

SUCCIÓN CAPILAR EN HORMIGONES RECICLADOS EXPUESTOS A DIFERENTES CONDICIONES DE CURADO

Taus, V. L.¹ y Zega, C. J.²

RESUMEN

El empleo de hormigones de desecho triturados (agregados reciclados) para la elaboración de nuevos hormigones como reemplazo parcial del agregado grueso natural, esta cobrando cada vez mayor trascendencia. Cuando los porcentajes de reemplazo son bajos las propiedades de los hormigones reciclados no se ven modificadas con relación a las de los hormigones convencionales, mientras que para porcentajes superiores al 50 % las diferencias comienzan a hacerse más notorias, fundamentalmente en el aspecto durable. En este trabajo se evalúa, por medio del ensayo de succión capilar, la influencia del tipo de curado sobre hormigones elaborados con distintos porcentajes de agregado grueso reciclado (50 y 100 %), comparativamente con el de hormigones de similares características elaborados con agregados gruesos naturales, habiéndose empleado en todos los hormigones un aditivo incorporador de aire. Desde el punto de vista de la durabilidad, los resultados muestran que la deficiencia de curado resulta de mayor importancia que la incorporación de agregados reciclados. Bajo un curado apropiado, con la incorporación intencional de aire y acompañado de una baja razón a/c, el comportamiento de todos los hormigones mejora sustancialmente, incluso el elaborado con 100 % de agregados gruesos reciclados.

INTRODUCCIÓN

Motivos de distinta índole, como la menor disponibilidad de recursos naturales, las necesidades crecientes de materia prima y fundamentalmente los problemas ambientales originados por los depósitos de residuos de construcción y demolición, han llevado a la utilización de estos últimos como agregados en la elaboración de nuevos hormigones.

Los agregados reciclados obtenidos de la trituración de hormigones de desecho presentan características diferentes a las de un agregado natural debido a la presencia de mortero, proveniente del hormigón original, como parte constituyente de los mismos (1). Ello provoca modificaciones en sus propiedades, destacándose como la más importante la capacidad de absorción de agua, la cual puede ser hasta 20 veces superior a la del agregado natural (2, 3).

Cuando estos agregados son empleados en la elaboración de hormigones como reemplazo del agregado natural, se producen modificaciones en las mezclas tanto en

¹ Becario CIC-LEMIT.

Directores: A. A. Di Maio – (Investigador CONICET-LEMIT. Prof. Fac. Ing. UTN Reg. La Plata)

L. P. Traversa – (Investigador CIC-LEMIT. Director del LE MIT)

² Becario CONICET-LEMIT. Docente Fac. Ing. UNLP.

Director: A. A. Di Maio

valeriataus@gmail.com

claudio.zega@gmail.com

estado fresco como endurecido, siendo mayores cuanto más elevado es el porcentaje de agregado reciclado utilizado (4-6).

Si bien numerosos trabajos evalúan el comportamiento que presentan los hormigones elaborados con agregados gruesos reciclados, la mayoría de ellos lo hacen desde el punto de vista resistente, existiendo muy pocos concernientes al desempeño durable en lo que respecta a los mecanismos de transporte (7, 8).

Con relación a esto último, y en el caso puntual del fenómeno de capilaridad, se ha verificado que la presencia de agregados reciclados produce un incremento en los valores de succión capilar con relación a los de un hormigón convencional de similares características (siendo de mayor magnitud cuanto más elevados son el porcentaje de reemplazo y la razón a/c de la matriz cementícea), producto de la mayor porosidad de dichos agregados (9).

Por otro lado, son muchos los factores que influyen sobre la capilaridad de los hormigones, dentro de las cuales se pueden mencionar además de la razón a/c, el tipo de curado y la presencia de microburbujas de aire intencionalmente incorporadas. Respecto al curado, es sabido que un aumento en los tiempos de exposición de los hormigones en condiciones favorables de humedad y temperatura ($HR > 95\%$; $T: 20\text{ }^{\circ}\text{C}$), principalmente en las primeras edades, es de vital importancia a la hora de reducir la porosidad y por consiguiente la succión capilar (10).

