

## ENSAYOS PRESTACIONALES DE ATAQUE POR SULFATO EN HORMIGÓN RECICLADO

L.R. Santillán<sup>1</sup>, E.F. Irassar<sup>2</sup>, C.J. Zega<sup>1</sup>

<sup>1</sup> LEMIT, CONICET, La Plata, Argentina. hormigones@lemit.gov.ar

<sup>2</sup> CIFICEN, CONICET-UNCPBA-CICPBA, Olavarría, Argentina.

### RESUMEN

---

El hormigón reciclado es un material que presenta ventajas de sustentabilidad ambiental y económica frente al hormigón convencional. Si bien se ha demostrado que es posible obtener hormigones reciclados con prestaciones mecánicas similares a las del hormigón convencional, sus propiedades durables se encuentran aún hoy en evaluación, particularmente frente al ataque por sulfatos, tópico sobre el que existen muy pocos estudios publicados. En este trabajo, se presentan los resultados de distintos ensayos prestacionales realizados en hormigones reciclados, los cuales presentan diferentes calidades químicas en su matriz. Se evalúan hormigones con diferentes contenidos y tipos de agregados gruesos reciclados (diferentes calidades químicas). Un grupo de probetas fue sumergido en una solución de sulfato de sodio mientras que otro grupo fue semi-enterrado en un suelo salino, en ambos casos con concentraciones elevadas de sulfato. Los resultados muestran un fuerte control de la nueva matriz en la resistencia de los hormigones al ataque por sulfato.

**Palabras clave:** hormigón reciclado, agregado grueso reciclado, durabilidad, ataque por sulfatos.

### INTRODUCCIÓN

La utilización de agregado grueso reciclado (AGR) para la elaboración de nuevos hormigones es una práctica que aporta a la sustentabilidad del hormigón. Varios estudios han mostrado las prestaciones competitivas del hormigón reciclado, teniendo en cuenta su contribución a la protección del medio ambiente y la economía circular [1, 2]. Sin embargo, actualmente no existe un conocimiento acabado de su desempeño al largo plazo, razón por la cual su inclusión en los reglamentos es aún incipiente.

Por otro lado, el ataque por sulfatos es una de las patologías que puede afectar la durabilidad del hormigón [3]. Las soluciones tecnológicas que prescriben la mayoría de los reglamentos consisten en garantizar una baja permeabilidad (relación a/c baja) y en utilizar un cemento de buena resistencia a los sulfatos (bajo contenido de C<sub>3</sub>A) [4]. Al utilizar un AGR, la porosidad del hormigón aumenta [5, 6], que a priori es un efecto negativo. Además, el mortero adherido a las partículas de AGR puede aumentar el contenido de fases inestables ante la presencia de iones sulfatos.

En este trabajo se estudia el efecto de la calidad química y el porcentaje de reemplazo de AGR, en el desempeño de hormigones reciclados frente al ataque por sulfatos. Para tal fin, se consideraron diferentes hormigones convencionales y reciclados frente a dos tipos de ensayo prestacionales. Por un lado, se evaluaron probetas sumergidas en solución de sulfato de sodio. En este caso el ingreso de iones sulfato se genera por difusión y el

proceso obtenido es de un ataque externo por sulfatos (AES) puro (ataque de tipo químico). Por otro lado, se evaluaron probetas semi-enterradas en un suelo rico en sulfatos. En este caso el ingreso de iones sulfato se genera por difusión y por convección asociada al transporte del agua, fundamentalmente por absorción capilar que se evapora en la superficie seca. Esta condición de saturación variable y parcial de las probetas, genera las condiciones para que además del AES, se genere el fenómeno de cristalización de sales, referido en la bibliografía [7] como ataque físico por sulfatos (AFS). Estos ensayos forman parte de un plan experimental más amplio que conforman el plan de trabajos de la tesis de doctorado [8].

