225	225	225
Cemento	500	325	325
FR75	---	146	---
FR600	---	---	152
Arena	1500	1500	1500

Las mezclas fueron caracterizadas en estado fresco mediante la determinación del extendido en la mesa de caída libre (ASTM C1437) y del peso unitario, mientras que en estado endurecido se evaluaron la densidad, absorción de agua por inmersión, resistencias a flexión y compresión, a las edades de 28 y 90 días, y posteriormente se realizó un análisis petrográfico mediante microscopio óptico sobre cortes obtenidos de cada mortero elaborado.

En la Tabla 4 se presentan las propiedades evaluadas a los morteros en estado fresco. Las mezclas M75 y M600 presentaron un extendido 50% y 9% menor que el mortero de referencia (MN), respectivamente. En el caso del M600, el valor similar de extendido con relación al mortero MN puede asociarse con un efecto de dilución debido al tamaño de las partículas del FR600 (ver Figura 1), impidiendo la floculación de las partículas de cemento.

Tabla 4: Propiedades en estado fresco

Mortero	Extendido (%)	Peso unitario (Kg/m ³)
MN	69	2430
M75	35	2370
M600	63	2455

Los valores de densidad y absorción correspondiente a cada mortero en estado endurecido se presentan en la Tabla 5, donde cada valor informado corresponde al promedio de 3 determinaciones. Las densidades fueron similares en todos los morteros estudiados, mientras que las absorciones fueron aproximadamente 17% mayor en los morteros elaborados con ambos FRs. Esto puede atribuirse a la mayor porosidad de la matriz de los M75 y M600 como consecuencia de un menor contenido de cemento y por lo tanto menor cantidad de productos de hidratación.

Tabla 5: Densidad y absorción de los morteros

Mortero	Densidad (g/cm ³)	Absorción (%)
MN	2,26	8,3
M75	2,23	9,8
M600	2,23	9,6

En la Tabla 6 se presentan las resistencias a flexión y compresión, junto con los valores del índice I_p , determinados en todos los casos a las edades de 28 y 90 días. El I_p mostró valores por debajo del 75%, para ambos filler reciclado, por lo que se considera que la adición en estudio no contribuye a la ganancia de resistencia. Sin embargo, el incremento en la resistencia a compresión a 90 días de los morteros M75 y M600 fue de aproximadamente 12% en ambos casos, mientras que en el mortero de referencia MN la misma fue del 3,6%. Similar comportamiento fue observado para la resistencia a flexión, con incrementos del 15, 35 y 10% para los M75, M600 y MN, respectivamente. Estos incrementos de resistencia estarían indicando una posible contribución cementante del filler reciclado.

Tabla 6: Resistencias a flexión y compresión e índice de actividad puzolánica

Mortero	Resistencia a flexión (MPa)		Resistencia a compresión (MPa)		Índice de actividad puzolánica (%)	
	28 días	90 días	28 días	90 días	28 días	90 días
MN	6,3	6,9	49,8	51,6	100	100
M75	4,0	4,6	27,6	30,9	55	60
M600	4,3	5,8	31,8	35,8	65	69

Por otra parte, en términos de sostenibilidad resulta interesante analizar la resistencia en función del contenido de cemento utilizado en cada mezcla. En la Figura 2 se presenta la eficiencia del cemento a partir de determinar la relación entre la resistencia y el contenido unitario de cemento de las pastas (calculando el volumen de las pastas a partir de la densidad de los materiales, y asumiendo que no se producen cambios en el contenido de aire incorporado con el porcentaje de reemplazo). Se observa una levemente menor eficiencia cementicia para el mortero M75 a ambas edades, relacionado con la menor finura que presentó el FR75, mientras que para el mortero M600 se produce una mejora en la eficiencia del uso del cemento, principalmente a la edad de 90 días.