La ascensión de agua por capilaridad se produce debido a la tensión superficial existente entre la superficie del líquido y las paredes del conducto capilar, la que es más intensa cuanto más pequeños son los capilares. La incorporación intencional y controlada de microburbujas de aire durante la elaboración de hormigones tiene por finalidad, una vez endurecidas las mezclas, disminuir el ascenso del líquido en el interior del capilar como consecuencia del aumento de diámetro provocado por la presencia de la burbuja.

Por otro lado, hormigones elaborados con agregados gruesos reciclados curados en forma normalizada y con aire intencionalmente incorporado han evidenciado un buen comportamiento durable (11,12).

El objetivo del presente trabajo consiste en evaluar el comportamiento durable de hormigones reciclados con aire intencionalmente incorporado sometidos a diferentes condiciones de curado, frente al mecanismo de transporte por succión capilar, comparativamente con el de un hormigón convencional.

DESARROLLO EXPERIMENTAL

Materiales y mezclas

Se realizaron tres series de hormigones identificadas como HC, HR-50 y HR-100. La primera corresponde a hormigones convencionales elaborados con agregados gruesos naturales, mientras que en la segunda y tercera se utilizaron agregados gruesos reciclados, con porcentajes de reemplazo del agregado grueso natural del 50 y 100 % en volumen respectivamente. En todos los casos se utilizó cemento portland compuesto, arena silícea natural como agregado fino y como agregado grueso natural piedra partida granítica de

tamaño máximo 25 mm. Los agregados reciclados fueron obtenidos de la trituración de hormigones de desecho de características tecnológicas desconocidas, conteniendo piedra partida granítica como agregado grueso natural. Se trabajó en todos los casos con una razón a/c de 0.34 y con una dosis de aditivo incorporador de aire de 0.03 % en peso del cemento. En todas las mezclas los agregados gruesos (naturales y reciclados) fueron empleados en la condición de saturado y superficie seca. En la Tabla 1 se presentan las proporciones de las mezclas.

Tabla 1: Proporciones de las mezclas (kg/m³).

Materiales	Hormigones		
	HC	HR-50	HR-100
Agua	144		
Cemento	419		
Agregado Fino	781		
Agregado Grueso Natural	978	489	-
Agregado Grueso Reciclado	-	446	892
Aditivo incorporador de aire	0.126		

En estado fresco se determinó el asentamiento, a través del ensayo del cono de Abrams, el peso de la unidad de volumen (P.U.V.) y el contenido de aire incorporado, siguiendo las normas IRAM 1536 (13), IRAM 1562 (14) e IRAM 1602 (15) respectivamente. Dichas propiedades se encuentran detalladas en la Tabla 2.

Tabla 2: Propiedades de los hormigones en estado fresco.

Propiedades	Hormigones		
	HC	HR-50	HR-100
Asentamiento (mm)	120	110	100
P.U.V. (kg/m ³)	2380	2325	2295
Contenido de aire (%)	5.0	4.7	4.2

Puede observarse que todos los hormigones presentan similares asentamientos, hecho atribuido al empleo de los agregados gruesos (natural y reciclado) en estado saturado. El P.U.V. muestra una clara disminución conforme aumenta el porcentaje de reemplazo, mientras que el contenido de aire se corresponde con la dosis de aditivo empleada.

