

DESARROLLO DE LA REACCIÓN ÁLCALI-SÍLICE EN HORMIGONES CON AGREGADOS RECICLADOS

C.J. Zega^{1,2}, D.D. Falcone¹, A.A. Di Maio^{1,2}

1 Laboratorio de Entrenamiento Multidisciplinario para la Investigación Tecnológica (LEMIT), CICPBA. Calle 52 e/121 y 122, (1900) La Plata, Argentina. hormigones@lemit.gov.ar

2 CONICET, Argentina. cj.zega@conicet.gov.ar

Palabras clave: agregado reciclado; hormigón reciclado; reacción álcali-sílice

RESUMEN

Entre los aspectos durables del hormigón reciclado, la reacción álcali-sílice (RAS) constituye un punto singular debido a que la misma ha sido escasamente estudiada, hecho que ha llevado a restringir algunas normativas el empleo de agregados reciclados que provengan de la trituración de hormigones afectados por dicha reacción. En este trabajo se presentan resultados preliminares respecto al desempeño de hormigones reciclados elaborados con 20 y 50% de agregado grueso reciclado proveniente de un hormigón deteriorado por la RAS. Se evalúa la resistencia a compresión, el módulo de elasticidad estático y parámetros durables de los hormigones estudiados a la edad de 28 días, y del hormigón convencional a la edad de trituración. Se analizan las expansiones registradas hasta el momento en probetas expuestas en las condiciones según IRAM 1700 como así también las obtenidas en probetas gemelas ubicadas en cámara húmeda.

INTRODUCCIÓN

La durabilidad de los hormigones reciclados es una temática que, aún abordada desde distintas perspectivas, presenta discrepancias a nivel internacional debido a las diferentes variables intervinientes, como son la calidad del agregado reciclado, el tipo de agregado natural que contiene el hormigón de origen, la calidad de la nueva matriz, la elevada absorción del agregado reciclado, el mecanismo de transporte involucrado, entre otros. En general, se presume que la durabilidad del hormigón reciclado es inferior a la del hormigón convencional de igual nivel resistente, motivado en la mayor porosidad del agregado reciclado, aunque en diferentes estudios se ha demostrado su aptitud para uso en ambientes agresivos (1-5). Entre los aspectos durables del hormigón reciclado, la reacción álcali-sílice (RAS) constituye un punto singular, por cuanto dicha temática ha sido escasamente estudiada. Este hecho ha llevado a restringir en algunas normativas el empleo de agregados reciclados que provengan de la trituración de hormigones afectados por dicha reacción (6), mientras que otras consideran su evaluación de igual modo que un agregado natural (7,8).

En los últimos años, diversos estudios han sido llevados a cabo sobre la determinación de la potencialidad de los agregados reciclados frente a la RAS, como así también sobre la eficacia de los métodos inhibidores existentes para agregados naturales al ser aplicados a los agregados reciclados (9-11). En general, la reactividad del agregado natural que forma parte de los agregados reciclados sigue estando presente en las mezclas recicladas, registrándose expansiones semejantes a las de las mezclas

originales(11,12). Etxeberria y Vázquez(2010) (12), observaron la formación de gel de reacción en el perímetro de los agregados reciclados debido a la arena natural reactiva del hormigón de origen. Shehata et al.(2010) (11), por su parte, atribuyen la elevada expansión de los hormigones reciclados a la exposición de material reactivo capaz de producir nuevas reacciones al triturar el hormigón original. Además, observaron que la cantidad de adición mineral necesaria para mitigar la RAS en el hormigón reciclado fue mayor que la habitualmente empleada en el hormigón con agregados naturales.

En cuanto a la evaluación de los agregados reciclados de hormigón frente a la RAS, existen diferentes propuestas que incluyen la modificación de las condiciones de exposición de los métodos existentes para agregados naturales y la evaluación por separado del mortero y del agregado natural presente en el agregado grueso reciclado (AGR) (10,13). Barreto Santos et al.(2009) (10) concluyen que las mayores variaciones en los resultados sobre morteros se deben a la fragmentación del AGR, produciendo la pulverización del mortero adherido, lo cual provoca que las características del agregado fino reciclado sean diferentes a las del grueso reciclado.