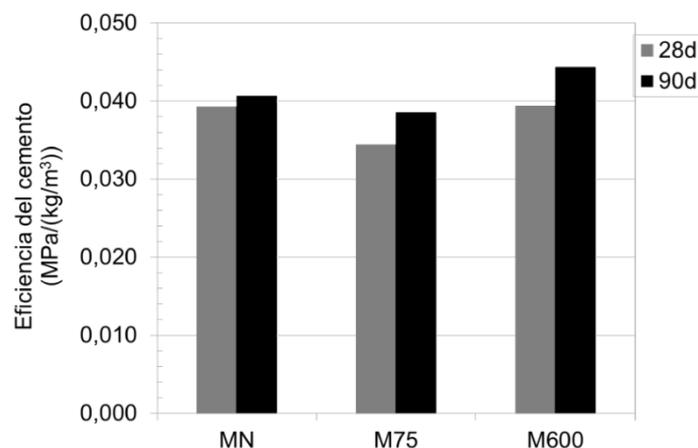


Figura 2: Eficiencia del cemento basado en la resistencia a compresión, para los filler reciclado FR75 y FR600

De los resultados obtenidos en esta primera etapa, los cuales fueron promisorios respecto a la posible contribución del filler reciclado en estudio a la ganancia de resistencia, surgió la necesidad de estudiar otras variables que pudieran afectar su desempeño con el objetivo de analizar las posibilidades de emplear el agregado fino reciclado como una adición mineral en reemplazo del cemento portland, lo cual dio lugar a la segunda etapa.

FILLER RECICLADO COMO ADICIÓN MINERAL

Entre los objetivos particulares de esta segunda etapa se planteó la necesidad de estudiar la influencia de la finura del material sobre las propiedades de pastas y morteros. Posteriormente, a fin de generar el filler reciclado (FR), la molienda se realizó empleando una relación de 10 kg del agregado seco junto con 90 kg de cyprebs. Se tomaron muestras del material luego de 2:00, 2:45 y 3:30 horas de molienda, identificando al material como FR2:00, FR2:45 y FR3:30, respectivamente. Este procedimiento se realizó empleando el mismo molino de bolas utilizado en la etapa anterior.

Sobre cada filler reciclado obtenido se realizaron determinaciones de densidad, contenido de material retenido en los tamices de 45 y 75 μm de abertura de malla, distribución del tamaño de partículas, superficie específica por permeametría Blaine. Adicionalmente, se evaluó la resistencia a compresión a las edades de 2, 7 y 28 días en morteros de relación agua/cemento 0,50, siguiendo los lineamientos de la norma ASTM C349.

De los resultados obtenidos del material retenido en los tamices 45 y 75 μm , como así también de la densidad y absorción surge que no existen variaciones significativas en función del tiempo de molienda. No obstante, de la distribución del tamaño de partículas se evidencia que un aumento en el tiempo de molienda es útil solo para las partículas gruesas. Debido a ello, el extendido en el tiempo de molienda produjo pequeños cambios en la finura del material, viéndose afectadas una pequeña porción de las partículas más gruesas, lo que conduce a una reducida mejora del potencial efecto filler. A raíz de estos resultados, parecería más lógico reducir los tiempos de molienda y utilizar la adición con un costo de procesamiento eficiente, a pesar de que una pequeña porción de la misma sea demasiado gruesa para actuar como adición mineral y causar un efecto filler. De los resultados alcanzados, el período de molienda más corto entre los estudiados parece ser el más conveniente, recomendándose estudios futuros que contemplen períodos de molienda aún más cortos para el ahorro de energía.

Respecto a la demanda de agua para la pasta de consistencia normal, los resultados correspondientes a una pasta de referencia elaborada con el cemento normal (PN) y a pastas elaboradas con 15 y 30% de reemplazo del cemento por cada filler reciclado (PFR2:00, PFR2:45 y PFR3:30), se presentan en la Tabla 7.

Tabla 7: Demanda de agua para pastas de consistencia normal

Pastas	Reemplazo (%)	Demanda de agua (%)
PN	0	27,0
PFR2:00	15	26,7
	30	26,7
PFR2:45	15	26,7
	30	26,7
PFR3:30	15	26,8
	30	26,8

Se puede observar que la demanda de agua es prácticamente la misma para todas las pastas evaluadas. Por un lado, el FR causa un efecto de dilución del cemento, y la demanda de agua debería disminuir, pero el FR posee al mismo tiempo una gran afinidad con el agua, lo cual parece compensar el efecto de dilución. Se debe mencionar que el método utilizado para evaluar la demanda de agua se basa en la resistencia a la penetración en una mezcla fresca, el cual es indicativo de los parámetros reológicos de la mezcla, pero no necesariamente de la trabajabilidad de la misma. Debido a ello, es necesario realizar nuevos estudios sobre el hormigón en estado fresco a fin de determinar si la trabajabilidad es afectada por el FR.