Por cada serie se moldearon probetas que fueron desmoldadas a las 24 horas y curadas durante 28 días de acuerdo a las distintas modalidades que se indican a continuación:

- **Curado húmedo normalizado (28h):** llevado a cabo de acuerdo a los lineamientos dispuestos por la Norma IRAM 1534 (16): curado en cámara húmeda durante 28 días (T: 20 ± 2 °C, HR: 95 %).
- **Curado en cámara húmeda y en laboratorio (7h–21l):** muestras curadas durante 7 días en cámara húmeda y luego estacionadas durante 21 días en ambiente de laboratorio (T: 20 ± 2 °C, HR: 50 %).
- **Exento de curado - estacionamiento al exterior (28e):** muestras estacionadas durante 28 días en ambiente exterior (urbano-industrial), en un sector al resguardo de los vientos con temperatura, humedad y precipitación medias durante el mes de curado de 10 °C, 84 % y 48 mm respectivamente.

Finalizado el período de curado, se determinó la resistencia a compresión empleando cilindros de 150 x 300 mm según la Norma IRAM 1546 (17). Los resultados obtenidos estuvieron comprendidos entre 33 y 40 MPa.

Metodología de ensayo

Para evaluar la respuesta de hormigones reciclados con aire intencionalmente incorporado sometidos a distintas condiciones de curado frente el mecanismo de transporte por succión capilar, se realizó el ensayo de capilaridad siguiendo la metodología descrita en la Norma IRAM 1871 (18), sobre muestras de 50 x 75 x 50 mm.

Dicho ensayo constituye una herramienta útil para calificar a un hormigón desde el punto de vista durable, manifestando la facilidad con la que los agentes agresivos externos pueden penetrar por acción de las fuerzas capilares en la estructura porosa del hormigón. Es sabido que la succión capilar de los hormigones reciclados es superior a la de un hormigón convencional, hecho que se atribuye a la mayor porosidad intrínseca de los agregados reciclados (9). Como la incorporación intencional de aire actúa reduciendo ese ascenso capilar, es esperable que mediante este ensayo se encuentren modificaciones en el mecanismo de transporte tendientes a mejorar el comportamiento de dichos hormigones.

Mediante este ensayo se obtienen dos parámetros de caracterización del fenómeno, la *velocidad de succión capilar*, que representa la rapidez con la cual el líquido penetra en la estructura capilar del hormigón, y la *capacidad de succión capilar*, que representa la cantidad de agua requerida para producir la saturación del hormigón. Previo a la ejecución del ensayo se requiere un acondicionamiento de las muestras, consistente en el pintado de las superficies laterales con pintura epoxi y posterior secado en estufa a 50 ± 2 °C hasta peso constante. El ensayo propiamente dicho consiste en registrar la ganancia de masa a intervalos de tiempo prefijados que experimentan las muestras sometidas a la acción del contacto con agua por una de sus caras.

RESULTADOS Y ANALISIS

En la Tabla 3 se resumen las magnitudes de los parámetros obtenidos en el ensayo de succión capilar sobre los distintos hormigones para las tres modalidades de curado planteadas. Cada valor informado corresponde al promedio de 6 muestras.

Tabla 3: Velocidad y capacidad de succión capilar.

Hormigones	Curado	Parámetros de succión capilar	
		Velocidad ($g/(m^2 \cdot s^{1/2})$)	Capacidad (g/m^2)
HC	28h	4.3	2898
	7h-21l	5.1	3054
	28e	10.4	5746
HR-50	28h	4.0	3103
	7h-21l	5.4	3906
	28e	10.9	6118
HR-100	28h	4.4	3317
	7h-21l	6.0	4592
	28e	14.0	7942

En la Fig. 1 se presentan las curvas de succión capilar para el caso de curado normalizado. En la misma puede observarse que el HR-100 exhibe la mayor succión, seguida del HR-50 y del HC, consecuencia de la mayor porosidad de los agregados reciclados.