Este trabajo tiene por finalidad evaluar la capacidad remanente de reacción frente a los álcalis de un agregado grueso reciclado obtenido a partir de un hormigón deteriorado por la reacción álcali-sílice (RAS). Se evalúan hormigones reciclados elaborados con 20 y 50% (en volumen) de AGR en comparación con un hormigón elaborado con agregado grueso natural reactivo. Se analizan las expansiones registradas hasta el momento, tanto en probetas expuestas a las condiciones de la IRAM 1700 como en probetas gemelas mantenidas en cámara húmeda. Se presentan también resultados de resistencia a compresión, módulo de elasticidad estático y parámetros durables de los hormigones a la edad de 28 días, y del hormigón convencional a la edad de trituración.

EXPERIENCIAS

Materiales

Para la elaboración de los hormigones (convencional y reciclados) se empleó un cemento Portland normal (CPN40) (álcalis totales equivalente expresado en $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ de 0,86%) y arena silíceo natural no reactiva como agregado fino. El agregado grueso natural (AGN) del hormigón original estuvo compuesto por combinación de piedra partida granítica, no reactiva, y arenisca cuarcítica del Chaco, la cual en estudios previos evidenció ser altamente reactiva frente a los álcalis obteniéndose un pessimum para el 30% de reemplazo (14); en este estudio, la proporción utilizada de arenisca fue del 10%. En los hormigones reciclados, como agregado grueso natural se empleó el mismo agregado granítico (no reactivo) y como agregado grueso reciclado (AGR) el obtenido a partir de la trituración y posterior tamizado (retenido en el tamiz de 4,75mm) del hormigón original previamente elaborado. Las propiedades determinadas a los agregados fino y gruesos (naturales y reciclados) utilizados se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1: Propiedades de los agregados fino y gruesos.

Propiedad	Arena silíceas	AGN		AGR
		Granito	Arenisca	
Módulo de finura	2,70	6,92	(*)	6,64
Densidad (kg/dm ³)	2,64	2,71	2,50	2,54
Absorción (%)	0,3	0,2	1,3	5,1

(*) Obtenida de la trituración de trozos de roca. Se utilizó considerando la granulometría especificada en la Norma IRAM 1700.

Desarrollo experimental

Se elaboró un hormigón convencional (HC) y hormigones reciclados con 20 y 50% (en volumen) de AGR (HR20 y HR50), todos ellos de relación agua-cemento 0,42, a los cuales se les adicionó NaOH en el agua de mezclado a fin de tener un contenido de álcali equivalente en el cemento de 1,25%. En la Tabla 2 se presentan las proporciones de las mezclas elaboradas y las propiedades determinadas en estado fresco. El AGR fue empleado en condición de saturado y superficie seca, a fin de evitar modificación en la consistencia de las mezclas debida a la mayor absorción del mismo.

Tabla 2: Proporciones de las mezclas (kg/m³) y propiedades en estado fresco.

Materiales		Hormigones		
		HC	HR20	HR50
Agua		176	176	176
Cemento		420	420	420
Agregado fino		697	697	697
AGN	Granito	982	875	545
	Arenisca	100	-	-
AGR		-	201	503
Propiedades en estado fresco				
Asentamiento (mm)		130	150	130
PUV (kg/m ³)		2399	2399	2357
Aire incorporado (%)		3,5	2,5	3,6

Con cada una de las mezclas elaboradas se moldearon probetas cilíndricas de 150x300mm de 100x200mm, probetas cúbicas de 150mm de lado y prismáticas de 75x75x300mm, estas últimas destinadas a la evaluación de los cambios de longitud debido a la RAS.

Las probetas fueron desmoldadas a las 24 horas y mantenidas en condiciones normalizadas (T: 23°C±2°C; HR>95%) hasta las edades de ensayo (28 y 380 días). A los 28 días se evaluaron parámetros de caracterización de los hormigones, tales como, resistencia a compresión, módulo de elasticidad estático, velocidad y capacidad de succión capilar (IRAM 1871) y penetración de agua a presión (IRAM 1554). Además, a partir de las 24 horas del desmolde, se realizaron las mediciones de las longitudes iniciales en 2 grupos de probetas gemelas de cada uno de los hormigones en estudio, donde un grupo fue mantenido en cámara húmeda (T: 23°C±2°C; HR>95%) mientras que el otro fue expuesto a las condiciones especificadas en la Norma IRAM 1700 (T: 38°C±2°C).