La resistencia a compresión de los morteros elaborados con 15 y 30% de los FR en estudio y del mortero de referencia elaborado con el cemento portland normal (CPN), evaluada a las edades de 2, 7 y 28 días, se presenta en la Figura 3, donde cada valor corresponde al promedio de tres determinaciones. Se puede observar que a la edad de 2 días, los morteros elaborados con 15 y 30% de FR presentan resistencias del orden de 13 y 36% menores que el mortero de referencia, respectivamente.

A la edad de 28 días, dichas disminuciones de resistencia fueron del 9 y 33% para los morteros con 15 y 30% de reemplazo. Esto permite inferir que la influencia del contenido de reemplazo sobre la resistencia está asociada a un efecto de dilución; sin embargo, no se observó influencia alguna del tiempo de molienda. A partir de estos resultados, y considerando una producción rentable, el mejor desempeño entre las mezclas de cemento+FR estudiadas fue obtenido para 2:00 horas de molienda y 15% de reemplazo.

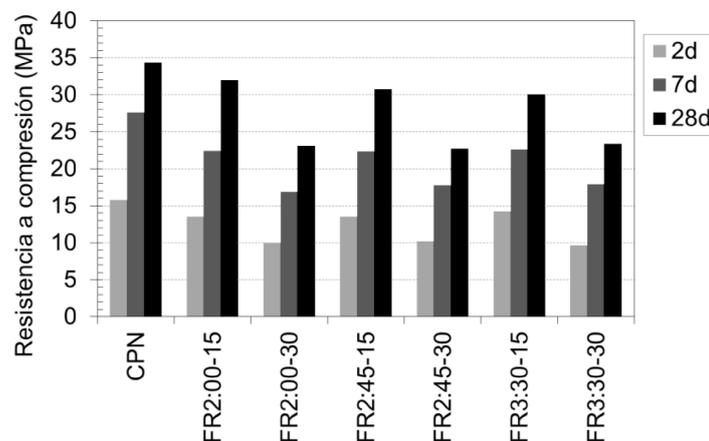


Figura 3: Resistencia a compresión de morteros con FR obtenidos a distintos tiempos de molienda

Si se determina la eficiencia del cemento como la resistencia dividido el contenido unitario de cemento de las pastas de igual manera que en la primera etapa, se observa una pequeña a nula influencia del contenido de FR utilizado (Figura 4). Para los morteros con 15% de reemplazo se observa un ligero efecto filler, independientemente de la finura del FR, pero para los morteros con 30% de reemplazo no se observaron mejoras en comparación con el mortero con CPN. Sin embargo, el grado de hidratación del cemento no pudo ser completamente comprobado mediante la resistencia, siendo necesario realizar estudios adicionales a fin de alcanzar resultados concluyentes en este aspecto. De todos modos, la utilización de un 15% de FR en reemplazo del cemento parece más conveniente que el 30% a los fines prácticos de aplicación en hormigones. Estos resultados son consistentes con los de la primera etapa, en la que no se pudo apreciar una diferencia significativa entre FR75 y FR600. Ello conduce a definir

tiempos de molienda lo más cortos posible, en virtud del limitado beneficio que puede obtenerse con la extensión del mismo (al menos luego de las 2 horas iniciales).

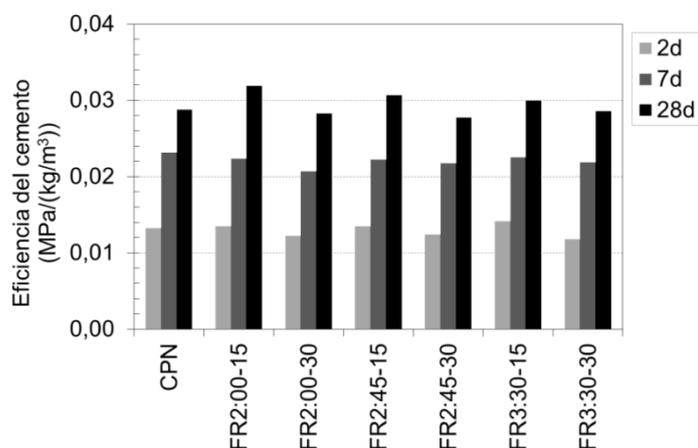


Figura 4: Eficiencia del cemento respecto a la resistencia a compresión de morteros

A partir de estos resultados preliminares alcanzados en la segunda etapa, el FR estudiado parece tener limitadas aptitudes para ser utilizado como un material cementiceo suplementario, debido a que su principal efecto parece ser el de dilución del cemento. Se propone entonces utilizarlo en aplicaciones como relleno para obtener sistemas bien graduados. Esto permitiría un menor consumo de energía para la molienda de agregado fino reciclado a un grado más grueso con posibilidades de aplicaciones para la producción de hormigón autocompactante (HAC). En este caso, la sustitución del cemento no se logra, pero los beneficios ambientales siguen siendo posibles con la sustitución del filler de piedra caliza (de recursos no renovables) y la disposición final del agregado reciclado. De este modo surge la tercera etapa de estos estudios.