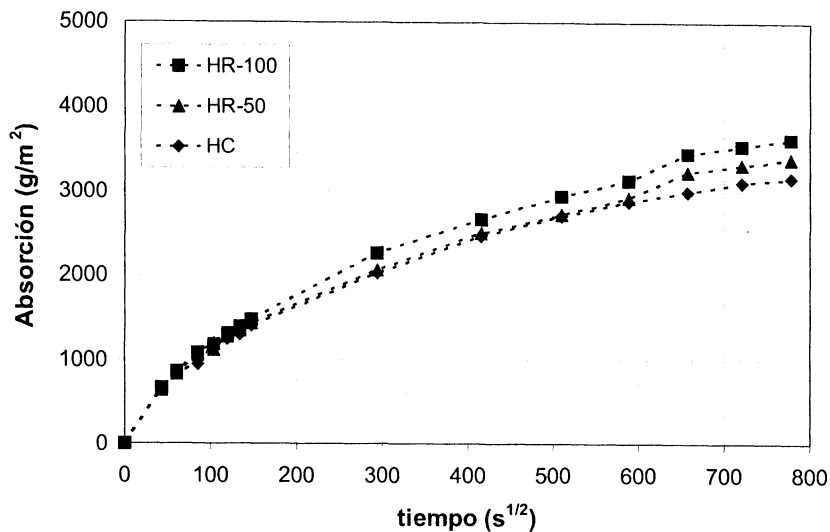


Figura 1: Succión capilar en hormigones convencionales y reciclados curados en forma normalizada.

Si bien existe una diferenciación entre las curvas, es evidente la estrecha aproximación entre ellas, siendo las velocidades de succión en los tres casos prácticamente coincidentes (ver Tabla 3), mientras que las capacidades resultan sólo un 7 y 14 % superiores al HC para los HR-50 y HR-100 respectivamente. Este comportamiento puede atribuirse al empleo de hormigones de baja razón a/c, donde los vacíos capilares que deberán ocupar los productos de hidratación serán menores que los que se tendrían con una razón a/c mayor, como resultado se obtiene una matriz compacta y "cerrada" que dificulta la participación de los agregados gruesos en el mecanismo de transporte. Por otro lado, el curado normalizado brinda un ambiente propicio de humedad y temperatura adecuado para el desarrollo de los productos de hidratación. La incorporación intencional de aire contribuye a marcar aún más el comportamiento anteriormente comentado, al disminuir el ascenso del líquido en el capilar debido a la reducción de la presión por el aumento de sección que provoca la microburbuja incorporada.

En la Fig. 2 se muestran las curvas correspondientes a los hormigones que fueron curados durante 7 días en cámara húmeda y 21 días en ambiente de laboratorio. Al igual que en el caso anterior, se observa un incremento en la velocidad y capacidad de succión conforme aumenta el porcentaje de agregado reciclado empleado (ver Tabla 3). A juzgar por los parámetros de transporte evaluados, en este caso las velocidades muestran, respecto al curado normalizado, incrementos del 18, 35 y 36 %, mientras que las capacidades aumentan 5, 26 y 38 % para el HC, HR-50 y HR-100 respectivamente.

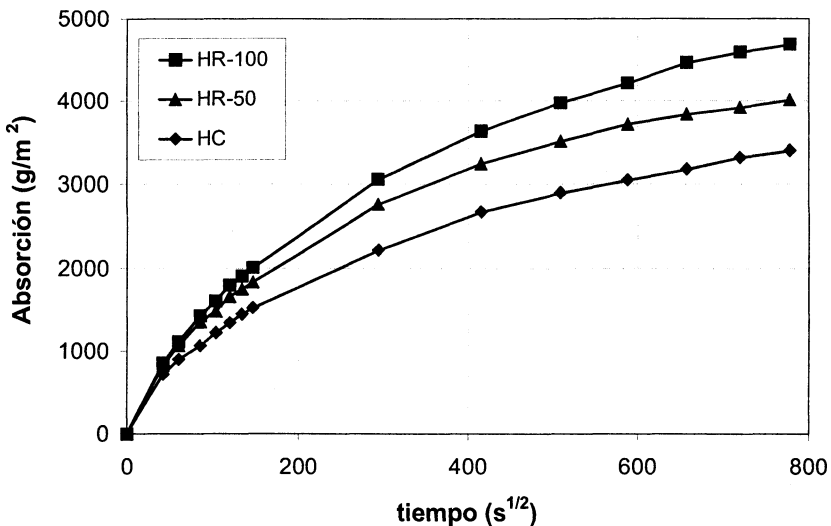


Figura 2: Succión capilar en hormigones convencionales y reciclados curados durante 7 días en cámara húmeda y 21 días en ambiente de laboratorio.