La metodología de trabajo consistió en medir la expansión debida a la reacción álcali-sílice (RAS) en ambos grupos del hormigón convencional (HC) y, alcanzado un determinado valor de la misma, se procedió a la trituración del mismo con el fin de generar el agregado grueso reciclado (AGR). Previamente, sobre dicho hormigón se determinaron los mismos parámetros evaluados a la edad de 28 días a fin de compararlos con estos últimos. Respecto a la definición de la edad de trituración del hormigón HC, se consideró el momento en que la velocidad de expansión se detiene, hecho que se alcanzaría cuando alguno de los dos factores principales intervinientes en la RAS deja de estar presente, es decir, agotamiento de los álcalis o de la sílice reactiva. Para ello, se tomó como referencia las mediciones correspondientes a las probetas del grupo estacionado en cámara húmeda, de manera que el grado de avance de la reacción sea equivalente al de las demás probetas destinadas para triturar. De este modo, y considerando lo indicado anteriormente, la trituración del hormigón HC se realizó a aproximadamente 380 días.

Obtenido el AGR, se procedió a su caracterización (Tabla 1) y posteriormente se lo empleó en la elaboración de los hormigones reciclados, para lo cual se mantuvieron constantes las proporciones de los demás materiales, empleándolos en un 20 y 50%, en volumen, del total del agregado grueso.

RESULTADOS

En la Tabla 3 se presentan los resultados de resistencia a compresión y módulo de elasticidad estático obtenidos en los hormigones convencional y reciclados a la edad de 28 días, como así también los correspondientes al hormigón convencional a la edad de trituración (380 días).

Tabla 3: Propiedades en estado endurecido de los hormigones.

Hormigón	HC		HR20	HR50
Edad de evaluación (días)	28	380 ^{a)}	28	28
Resistencia a compresión (MPa)	35,4 (0,3)	31,0 (1,9)	32,9 (1,7)	29,2 (5,2)
Módulo de elasticidad estático (GPa)	26,3 (1,1)	18,1 (1,8)	32,0 (1,6)	30,8 (0,2)
Absorción de agua (%)	5,0	---	5,9	7,1

^{a)} Corresponde a la edad de trituración del hormigón.

Puede observarse que se produce una disminución del 12% en la resistencia a compresión del hormigón HC a 380 días respecto al valor determinado a los 28 días, mientras que el módulo de elasticidad estático evidenció una disminución del orden del 30%. Este comportamiento se encuentra directamente relacionado con el avance del deterioro debido a la reacción álcali-sílice. En el caso de los hormigones reciclados, se observa una disminución en la resistencia a compresión a 28 días al aumentar el contenido de AGR utilizado, siendo del 7 y 18% para el HR20 y HR50, respectivamente, hecho que se relaciona con la mayor debilidad del agregado reciclado debido al avanzado nivel de deterioro del hormigón de origen al momento de su trituración. Además de la disminución de resistencia en los hormigones HR, se aprecia un leve incremento del desvío estándar, debido a los motivos señalados. Respecto al módulo de elasticidad estático, y contrariamente a lo observado para la resistencia a compresión, los hormigones HR presentan valores superiores al del hormigón HC. A la edad de 28 días, se observó mayor cantidad de productos de reacción sobre la superficie de las probetas

del hormigón HC que en los HR, hecho que hace pensar en una mayor alteración de las primeras, por lo cual el módulo de elasticidad del HC pudo verse más afectado que el de los HR. Por otra parte, la leve disminución del módulo estático del HR50 respecto al HR20 debe atribuirse al mayor contenido de AGR, el cual posee menor rigidez que el agregado grueso natural empleado como consecuencia del mortero adherido, tal como ha sido verificado en estudios previos (15-18).

Respecto a los parámetros de durabilidad evaluados, en la Figura 1 se presentan la penetración de agua a presión (media y máxima) y velocidad de succión capilar de los hormigones HC y HR en estudio. El hormigón HC presenta valores de penetración a 28 días que superan los límites especificados en el Reglamento CIRSOC 201:2005 (19), mientras que los parámetros de capilaridad resultan en valores inferiores a los indicados en el mencionado reglamento, con una velocidad de succión de $2,04 \text{ g/m}^2/\text{s}^{1/2}$ y una capacidad de succión de 1710 g/m^2 . A la edad de 380 días, no se observan cambios sustanciales en los parámetros de capilaridad del hormigón HC respecto a los determinados a 28 días, con una velocidad de succión de $1,97 \text{ g/m}^2/\text{s}^{1/2}$ y una capacidad de succión de 1540 g/m^2 . Sin embargo, el comportamiento respecto a la penetración de agua a presión resulta contrario al mencionado para la succión capilar, con valores medio y máximo de 85 y 100 mm respectivamente, duplicando los determinados a 28 días.