FILLER RECICLADO COMO FINO EN HAC

En esta tercera etapa se estudió el empleo del filler reciclado en hormigones autocompactantes, en reemplazo del filler calizo habitualmente utilizado en estos hormigones como finos complementarios al cemento. Para ello, se utilizó el filler reciclado correspondiente al tiempo de molienda de 2:45h. Adicionalmente, en la elaboración de los hormigones se empleó un cemento Portland fillerizado (CPF40), filler calizo y un aditivo superfluidificante de cuarta generación de base policarboxilato. Como agregados, fino y grueso, se emplearon una arena silíceo de río y una piedra partida granítica (PPG) de tamaño nominal 6-12 mm, cuyas propiedades se presentan en la Tabla 8.

Tabla 8: Propiedades físicas de los agregados

Propiedades	Arena	PPG 6-12
Módulo de finura/TMA (mm)	1,99	12
Densidad (g/cm ³)	2,67	2,65
Absorción de agua (%)	0,14	0,40
Material < 75 µm (%)	0,14	0,55

Con los materiales seleccionados se elaboró un hormigón autocompactante de referencia (HAC0), en el cual se utilizó el filler calizo como adición mineral, y hormigones autocompactantes reciclados reemplazando el filler calizo por 50 y 100% de FR (HAC50 y HAC100). En la Tabla 9 se presentan las proporciones de los materiales para cada hormigón.

Tabla 9: Proporciones de los materiales (kg/m³) para los HAC

Materiales	Hormigón		
	HAC0	HAC50	HAC100
Agua	170	168	193
Cemento	330	326	343
Filler calizo	213	106	0
Filler reciclado	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

La caracterización de las mezclas autocompactantes en estado fresco se realizó mediante la evaluación de los parámetros de diámetro final (D_f) y tiempo de extendido (T_{50}), ambos en el ensayo de extendido, y el tiempo de pasaje en el embudo en V (T_v).

En estado endurecido se evaluó la resistencia a compresión a la edad de 28 días sobre probetas cilíndricas de 15x30 cm (IRAM 1546). Además, con el fin de evaluar el desempeño durable de los hormigones, se realizaron los ensayos de penetración de agua a presión sobre probetas cúbicas de 15 cm de lado (IRAM 1554) y el de absorción capilar sobre probetas cilíndricas de 10 cm de diámetro y 5 cm de espesor (IRAM 1871), del cual se obtienen los parámetros de velocidad y capacidad de absorción capilar.

Cabe señalar que ambos ensayos están especificados en el Reglamento Argentino de Estructuras de Hormigón Armado (CIRSOC 201:2005) como requisito de durabilidad que deben satisfacer los hormigones destinados a estructuras que requieran una adecuada impermeabilidad. En el caso de la penetración de agua a presión, se establecen limitaciones en las penetraciones medias y máximas de 30mm y 50mm, respectivamente. En el caso de absorción capilar, dicho reglamento exige como requisito de durabilidad una velocidad de absorción máxima de $4 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{1/2})$ para las estructuras ubicadas en todos los ambientes diferentes del A1.

Las mismas muestras empleadas para la determinación de la velocidad de absorción capilar fueron empleadas para evaluar la velocidad de secado y la resistividad eléctrica, para la cual se consideró el 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 interpuestos y la sujeción a presión con un sargento. Finalmente, se determinó la densidad y la absorción de agua en 24h de cada hormigón elaborado. Los resultados de tiempo de extendido (T_{50}), diámetro final (D_f) y tiempo de pasaje en el embudo en V (T_v), determinados en los tres hormigones en estado fresco se presentan en la Tabla 10.