## METODOLOGÍA

### Materiales y mezclas

Para la elaboración de los hormigones reciclados, se generaron dos tipos de AGR con diferente calidad química. Para tal fin, se dosificaron dos hormigones de origen (HO), de iguales proporciones y materiales, pero con dos tipos diferentes de cemento: un cemento CPN-50 ARS (cA) y un cemento CPF-50 B (cB). En la Tabla 1 se presentan la composición mineral de ambos cementos, determinada mediante el método de Rietveld en difractogramas de rayos X (DRX). El CPN corresponde a un cemento resistente a los sulfatos, gracias a su bajo contenido de  $C_3A$ , mientras que el CPF-50B, además de contener un clinker rico en  $C_3A$ , tiene un contenido considerable de filler calcáreo, lo cual podría redundar en una mayor porosidad de la pasta de cemento.

**Tabla 1:** Composición mineralógica de los cementos utilizados.

Cemento	$C_3S$	$C_2S$	$C_3A$	$C_4AF$	Yeso	Filler
cA	59,6	13,1	4,0	10,1	5,5	4,1
cB	49,6	18,3	9,4	0,5	4,1	19,5

En la Tabla 2 se presentan la dosificación y las propiedades de los hormigones de origen elaborados. Como agregado fino se utilizó una composición 70-30 de arena natural silíceo de río (ANS) y arena granítica de trituración (AGT). Como agregado grueso natural se utilizó piedra partida granítica 6-20 (PPG). Además, se utilizó un aditivo reductor de agua para obtener una adecuada consistencia en ambas mezclas.

**Tabla 2:** Dosificación y propiedades de los hormigones de origen.

<i>Materiales</i>	HO-A	HO-B
Agua	158	158
Cemento	351	350
ANS	628	617
AGT	268	266
PPG	970	970
Superfluidificante	1,05	1,05
<i>Propiedades</i>		
Asentamiento, mm	70	60
Contenido de aire, %	3,2	3,5
Resistencia a compresión 28d, MPa	48,7	45,4

Ambos hormigones de origen presentan una calidad resistente similar, siendo levemente superior la del HO-A, lo que se atribuye a una mejor calidad del cemento. De la trituración de estos hormigones, mediante trituradoras de mandíbula, se obtuvieron dos AGR, de

diferente calidad química pero similares propiedades físicas, denominados respectivamente AGR-A y AGR-B. En la Tabla 3 se presentan las propiedades determinadas a los AGR, incluyendo su distribución granulométrica.

**Tabla 3:** Propiedades de los AGR.

Propiedad	AGR-A	AGR-B
Absorción, %	4,6	4,2
Densidad relativa,	2,39	2,40
Pasa tamiz 75 $\mu\text{m}$ , %	1,15	1,23
Desgaste LA, %	24,4	28,8
Durabilidad, %	15,6	24,0
Contenido de mortero, %	47,6	44,0
Fracción $\frac{3}{4}$ - $\frac{1}{2}$	30	35
Fracción $\frac{1}{2}$ - $\frac{3}{8}$	16	15
Fracción $\frac{3}{8}$ - N°4	52	47

Una vez obtenidos los AGR se procedió a elaborar las mezclas de hormigones para su evaluación. Se diseñaron dos grupos de hormigones convencionales y reciclados. El primer grupo (serie A), fue diseñado siguiendo las prescripciones del Reglamento CIRSOC 201 [9] para hormigones expuestos a ambiente agresivo por sulfatos: relación a/c de 0,45 y el cemento cA. El segundo grupo (serie B), fue diseñado con la misma relación a/c pero utilizando el cemento cB, es decir, con un elevado contenido de  $C_3A$ , con el objetivo de evaluar el efecto de utilizar AGR en una matriz de baja calidad química. En la Tabla 4 se presentan las dosificaciones de todos los hormigones estudiados. Se utilizaron los mismos agregados naturales usados para los hormigones de origen. Los reemplazos de PPG por AGR fueron realizados en volumen, por lo que los valores en peso difieren levemente por tener estos últimos una menor densidad.