Se observa que las curvas presentan una separación más clara, hecho que estaría revelando la importancia que reviste el curado. Sin embargo, las diferencias no resultan del todo significativas a pesar de que las muestras fueron curadas tan sólo durante una semana. No debe perderse de vista que debido a la baja razón a/c empleada, el tiempo de

curado al cual fueron sometidos los hormigones, resultó suficiente para producir un nivel de segmentación aceptable en los capilares. Por otro lado, se estima que en el estado de humedad en que fueron utilizados los agregados gruesos (condición de saturados y superficie seca), el agua retenida por su estructura porosa estaría produciendo un efecto benéfico al proveer de humedad adicional luego del período de curado húmedo (19).

En la Fig. 3 se presenta el caso de muestras estacionadas durante 28 días en un ambiente exterior carente de curado. Aquí las diferencias comentadas en los casos anteriores se acentúan, observándose que la ausencia de curado produce extremados aumentos de los parámetros de transporte. Respecto al curado normalizado, la velocidad se incrementa 140, 170 y 218 %, mientras que la capacidad aumenta un 98, 97 y 139 % para el caso de los HC, HR-50 y HR-100 respectivamente. Se observa también que dichos incrementos resultan tanto más significativos conforme aumenta el porcentaje de agregado grueso reciclado.

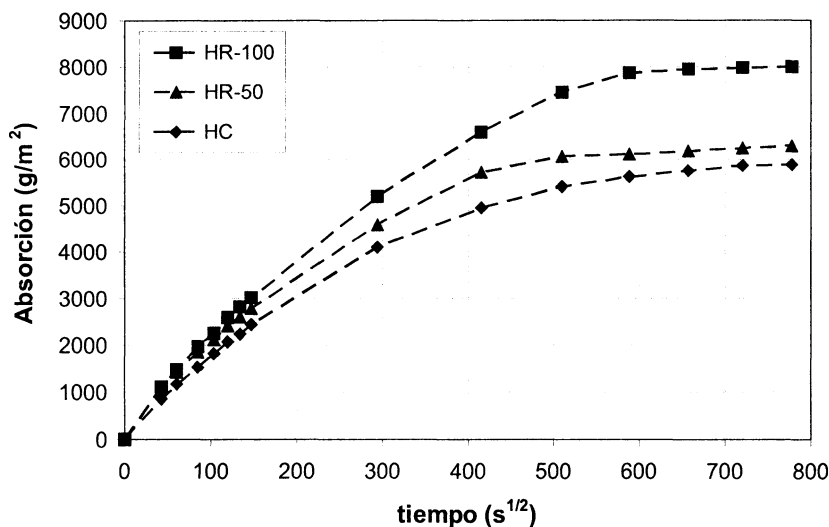


Figura 3: Succión capilar en hormigones convencionales y reciclados exentos de curado.