Se observan menores tiempos de extendido y de pasaje en el embudo en V, y una disminución en el diámetro final alcanzado conforme aumenta el porcentaje de filler reciclado utilizado, lo

cual evidencia una disminución de la viscosidad y de la cohesión de las mezclas con el aumento del contenido de FR. La microestructura del FR difiere de la del filler calizo, a la vez que es un material más higroscópico debido a su contenido de silicato de calcio hidratado (Hansen, 1986). La absorción del FR hizo necesario incrementar el contenido unitario de agua en el HAC100, a fin de mantener la fluidez de la mezcla, y se incrementó asimismo el contenido de cemento para evitar que la resistencia a compresión se afecte sensiblemente.

Tabla 10: Propiedades en estado fresco

Hormigón	T ₅₀ (s)	D _f (cm)	T _v (s)
HAC0	4,06	69,5	7,33
HAC50	2,90	61,0	5,73
HAC100	2,43	58,0	4,77

En la Tabla 11 se presentan los resultados de resistencia a compresión, densidad, absorción y resistividad eléctrica de los hormigones en estudio. La resistividad luego de inmersión y la absorción total por inmersión se midieron sobre las muestras saturadas una vez alcanzada la saturación. 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 11: Resistencia a compresión, densidad, absorción y resistividad de los HAC con distintos contenidos de filler reciclado

Hormigón	Resistencia (MPa)	Densidad (g/cm ³)	Absorción (%)		Resistividad (kohm·cm)	
			Total, por inmersión	Parcial, por succión capilar	Luego de inmersión	Luego de succión capilar
HAC0	36,6	2,25	6,5	4,2	8,37	10,15
HAC50	34,5	2,22	7,0	4,7	6,67	7,63
HAC100	36,0	2,23	6,9	4,5	6,08	7,71

Se puede observar que no se manifiesta una influencia definida del contenido de FR en las propiedades en estado endurecido. Como explicación, podría plantearse que la diferencia se debe simplemente a la variabilidad de los métodos, o a que con el FR 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.

En el caso de la resistividad, el incremento 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 que los hormigones convencionales, donde la misma relación entre resistividades se encuentra en el orden de 0,5-0,6.

En la Figura 5 se presentan los valores medios y máximos de penetración de agua a presión obtenidos para los hormigones en estudio, donde cada valor corresponde al promedio de tres probetas.

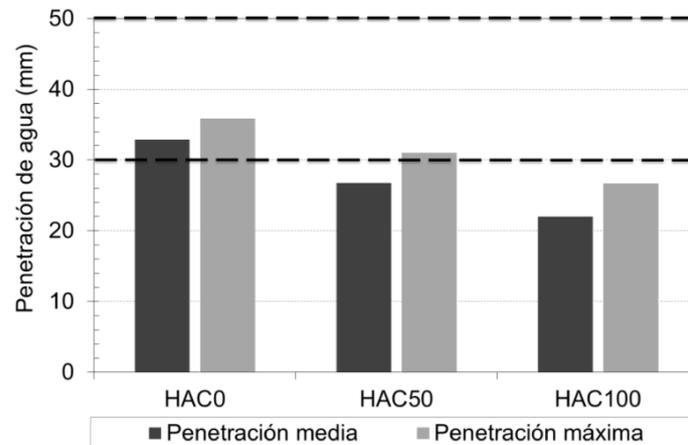


Figura 5: Penetraciones media y máxima de agua a presión

En la Tabla 12 se presentan los valores de capacidad y velocidad de succión capilar, junto con los de velocidad de secado.

Tabla 12: Capacidad y velocidad de succión capilar, y velocidad de secado de los HAC con distintos contenidos de filler reciclado

Hormigón	Capacidad de succión capilar (g/cm ²)	Velocidad de succión capilar (g/(m ² ·s ^{1/2}))	Velocidad de secado (g/(m ² ·seg ^{1/2}))
HAC0	4506	8,12	3,44
HAC50	4981	9,44	3,95
HAC100	4596	7,89	3,74

El hormigón HAC50 presentó mayor velocidad y capacidad de succión capilar y velocidad de secado, en correspondencia con la mayor absorción observada. En el hormigón HAC100 dichos parámetros resultaron equivalentes a los del hormigón HAC0. Sin embargo, las penetraciones de agua a presión indican otra tendencia, con una clara disminución al incrementarse el contenido de FR. Los resultados indican que la influencia del reemplazo de filler calizo por FR sobre las propiedades del hormigón endurecido evaluadas no es significativa.

CONCLUSIONES

Estos estudios fueron realizados con el objetivo de evaluar distintas alternativas para el empleo de las fracciones más finas del agregado reciclado, llevándolas previamente a tamaño polvo, denominándola así como filler reciclado (FR). Se consideró su empleo como adición mineral en reemplazo de distintos contenidos de cemento portland, o bien como material compensador del contenido de finos en hormigones autocompactantes.