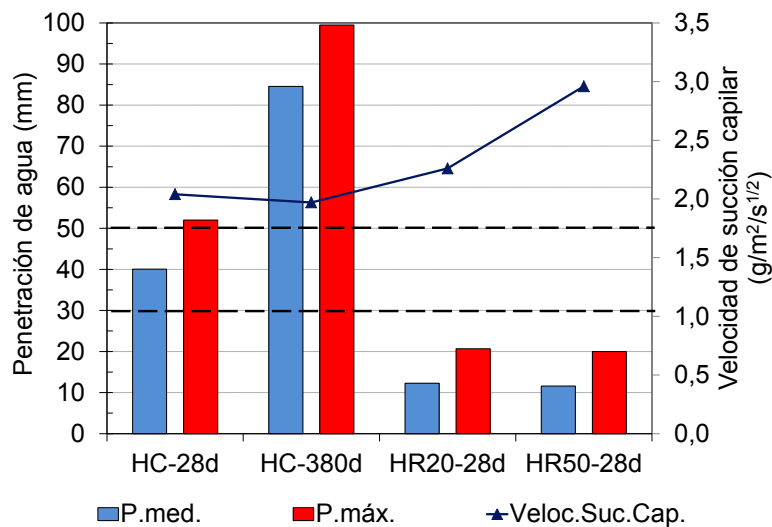


Figura 1: Penetración de agua y velocidad de succión capilar.

En el caso de los hormigones HR, al incrementarse el contenido de AGR empleado se produce un incremento del 11 y 45% en la velocidad de succión y del 24 y 77% en la capacidad de succión capilar de los hormigones HR20 y HR50, respectivamente en cada caso, respecto a los determinados en el hormigón HC a la misma edad. En cuanto a la penetración de agua, los hormigones HR presentan similares valores para los parámetros medio y máximo, siendo de 12 y 20 mm, respectivamente, los cuales corresponden al 30% y 40% de los valores obtenidos en el hormigón HC.

Los resultados obtenidos en ambos ensayos de durabilidad resultan acorde con el mecanismo de transporte involucrado en cada caso. En tal sentido, el incremento en la fisuración del hormigón conlleva a una disminución de la tensión capilar en poros y capilares, y por tanto de la cantidad de agua que puede ingresar por succión capilar, mientras que representa una vía de acceso rápida al agua libre como sucede en el ensayo de penetración de agua a presión.

Las expansiones ocasionadas por la RAS determinadas en los hormigones HR y HC, expuestos a 38°C y en cámara húmeda, se presentan en las Figuras 2 y 3 respectivamente.

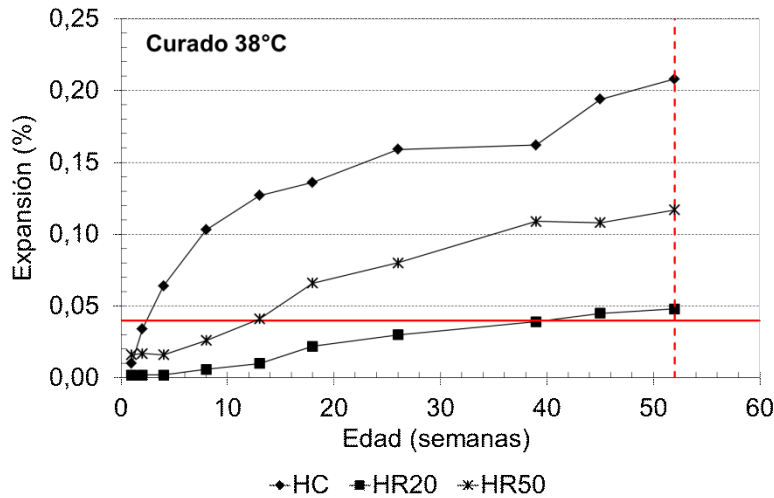


Figura 2: Expansiones de hormigones curados según IRAM 1700.