**Tabla 4:** Proporciones de hormigones convencionales y reciclados.

Mezcla	Agua	Cemento	ANS	AGT	PPG	AGR-A	AGR-B
A-0	158	351	628	268	970	-	-
A-20A	162	351	628	268	776	177	-
A-50A	168	351	628	268	485	443	-
A-20B	162	351	628	268	776	-	178
A-50B	168	351	628	268	485	-	445
B-0	158	350	617	266	970	-	-
B-20A	162	350	617	266	776	177	-
B-50A	168	350	617	266	458	443	-
B-20B	162	350	617	266	776	-	178

Los hormigones elaborados fueron caracterizados por sus propiedades mecánicas y de transporte:  $f'_c$ ) resistencia a compresión simple (IRAM 1546);  $A_b$ ) absorción al agua (ASTM C 642),  $V_{sc}$ ) velocidad de succión capilar (IRAM 1871), y  $P_M$ ) penetración de agua a presión (IRAM 1554), cuyos resultados se presentan en la Tabla 5.

**Tabla 5:** Propiedades mecánica y de transporte de los hormigones en estudio.

Mezcla	$f'_c$ 28d (MPa)	Ab (%)	$V_{sc}$ (g/m <sup>2</sup> .s <sup>1/2</sup> )	$P_M$ (cm)
A-0	45,3	2,91	2,18	1,09
A-20A	44,2	3,31	2,41	1,41
A-50A	44,7	3,64	2,75	1,48
A-20B	47,1	3,61	2,34	1,76
A-50B	51,1	3,68	2,73	1,55
B-0	46,2	3,47	2,83	2,56
B-20A	43,9	3,87	3,08	2,57
B-50A	43,5	4,62	4,37	2,46
B-20B	46,4	3,97	2,83	3,45

Para el ensayo en solución, se moldearon 3 prismas de 75x75x300 mm con pernos incrustados en sus extremos. Luego de 28 días de curado húmedo ( $T: 23\pm 2$  °C; HR>95 %) y dos semanas de tareas de acondicionamiento (impermeabilización de extremos), las probetas se sumergieron por 72 horas en agua saturada con cal, se realizaron las mediciones iniciales de peso y longitud. Posteriormente, se sumergieron en una solución con una concentración de 50 g/L de Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, a  $20\pm 2$  °C. Adicionalmente, se colocó una pequeña bomba de inmersión para generar una recirculación del líquido, evitando de este modo la generación de una doble capa de iones calcio en la superficie de las probetas que reduzca el gradiente de concentraciones e interrumpa el avance del AES.

Para el ensayo en suelo, se moldearon 2 prismas de 75x100x430 mm. Luego del mismo proceso de curado descrito para el anterior ensayo, se tomaron las mediciones iniciales de peso y frecuencia de resonancia y se ubicaron semi-enterradas en un suelo con 2 % en peso de Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. Este suelo arenoso se encuentra contenido en piletones plásticos cubiertos de la lluvia pero abiertos a la temperatura y humedad ambiente, y se encuentran en estado semi saturado por inundaciones periódicas en forma manual.