A partir de los estudios realizados tendientes a identificar alguna capacidad de reacción del FR, surgen las siguientes consideraciones finales:

- Los filler reciclado definidos como FR600 y FR75 no mostraron evidencia de contener partículas de cemento anhidro, tanto en el análisis por DRX como a partir del índice de actividad puzolánica. Sin embargo, se evidenció un mayor incremento de la resistencia a 90 días en los morteros elaborados con ambos FR, hecho que hace suponer cierta reacción cementante por parte del material reciclado.
- Las absorciones de los morteros con filler reciclado fueron del orden de 17% mayores que la del mortero de referencia, atribuido a la porosidad del mortero presente en el material reciclado y verificado a partir del análisis petrográfico.

De las evaluaciones realizadas con el fin de determinar la influencia del tiempo de molienda y el contenido de FR empleados, surge que:

- El empleo de FR en 15 y 30% de reemplazo del cemento no modificó la demanda de agua de las pastas de consistencia normal. Incrementos en el tiempo de molienda para aumentar la finura del FR tampoco produjeron modificaciones en la demanda de agua.
- Para el material estudiado, los resultados más promisorios respecto a las posibilidades de empleo del FR se obtuvieron para un tiempo de molienda de 2:00 horas, ya que al aumentar el tiempo de procesamiento se logró mejorar la finura de las fracciones más gruesas, pero sin modificaciones importantes en las granulometrías.
- El empleo de 15% de FR resultó más beneficioso que el empleo del 30%, produciéndose para este último porcentaje un efecto excesivo de dilución y por ende una disminución en la resistencia de los morteros.

En cuanto a las evaluaciones realizadas empleando el FR como sustituto de 50 y 100% del filler calizo en hormigones autocompactantes, surge que:

- El empleo de filler reciclado aumentó la fluidez del hormigón autocompactante a la vez que disminuyó su cohesividad. Ello conduciría a mezclas más fácilmente segregables, pero aun así se lograron mezclas aptas con hasta 100% de FR.
- El FR en los porcentajes empleados mostró escasa influencia sobre las propiedades en estado endurecido de los hormigones autocompactantes evaluados, incluyendo resistencia a compresión, penetración de agua a presión, velocidad de secado, velocidad de succión capilar y resistividad eléctrica.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la valiosa contribución de R. Laurente, N. Alderete, A. Lamnek, G. Coelho Dos Santos y D. Benito en la ejecución de algunos de los ensayos presentados en este trabajo.

REFERENCIAS

- ACI Committee 555R-01 (2002). "Removal and reuse of hardened concrete". *Materials Journal*, N° 99-M31, pp. 300-323.
- Arm, M. (2001). "Self-Cementing properties of crushed demolished concrete in unbound layers: results from triaxial test and field test". *Waste Management*, Vol. 21, pp. 235-239.
- Arvaniti, E.C., Juenger, M.C.G., Bernal, S.A., Duchesne, J., Courard, L., Leroy, S., Provis, J.L., Klemm, A., De Belie, N. (2015). "Characterization of particle size, surface area, and shape of supplementary cementitious materials". *Materials and Structures*, Vol. 48, N° 11, pp. 3687-3701.
- de Brito, J., Pereira, A.S., Correia, J.R. (2005). "Mechanical behaviour of non-structural concrete made with recycled ceramic aggregates". *Cement and Concrete Composites*, Vol. 27, N° 4, pp. 429-433.

Dhir, R.K., Limbachiya, M.C., Leelawat, T. (1999). "Suitability of recycled concrete aggregate for use in BS 5328 designated mixes". *Proceedings of the ICE - Structures and Buildings*, Vol. 134, Nº 3, pp. 257-274.

Di Maio, A., Giaccio, G., Zerbino, R. (2002). "Hormigones con agregados reciclados". *Ciencia y Tecnología del Hormigón*, LEMIT, Nº 9, pp. 5-10.

Hansen, T.C. (1986). "Recycled aggregate and recycled aggregate concrete. Second state-of-the-art. Report developments". *Materials and Structures*, Vol. 19, Nº 3, pp. 1845-1985.

Hansen, T.C., Narud, H. (1983). "Strength of recycled concrete made from crushed concrete coarse aggregate". *Concrete International*, Vol. 5, Nº1, 79-83.