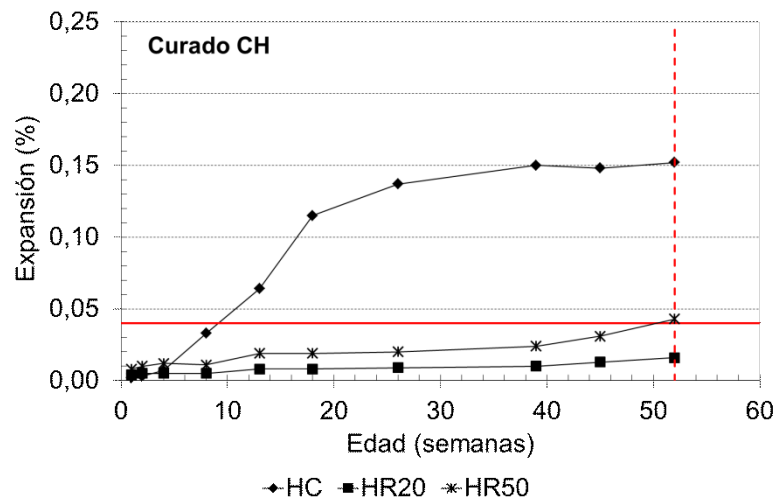


Figura 3: Expansiones de hormigones curados en cámara húmeda.

La evaluación de las expansiones según IRAM 1700 (38°C) nos permite caracterizar la potencial reactividad de los agregados, en este caso en particular un agregado compuesto por un 10% de arenisca cementada con ópalo y calcedonia y un 90% de una roca granítica. El hormigón HC elaborado con este conjunto de agregados presentó una expansión a las 52 semanas de 0,208% (Figura 2), pudiéndose lo considerar como altamente reactivo (expansión >0,120% - IRAM 1531, Anexo B), con lo cual se deberían tomar medidas preventivas frente a la reacción álcali-sílice. En el caso de los hormigones HR20 y HR50 las expansiones registradas a las 52 semanas fueron de 0,048 y 0,117% respectivamente, los cuales resultan del orden del 23 y 56% de la expansión correspondiente al HC. Estos resultados indican que para el 20% se trata de un agregado reactivo ($0,040\% < \text{expansión} < 0,120\%$ - IRAM 1531, Anexo B), mientras que para el 50% se lo podría considerar como altamente reactivo ($\approx 0,120\%$), con lo cual las medidas preventivas, ya sean de carácter prescriptivo como así también prestacional, serán de distinta exigencia frente a los álcalis del hormigón.

En el caso de las probetas que permanecieron en cámara húmeda (Figura 3), hasta la edad de 52 semanas, se observa que el hormigón HC alcanzó una expansión de 0,152%, mientras que en los hormigones HR las mismas resultaron de 0,016% (HR20) y 0,043% (HR50), es decir, un 11 y 28% de la del HC respectivamente. Se observa que las expansiones registradas en las probetas de los hormigones HR expuestas en cámara húmeda resultaron significativamente menores que las de aquellas expuestas a 38°C, siendo del orden de 1/3 de estas últimas, en tanto que para el hormigón HC resultaron del 73% del valor a 38°C.

Un hecho llamativo que surge de los resultados alcanzados en este estudio, es que en el hormigón HC a 28 días se evidenciaron signos de reacción a partir de la observación de fisuras en la superficie de las probetas expuestas en cámara húmeda, como fue mencionado anteriormente. Ello se verificó con los valores obtenidos en la penetración de agua a presión, sin embargo, no fue evidenciado en el ensayo de succión capilar ni en la expansión medida a dicha edad (0,007%), la cual incluso resultó inferior a las del hormigón HR50 (0,012%). Este hecho lleva a reflexionar respecto a qué metodología habría que emplear para evaluar si un hormigón cumple con la condición de durabilidad (succión capilar, penetración de agua a presión), teniendo en consideración también que el ensayo de succión capilar está indicado en el CIRSOC 201:2005 como requisito de durabilidad para todos los ambientes de exposición.

CONCLUSIONES

En este trabajo se evaluó el desarrollo de la reacción álcali-sílice (RAS) en hormigones reciclados elaborados con 20 y 50%, en volumen, de agregado grueso reciclado obtenido a partir de la trituración de un hormigón dañado por RAS. Los resultados alcanzados permiten indicar que:

- Se produce una disminución de la capacidad de reacción del agregado reciclado, respecto al natural, en las probetas mantenidas en cámara húmeda, con valores de expansión a 52 semanas en los hormigones HR20 y HR50 del orden del 13 y 30% de la expansión del hormigón de origen, respectivamente.
- Sin embargo, probetas gemelas de los HR expuestas a 38°C presentan expansiones a 52 semanas tres veces superiores a las registradas en cámara húmeda. La expansión en probetas del hormigón de origen fue solo 37% superior al de las probetas gemelas expuestas en cámara húmeda.
- Los valores de expansión registrados a 52 semanas en las probetas a 38°C permitirían caracterizar al AGR como potencialmente reactivo o altamente reactivo, dependiendo del contenido de empleo del mismo, 20 y 50% para este estudio.