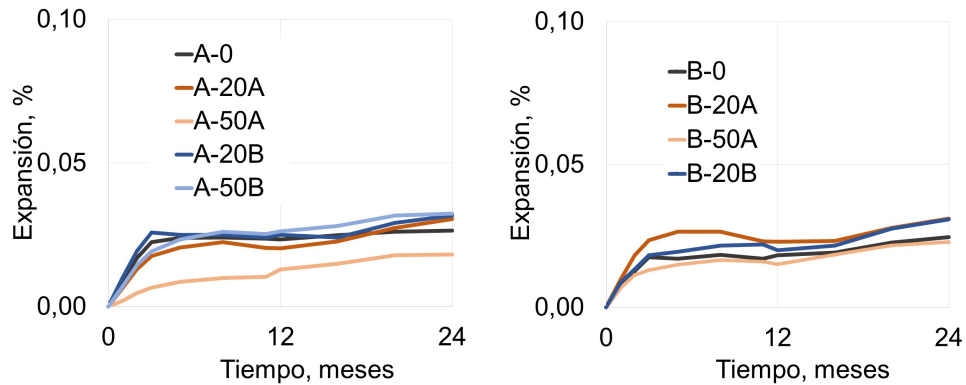
## RESULTADOS

### Ensayo prestacional en solución de sulfato

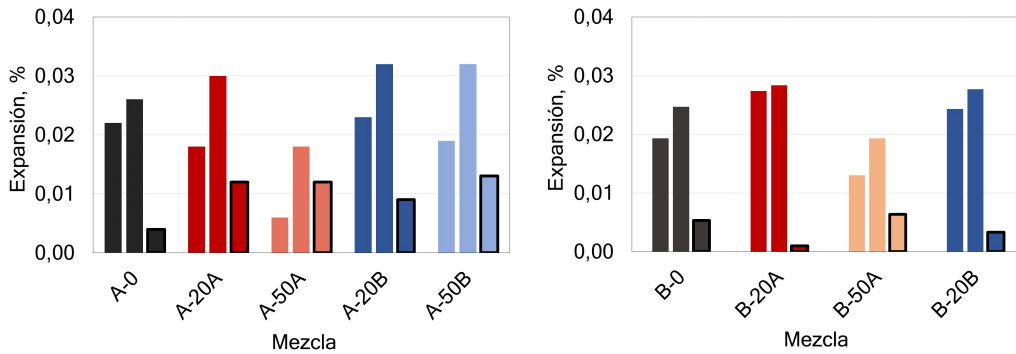
En la Figura 1 se presentan las expansiones de ambos grupos de hormigones hasta los 24 meses de exposición. Las expansiones de todos los hormigones fueron inferiores al 0,03%, sin mostrar un punto de inflexión, característico del AES al finalizar su etapa de incubación. Además, en todas las curvas se observan dos etapas bien definidas. Una primera etapa, con mayores tasas de expansión, y una segunda etapa con tasas muy inferiores. La expansión de la primera etapa, que se extiende aproximadamente hasta los 90 días (3 meses) de ensayo, se atribuye a la absorción adicional de agua por parte de la microporosidad de la pasta de cemento [10]. Para ambas calidades de matrices (A y B) se observan diferencias en la expansión de la primera etapa para los diferentes hormigones. En el caso de la mezcla A-50A se observa una expansión muy inferior a la del resto de los hormigones de igual matriz.

La expansión de la segunda etapa sí puede ser atribuida a un efecto del AES. En la Figura 2 se muestra discriminado para cada mezcla, las expansiones a 3 meses y a 24 meses (primera y segunda columna), y la diferencia entre ambos valores (tercera columna con borde negro), que correspondería a la expansión por AES. En los hormigones de matriz A, se observa una mayor expansión de todos los HR respecto al patrón. En cambio, para los hormigones matriz B en el mismo período, se observan

expansiones inferiores a la del patrón en hormigones con 20 % de AGR, y una expansión levemente mayor a la del patrón para un 50 % de AGR.