En la Fig. 4 se han volcado los resultados de todas las series estudiadas. En la misma se puede apreciar un grupo superior correspondiente a los hormigones que permanecieron al exterior sin curar, luego le sigue la serie curada durante una semana en cámara húmeda y los restantes 21 días en ambiente de laboratorio, y finalmente el grupo sometido a curado normalizado. Como se mencionó anteriormente, las series curadas durante 28 días en cámara húmeda presentan similar comportamiento. Puede decirse entonces que los hormigones reciclados, con aire intencionalmente incorporado curados bajo un régimen adecuado de humedad y temperatura, presentan un comportamiento satisfactorio frente al mecanismo de transporte por succión capilar, aún con el 100 % de agregados gruesos reciclados. Además de los tres hormigones mencionados se observa que el hormigón HC / 7h-21l exhibe similar tendencia. Esto último indicaría que en hormigones de baja razón *a/c* y con agregados gruesos naturales, curados durante un

período de 7 días en ambiente húmedo, la incorporación intencional de aire provee de un adecuado desempeño durable, siendo necesario en el caso de los hormigones reciclados un período de curado húmedo mayor.

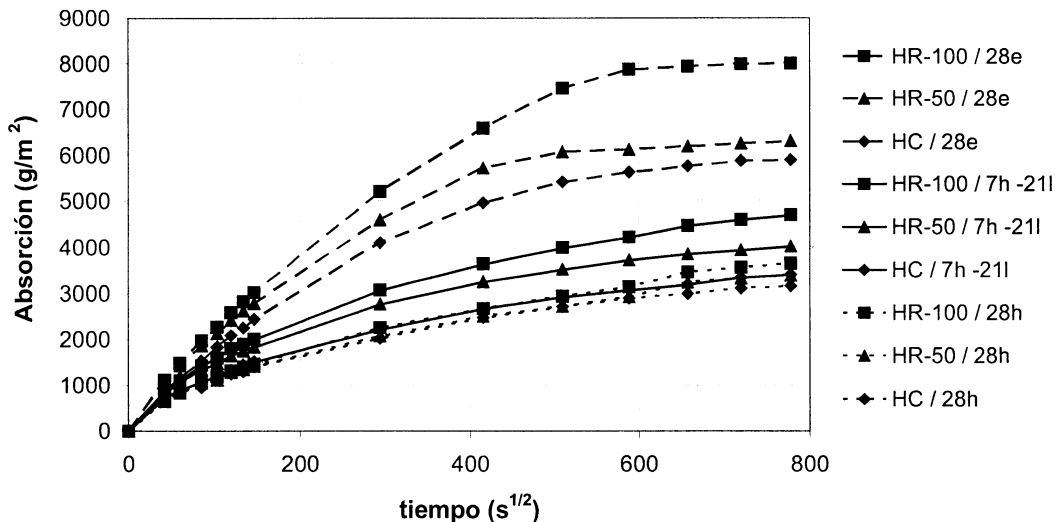


Figura 4: Succión capilar de todas las series de hormigones estudiadas.

CONCLUSIONES

De acuerdo a los resultados obtenidos en el ensayo de succión capilar sobre hormigones convencionales (HC) y reciclados (HR) de baja razón a/c, elaborados con aire intencionalmente incorporado y curados bajo distintas condiciones, se puede concluir que el empleo de agregados gruesos reciclados en reemplazo del agregado grueso natural, produce incrementos en los parámetros de succión capilar tanto más importantes cuanto mayor es el porcentaje de reemplazo.

Bajo un régimen propicio de humedad y temperatura durante 28 días (curado normalizado), las diferencias entre el comportamiento de los HR respecto al HC se atenúan en forma significativa. Cuando el curado se reduce a 7 días se produce un incremento de la succión capilar con el aumento en el porcentaje de agregado reciclado. Ante la ausencia total de curado se observa que en todos los hormigones se produce un extremado incremento en los parámetros de transporte capilar. Asimismo, las diferencias entre los HR y el HC se incrementan.

En base a lo expuesto surge que hormigones reciclados de baja razón a/c y con aire incorporado curados durante 28 días, presentan un comportamiento frente al mecanismo de transporte por succión capilar similar al del HC, aún cuando se emplee el 100 % de agregados gruesos reciclados.