Hincapié Henao, A.M., Aguja López, E.A. (2003). "Agregado reciclado para morteros". *Revista Universidad Eafit*. Vol. 132, Nº 39, pp. 76-89.

Katz, A. (2003). "Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete". *Cement and Concrete Research*, Vol. 33, pp. 703-711.

Khatib, J.M. (2005). "Properties of concrete incorporating fine recycled aggregate". *Cement and Concrete Research*, Vol. 35, Nº 4, pp. 763-769.

Khoshkenari, A.G., Shafigh, P., Moghimi, M., Mahmud, H.B. (2014). "The role of 0-2 mm fine recycled concrete aggregate on the compressive and splitting tensile strengths of recycled concrete aggregate concrete". *Materials and Design*, Vol. 64, pp. 345-354.

Lawrence, P., Cyr, M., Ringot, R. (2003). "Mineral admixtures in mortars. Effect of inert materials on short-term hydration". *Cement and Concrete Research*, Vol. 33, pp. 1939-1947.

Letelier, V., Tarela, E., Osses, R., Cardenas, J.P., Moriconi, G. (2015a). "Mechanical properties of concrete with recycled aggregates and waste glass". En: *Proceedings III Progress of Recycling in the Built Environment*, I. Martins, C. Ulsen and S.C. Ângulo Eds, RILEM Publications SARL. 3-5 de agosto de 2015, Sao Paulo, Brazil.

Letelier, V., Tarela, E., Osses, R., Cardenas, J.P., Moriconi, G. (2015b). "Influence of the use of recycled precast debris in the mechanical properties of concrete". En: *Proceedings III Progress of Recycling in the Built Environment*, I. Martins, C. Ulsen and S.C. Ângulo Eds, RILEM Publications SARL., 3-5 de agosto de 2015, Sao Paulo, Brazil.

Limbachiya, M.C., Leelawat, T., Dhir, R.K. (2000). "Use of recycled concrete aggregate in high-strength concrete". *Materials and Structures*, Vol. 33, Nº 233, pp. 574-580.

Lohtia, R.P., Ramesh, C.J. (1995). "Mineral admixtures". En: *Concrete admixtures handbook, Properties, science and technology*. Second edition. Ed. Ramachandran, V.S., New Jersey, USA, Noyes publications.

Masood, A., Ahmad, T., Arif, M., Mahdi, F. (2002). "Waste management strategies for concrete". *Environmental Engineering and Policy*, Vol. 3, pp. 15-18.

Nixon, P.J. (1978). "Recycled concrete as an aggregate for concrete – A review". *Matériaux et Constructions*, Vol. 11, Nº 65, pp. 371-378.

Oksri-Nelfia, L., Mahieux, P-Y., Amiri, O., Turcry, Ph., Lux, J. (2015). "Reuse of recycled crushed concrete fines as mineral addition in cementitious materials". *Materials and Structures*, Vol. 49, Nº 8, pp. 3239-3251.

Otsuki, N., Miyazato, S., Yodsudjai, W. (2003). "Influence of recycled aggregate on interfacial transition zone, strength, chloride penetration and carbonation of concrete". *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 15, Nº 5, pp. 443-451.

Poon, C.S., Qiao, X.C., Chan, D. (2006). "The Cause and influence of self-cementing properties of fine recycled concrete aggregates on the properties of unbound sub-base". *Waste Management*, Vol. 26, Nº10, pp. 1166-1172.

RILEM (1994). "Guidance for demolition and reuse of concrete and masonry. Specifications for concrete with recycled aggregates". *Materials and Structures*, Vol. 27, 1994, pp. 557-559.

RILEM (2000). "Self-Compacting Concrete - State-of-the-Art Report of RILEM TC 174-SCC". Ed. Å. Skarendahl and Ö. Petersson, 168p.

RILEM (2006). "Casting of Self Compacting Concrete - Final Report of RILEM TC 188-CSC". Ed. Å. Skarendahl and P. Billberg, 26p.

RILEM (2013). "Progress of Recycling in the Build Environment". Final report of the RILEM Technical Committee 217-PRE, Enric Vázquez (Ed.), 286p.