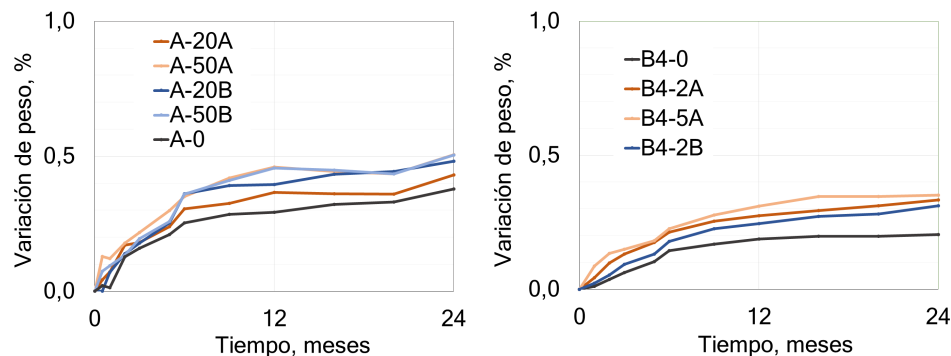


**Figura 1:** Expansión hasta 24 meses de los prismas en solución de sulfato de sodio.



**Figura 2:** Expansiones a 3 y 24 meses, y diferencia entre ambas.

En la Figura 3 se presenta la variación de peso de todas las mezclas hasta los 24 meses. En este caso se observa un incremento de peso siempre superior de los HR frente al patrón. En los hormigones de matriz A se observa un incremento variable con el contenido y tipo de AGR hasta el año de exposición y posteriormente una tasa similar para todas las mezclas. Las diferencias observadas en este caso se atribuyen entonces a diferencias en la absorción adicional de agua por parte de la matriz. Para los hormigones de matriz B también se observa un mayor incremento de los HR hasta el año de exposición, pero se observa una mayor tasa de crecimiento en el segundo año para los hormigones reciclados con 20 % de AGR. El hormigón con 50 % de AGR presenta una tasa similar a la del patrón.

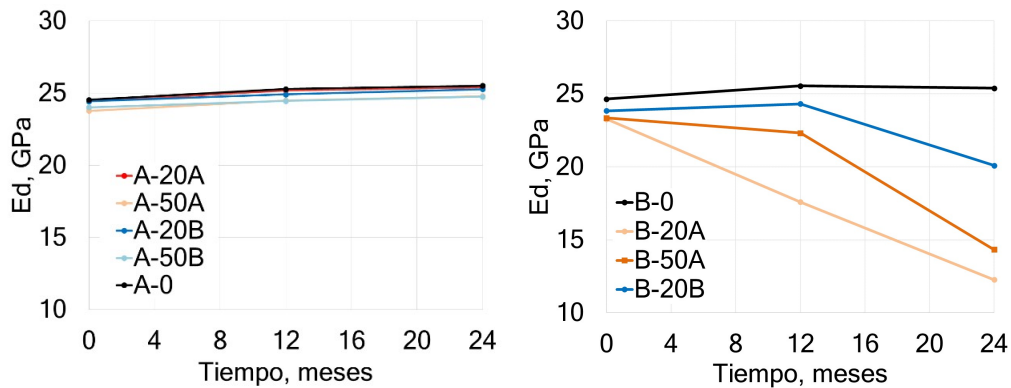


**Figura 3:** Variación de peso hasta 24 meses de prismas en solución de sulfato de sodio.

Los resultados obtenidos en este ensayo no muestran una correlación entre el contenido de AGR y las expansiones asociadas al AES. Tampoco muestran un efecto de la calidad química del AGR. La forma de las curvas indica que el AES no se desarrolló en un nivel considerable, aún en los HR. De la inspección visual en las barras no se observó ningún signo de daño o fisuración en ninguna de las barras estudiadas.