REFERENCIAS

- (1) 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, Nº 111, 1986, pp. 201-246.
- (2) Zega, C.J. y Di Maio, A.A., "Influencia de las características de los agregados reciclados en la elaboración de hormigones", Memorias XV Reunión Técnica AATH, Santa Fe, 2003. Ed. CD.
- (3) Zega, C.J., Taus, V.L., Villagrán Z., Y.A. y Di Maio, A.A., "Comportamiento físico-mecánico de hormigones sometidos a reciclados sucesivos", Simposio fib "El Hormigón Estructural y el Transcurso del Tiempo", La Plata, Argentina, 2005. Vol. 2, pp. 761-768.
- (4) Katz, A., "Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete", Cement and Concrete Research, Nº 33, 2003, pp. 703-711.
- (5) Buyle-Bodin, F. and Hadjieva-Zaharieva, R., "Influence of industrially produced recycled aggregates on flow properties of concrete", Materials and Structures, Vol. 35, Nº 252, September-October 2002, pp. 504-509.
- (6) Poon, C.S., Shui, Z.H., Lam, L., Fok, H., Kou, S.C., "Influence of moisture states of natural and recycled aggregates on the slump and compressive strength of concrete", Cement and Concrete Research, Vol. 34, Nº 1, 2004, pp. 31-36.
- (7) Zaharieva, R., Buyle-Bodin, F., Skoczylas, F., Wirquin, E., "Assessment of the surface permeation properties of recycled aggregate concrete", Cement and Concrete Composites, Nº 25, 2003, pp. 223-232.
- (8) Wirquin, R., Hadjieva-Zaharieva, R., Buyle-Bodin, F., "Utilisation de L'absorption d'eau des bétons comme critères de leur durabilité – Application aux bétons de granulats recyclés", Materials and Structures, Vol. 33, Nº 230, July 2000, pp. 403-408.
- (9) Taus, V.L., "Determinación de la absorción capilar en hormigones elaborados con agregados naturales y reciclados", Ciencia y Tecnología del Hormigón, LEMIT, Nº 10, 2003, pp. 7-16.
- (10) Metha, P.K., Monteiro, P.J:M., "Concreto: estructura, propiedades y materiales", Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A. C., México, 1998.
- (11) Zega, C.J., Taus, V.L., and Di Maio, A.A., "Effect of Entrained Air on Recycled Concrete Properties", Journal of ASTM International (JAI), Vol. 3, Nº 10, 2006. (Disponible en www.astm.org.com).
- (12) Zega, C., Fornasier, G., Ponce, M. y Di Maio, A.A., "Hormigones reciclados expuestos a ciclos rápidos de congelación y deshielo", Hormigón, AATH, Nº 41, 2005, pp. 53-61.
- (13) IRAM 1536: 1978. "Hormigón fresco de cemento pórtland. Método de ensayo de la consistencia utilizando el tronco de cono".
- (14) IRAM 1562: 1978. "Hormigón fresco de cemento pórtland. Método de determinación de la densidad, el rendimiento y el contenido de aire".
- (15) IRAM 1602: 1988. "Hormigón de cemento pórtland. Método por presión para la determinación del contenido de aire en mezclas frescas de hormigones y morteros".

- (16) Norma IRAM 1534: 2004. "Hormigón. Preparación y curado de probetas en laboratorio para ensayos de compresión y de tracción por compresión diametral".
- (17) Norma IRAM 1546: 1992. "Hormigón de cemento pórtland. Método de ensayo de compresión".
- (18) Norma IRAM 1871:2004. "Método para la determinación de la capacidad y velocidad de succión capilar de agua para hormigón endurecido".
- (19) Villagrán Z., Y.A., Taus, V.L, Zega, C.J., Di Maio, A.A. y Traversa L.P. "Propiedades de transporte en hormigones convencionales y reciclados y su influencia en la corrosión de armaduras", Simposio fib "El Hormigón Estructural y el Transcurso del Tiempo", La Plata, Argentina, 2005. Vol. 1, pp. 91-98.