- Sánchez de Juan, M., Alaejos Gutiérrez, P. (2003). "Utilización de árido reciclado para la fabricación de hormigón estructural". En: Memorias II Congreso de ACHE de Puentes y Estructuras.
- Sosa, M.E., Zega, C.J., Benito, D.E., Coelho Dos Santos, G.B., Di Maio, A.A. (2015). "Use of fine recycled aggregate as supplementary cementitious material". En: Proceedings III Progress of Recycling in the Built Environment, I. Martins, C. Ulsen and S.C. Ângulo Eds, RILEM Publications SARL., 3-5 de agosto de 2015, Sao Paulo, Brazil.
- Sosa, M.E., Zega, C.J., Di Maio, A.A., Peralta, J.P. (2012). "Evaluación de morteros con agregado fino reciclado en reemplazo de arena natural de trituración". En: Memorias V Congreso Internacional y 19° Reunión Técnica de la Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón, 7-9 de noviembre de 2012, Bahía Blanca, pp. 415-422.
- Sri Ravindrarajah, R., Tam, C.T. (1985). "Properties of concrete made with crushed concrete as coarse aggregate". Magazine of Concrete Research, Vol. 37, N° 130, pp. 29-38.
- Swamy, R.N. (1998). "Design for durability and strength through the use of fly ash and slag in concrete". En: Proceedings CANMET/ACI International Workshop on Supplementary Cementing Materials, Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete, 6-7 de abril de 1998, Toronto, Canada, pp. 1-72.
- Tavakoli, M., Soroushian, P. (1996). "Strengths of recycled aggregate concrete made using field-demolished concrete as aggregate". Materials Journal, ACI, March-April 1996, pp. 182-190.
- Vázquez, E., Barra, M. (2002). "Reciclaje y reutilización del hormigón". Monografía CIMNE: Desarrollo sostenible del cemento y del hormigón, N° 67, pp. 43-65.
- Zega, C.J. (2010). "Propiedades físico-mecánicas y durables de hormigones reciclados". Tesis Doctoral, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata, 200p.
- Zega, C.J., Di Maio, A.A. (2011a). "Recycled concretes made with waste ready-mix concrete as coarse aggregate". Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE, Vol. 23, N° 3, pp. 281-286.
- Zega, C.J., Di Maio, A.A. (2011b). "Use of recycled fine aggregate in concretes with durable requirements". Waste Management, Vol. 31, N° 11, pp. 2336-2340.
- Zega, C.J., Di Maio, A.A., Zerbino, R.L. (2014). "Influence of natural coarse aggregate type on the transport properties of recycled concrete". Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE, Vol. 26, N° 6.
- Zega, C.J., Di Maio, A.A. (2006). "Comportamiento de hormigones elaborados con agregado fino reciclado". En: Memorias 16° Reunión Técnica de la Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón, 8-10 de noviembre de 2006, Mendoza, pp. 47-54.
- Zega, C.J., Di Maio, A.A. (2007). "Efecto del agregado grueso reciclado sobre las propiedades del hormigón". Boletín Técnico, IMME, Vol. 45, N° 2, pp. 1-11.
- Zega, C.J., Di Maio, A.A. (2011). "Recycled concretes made with waste ready-mix concrete as coarse aggregate". Journal of Materials in Civil Engineering, Vol. 23, N° 3, pp. 281-286.
- Zega, C.J., Di Maio, A.A. (2012). "Influencia del tipo de agregado grueso natural sobre algunas propiedades de los hormigones reciclados". En: Memorias V Congreso Internacional y 19° Reunión Técnica de la Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón, 7-9 de noviembre de 2012, Bahía Blanca, pp. 151-158.
- Zega, C.J., Sosa, M.E., Di Maio, A.A. (2010). "Propiedades de los agregados reciclados procedentes de hormigones con diferentes tipos de agregados gruesos naturales". En: Memorias IV Congreso Internacional y 18° Reunión Técnica de la Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón, 8-10 de noviembre de 2010, Mar del Plata, pp. 33-38.
- Zega, C.J., Taus, V.L., Villagrán Z., Y.A., Di Maio, A.A. (2005). "Comportamiento físico-mecánico de hormigones sometidos a reciclados sucesivos". En: Memorias Simposio fib "El Hormigón Estructural y el Transcurso del Tiempo", 28-30 de septiembre de 2005, La Plata, Argentina, pp. 761-768.
- Zerbino, R., Giaccio, G., Casuccio, M., Zega, C.J., Martin, R., Perera, E., Hector, S. (2006). "Empleo de hormigón reciclado para la construcción de losas de pavimento urbano". En: Memorias 16° Reunión Técnica de la Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón, 8-10 de noviembre, Mendoza, pp. 63-70.