### Ensayo prestacional en suelo salino

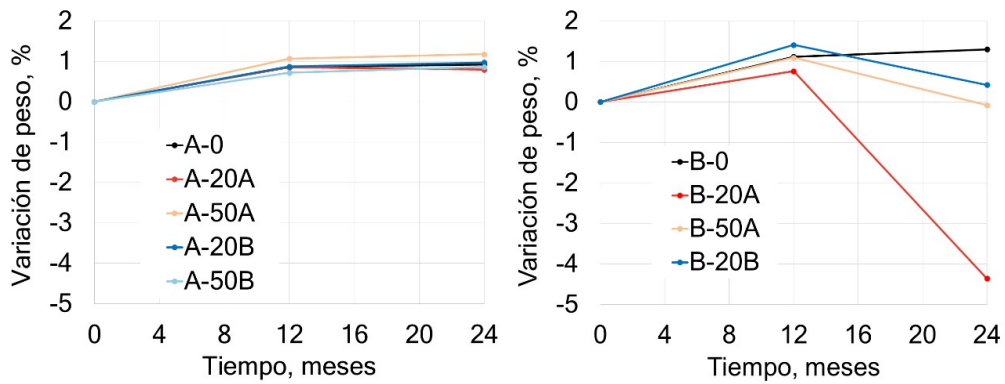
En la Figura 4 se presentan las variaciones del módulo de elasticidad ( $E_d$ ). Para los hormigones de la serie A, se observa un leve crecimiento del  $E_d$ , vinculado a un incremento del grado de saturación las probetas semi-enterradas, y en menor medida, a la precipitación de productos del AES. Si bien se observa un menor  $E_d$  inicial para los HR, atribuido a su mayor porosidad debido al mortero adherido del AGR, el desempeño de los HR resulta similar al del hormigón patrón.



**Figura 4:** Variación de  $E_d$  de barras semi-enterradas en suelo salino.

En los hormigones de la serie B los resultados son muy diferentes. El hormigón patrón mostró signos visibles de fisuración superficial pero su módulo de elasticidad permaneció inalterado. Por su parte, los HR de esta serie mostraron todas caídas considerables de su  $E_d$ . El hormigón con 50 % de reemplazo presentó la mayor caída en el módulo de elasticidad. Sin embargo, si se considera el segundo año de exposición, los hormigones con 20 % de ambos AGR muestran una mayor disminución del  $E_d$  que el hormigón B-50A.

En la Figura 5 se presenta la variación de peso de los hormigones tras 24 meses de exposición. Para los hormigones de la serie A se observa un leve incremento de peso, asociado a la saturación de la barra. En los hormigones de la serie B, el comportamiento del hormigón patrón fue similar al de los hormigones de la serie A, mientras que para los HR se observan caídas en el peso que evidencian pérdidas de masa. En este caso la mayor pérdida de masa se observa para el hormigón con 20 % de AGR-A.



**Figura 5:** Variación de peso de barras semi-enterradas en suelo salino.

## DISCUSIÓN

Los resultados muestran, en primer lugar, una cinética de ataque por sulfato muy diferente según el tipo de exposición. Para el ensayo en condición de saturación total, la baja porosidad de la matriz controla la velocidad del ataque, generando que a 24 meses de seguimiento no se observe un inicio del proceso de propagación del AES, aún para el cemento de baja calidad química. No se observa un efecto claro de la calidad química del AGR en el desempeño de estos hormigones, al menos para el periodo de ensayo reportado. Los resultados en el largo plazo permitirán confirmar si la pasta de cemento adherida en las partículas del AGR es capaz de reaccionar con los sulfatos ingresados, hecho que, de ser así, debería generar un mayor nivel de daño al HR.

La condición de saturación parcial y variaciones de humedad y temperatura, produce daño más rápido que la condición de saturación total, lo cual se atribuye a la combinación del AES con el AFS. Por esta razón, en los hormigones de matriz B se observó a los 24 meses un daño asociado a este mecanismo. Cabe mencionar que, si bien la relación a/c de ambas series es la misma, al igual que los niveles de resistencia, el elevado contenido de filler del cemento cB hace que la porosidad de la matriz no sea lo suficientemente cerrada como la del cemento cA. Ante esto, la presencia del AGR empeora el desempeño de una matriz que también es débil desde el punto de vista químico. La porosidad del AGR funciona como un puente capilar que permite un ingreso más rápido de la solución salina al interior del hormigón, potenciando el proceso de ataque químico al que la matriz cementícea es sometida.