REFERENCIAS

- (1) 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", Barcelona, Spain. Ed. E. Vázquez, Ch.F. Hendriks y G.M.T. Janssen, RILEM; (2004), 554-562.
- (2) 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.
- (3) Levy, S.M., Helene, P. "Durability of recycled aggregates concrete: a safe way to sustainable development", Cement and Concrete Research, Vol. 34, N° 11, (2004), 1975-1980.

- (4) Zega, C.J., Fornasier, G., Ponce, M., Di Maio, A.A., "Hormigones reciclados expuestos a ciclos rápidos de congelación y deshielo", *Hormigón*, N° 41, (2005), 53-61.
- (5) Villagrán-Zaccardi., Y.A., Zega, C.J., Di Maio, A.A., "Chloride Penetration and Binding in Recycled Concrete", *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 20, N° 6, (2008), 449-455.
- (6) EHE-08. Instrucción de Hormigón Estructural. Anejo 15, Recomendaciones para la utilización de hormigones reciclados; (2008). (www.fomento.es)
- (7) BS EN 12620:2002. Aggregates for concrete. European Committee for Standardization.
- (8) DIN 4226-100:2002-02. Aggregates for mortar and concrete, Part 100: recycled aggregates. Deutsche Norm, (2002), 18p.
- (9) Sota, J., Falcone, D., Batic, O., "Hormigones con agregados de hormigón reciclado afectado por RAS", 16° Reunión Técnica de la AATH, Mendoza, Argentina, (2006), 7-13.
- (10) Barreto Santos, M., de Brito, J., Santos Silva, A., "Métodos de evaluación de las reacciones álcali-sílice en hormigones con áridos reciclados", *Revista Ingeniería de Construcción*, Vol. 24, N° 2, (2009), 141-152.
- (11) Shehata, M.H., Christidis, C., Mikhael, W., Rogers, C., Lachemi, M., "Reactivity of reclaimed concrete aggregate produced from concrete affected by alkali-silica reaction", *Cement and Concrete Research*, Vol. 40, (2010), 575-582.
- (12) Etxeberria, M., Vázquez, E., "Reacción álcali-sílice en el hormigón debido al mortero adherido del árido reciclado", *Materiales de Construcción*, Vol. 60, 297, (2010), 47-58.
- (13) Shehata, M.H., Johnson, R., "The efficacy of accelerated test methods to evaluate Alkali Silica Reactivity of recycled concrete aggregates", *Construction and Building Materials*, Vol. 112, (2016), 518-528.
- (14) Batic, O., Cortelezzi, C., Pavlicevic, R. y Traversa, L., "Caracterización tecnológica de las areniscas cementadas con calcedonia y opalo del noroeste de la provincia del Chaco, República Argentina", 12° Reunión Técnica de la AATH, La Plata, Argentina, (1995), 191-197.
- (15) Zega, C.J., Taus, V.L., Villagrán Z., Y.A., Di Maio, A.A., "Comportamiento físico-mecánico de hormigones sometidos a reciclados sucesivos", *Simposio fibEl Hormigón Estructural y el Transcurso del Tiempo*, La Plata, Argentina, (2005), 761-768.
- (16) Zega, C.J., Taus, V.L., Di Maio, A.A., "Comportamiento físico-mecánico de hormigones reciclados elaborados con canto rodado", *Boletín Técnico IMME*, Vol. 44, N° 3, (2006), 17-26.
- (17) 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.
- (18) Zega, C.J., Falcone, D.D., Di Maio, A.A., "Elaboración de hormigones reciclados empleando restos de hormigones de corte", *III Congreso Internacional y 17° Reunión Técnica de la AATH*, Córdoba, (2008), 23-30.
- (19) CIRSOC 201-2005, "Reglamento Argentino de Estructuras de Hormigón", Instituto Nacional de Tecnología Industrial, Argentina, (2005), 490p.