El deterioro observado en este último ensayo no guarda una relación clara con el contenido de AGR, y muestra comportamientos diferentes para distintos tipos de AGR. Tampoco se observa una correlación clara entre los daños observados y las propiedades de transporte evaluadas. Las probetas del hormigón B-20A presentaron una particular pérdida de masa, concentrada sobre todo en su cara superior (Figura 6a), mientras que las probetas de hormigón B-50A mostraron fisuras transversales al eje longitudinal (Figura 6b), que serían consistentes con la mayor fisuración interna detectada mediante la evaluación del Ed. La mayor porosidad del HR parece acelerar el ingreso del sulfato y el inicio del ataque, pero podría a su vez modificar la respuesta del hormigón al proceso de deterioro.



**Figura 6:** a) probeta de la mezcla B-20A; b) probeta de la mezcla B-50A.

## CONCLUSIONES

En este trabajo se presentan los resultados parciales, hasta la edad de 24 meses, de los estudios realizados con el fin de evaluar el efecto de la calidad química del agregado grueso reciclado (AGR) en el desempeño de hormigones reciclados (HR) expuestos a diferentes ensayos prestacionales de ataque por sulfato.

Los resultados en el corto plazo indican que la condición de saturación juega un papel fundamental en la cinética del ataque. Para el caso de estado de saturación total, la baja permeabilidad de los hormigones diseñados según las prescripciones del reglamento CIRSOC 201-05, garantiza una cinética muy lenta del ataque. No se observa hasta la edad de 24 meses una influencia del contenido ni del tipo de AGR empleado.

Para el caso de saturación parcial, y en los hormigones de matriz débil químicamente, se observa un efecto magnificador del AGR sobre la cinética del ataque mixto (AES+AFS). La inclusión de AGR conduce en todos los casos a una mayor fisuración de las probetas y a una disminución del peso y del módulo dinámico de las mismas. Los HR diseñados según prescribe el citado reglamento (cemento ARS) no mostraron a los 24 meses ningún efecto del tipo ni del contenido de AGR.

## AGRADECIMIENTOS

Estos estudios fueron parcialmente financiados por el FONCyT, a través del proyecto PICT 2015-3339. Además, los autores agradecen al Ing. Leandro Carrizo, personal de apoyo del LEMIT, por la colaboración en la ejecución de los ensayos realizados.

## REFERENCIAS

- [1] Zega CJ, "Propiedades Físico - Mecánicas y Durables de Hormigones Reciclados", Tesis doctoral, Universidad Nacional de La Plata, La Plata, (2010), 166p.
- [2] De Brito J, Ferreira J, Pacheco J, Soares D, Guerreiro M, "Structural, material, mechanical and durability properties and behaviour of recycled aggregates concrete", J. Build. Eng., 6:1, (2016), 16p.
- [3] Skalny J, Marchand J, Odler I, "Sulfate Attack on Concrete", Spon, (2002), 217p.
- [4] Irassar EF, "Ataque químico al hormigón", en Durabilidad del hormigón estructural, AATH, (2001), 97-156.
- [5] Gómez-Soberón JM, "Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concrete aggregate. An experimental study", Cem. Concr. Compos., 32, (2002), 1301-1311.
- [6] Zega CJ, Di Maio AA, "Efecto del agregado grueso reciclado sobre las propiedades del hormigón", Bol. Téc., IMME, 45(2), (2007), 1-11.
- [7] Neville A, "The confused world of sulfate attack on concrete", Cem. Concr. Res, 34(8), (2004), 1275-1296.
- [8] Santillán LR, "Durabilidad del hormigón reciclado frente al ataque por sulfatos", Tesis doctoral, Universidad Nacional de La Plata, La Plata, (2020), 198p.
- [9] INTI, "CIRSOC 201. Reglamento Argentino de Estructuras de Hormigón", (2005).
- [10] Alderete N, Villagrán-Zaccardi Y, De Belie N, "Physical evidence of swelling as the cause of anomalous capillary water uptake by cementitious materials", Cem. Concr. Res, 120, (2019).