

INFLUENCIA DEL AGREGADO RECICLADO Y OTROS AGREGADOS DE TRITURACIÓN EN LA CONTRACCIÓN POR SECADO DE MORTEROS

L.R. Santillán¹, M.E. Sosa¹, C.J. Zega^{1,2}, Y.A. Villagrán-Zaccardi^{1,2}, A.H. Chirillano³

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

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

³ Dep. de Ingeniería Civil, Fac. Regional La Plata, Universidad Tecnológica Nacional, Argentina.

Palabras clave: agregado fino de trituración, granulometría, textura, fluidez, contracción por secado.

RESUMEN

La contracción por secado es un fenómeno de variación volumétrica en los hormigones y morteros de cemento, que viene dado por la pérdida del agua retenida en los poros de la pasta de cemento. Dicho fenómeno depende del contenido de poros de la matriz cementicia, como así también de la humedad relativa ambiente a la que el mortero este sometido y de la conectividad de los poros con el exterior. Por otro lado, el esqueleto granular del agregado en el mortero funciona como una restricción a la deformación, por lo que el factor de empaquetamiento, la forma, la textura y el módulo de elasticidad de los materiales empleados como agregado también influyen en la contracción por secado. Algunas características del agregado influyen también en la incorporación de aire del mortero durante el mezclado, hecho que también influirá en la estructura de poros de la matriz endurecida e indirectamente en el fenómeno de contracción. En el presente trabajo se analiza la contracción por secado de morteros elaborados con distintos tipos de arenas de trituración (granítica, cuarcítica y reciclada) y diferentes contenidos de pasta. Los resultados muestran la natural influencia del aumento del contenido de pasta en los morteros, pero también comportamientos diferenciados para las diferentes agregados finos de trituración, especialmente el reciclado.

INTRODUCCIÓN

La contracción por secado es un fenómeno reológico vinculado a la pérdida de humedad por parte de la pasta de cemento del mortero u hormigón. La humedad contenida en los poros de la pasta es liberada de manera progresiva, hasta lograr un equilibrio higroscópico con el ambiente. Debido a ello, la contracción por secado resulta proporcional a la humedad relativa ambiente, siendo ésta el principal factor externo que influye en el proceso de contracción. Sin embargo, esta proporcionalidad es teórica, dado que en la realidad el agua debe realizar un recorrido por la estructura de poros hasta llegar al exterior, por lo que se genera un gradiente de humedad en el hormigón. Es decir, que la contracción por secado depende también de la forma y el tamaño del elemento analizado (1).

La estructura y cantidad de poros de la pasta inciden de manera directa en la contracción, y están vinculadas con la relación agua/cemento, la temperatura de curado, la

composición del cemento y la utilización de adiciones minerales (2). Sin embargo, aunque la contracción por secado es un fenómeno que se origina en la pasta de cemento, sus valores definitivos se ven gobernados por el módulo de elasticidad del agregado, en relación al contenido relativo de pasta y agregado, dado que este último ejerce una restricción a la contracción (3).

La porosidad de la pasta de cemento depende básicamente del contenido de agua de mezclado y el contenido de aire del mortero en el estado fresco. Algunos de los métodos de diseño de mezclas más utilizados (4-5), establecen el contenido de agua según el tamaño máximo del agregado y el asentamiento requerido. Sin embargo, el contenido de agua necesario para lograr una determinada consistencia, está estrechamente vinculado con el contenido de vacíos del agregado (6), el cual es función de la granulometría del agregado, de la forma y la textura de las partículas que lo componen. En tal sentido, algunos autores concluyen que cuando el volumen de vacíos de la arena es cubierto por la pasta, el incremento en el contenido de la misma genera similares aumentos en la fluidez, para distintos tipos de arenas (7). En este sentido, la fluidez requerida de una mezcla y su relación con la geometría de las partículas de agregado puede tener incidencia sobre la contracción.

Entre las propiedades del mortero endurecido sobre las cuales influyen las características del agregado, se ha indicado que su mayor porosidad favorece la adherencia con la matriz cementicia (8). Tal es el caso de los agregados reciclados (9). Por otro lado, el incremento de la contracción por secado se asocia mayormente a una diferencia en el módulo de elasticidad del agregado antes que a su mayor porosidad (10).

Si bien la forma y textura de las partículas de agregados no intervienen directamente sobre la contracción por secado, influyen en las propiedades en estado fresco (tales como exudación, consistencia e incorporación de aire), y por lo tanto indirectamente en estado endurecido. Estos fenómenos están vinculados con la demanda de agua, produciendo todos ellos un efecto sobre la contracción de las mezclas cementicias. En tal sentido, algunos autores (11) indican que la utilización del 100% de arenas de trituración en morteros puede generar un nivel de contracción por secado hasta un 30% mayor que al utilizar agregados redondeados.

Debido a lo expuesto, este trabajo tiene por objetivo evaluar la influencia de la forma y textura de distintas arenas de trituración, naturales y reciclada, en la contracción por secado de morteros elaborados con distintas relaciones arena/cemento y relaciones entre contenidos de arena de trituración y de arena silícea optimizadas para un mínimo contenido de vacíos.

EXPERIENCIAS

Materiales

Los agregados estudiados son dos tipos de arena de trituración natural, granítica (G) y cuarcítica (C), y una arena reciclada (R) proveniente de la trituración de hormigones. Además, se empleó una arena silícea de río. En la Tabla 1 se presentan las propiedades evaluadas a cada una de las arenas empleadas. Como era de esperar, las arenas de trituración presentan un módulo de finura muy superior al de la arena de río, observándose en el caso de la reciclada una menor densidad y mayor absorción, debido a la mayor porosidad que le aporta su contenido de mortero.

Tabla 1: Propiedades de las arenas.

Arena	Módulo de finura	Densidad relativa	Absorción (%)
Silíceo	1,06	2,65	0,4
Granítica	3,59	2,69	0,6
Cuarcítica	3,82	2,55	4,1
Reciclada	3,55	2,30	10,4

Con cada una de las arenas de trituración seleccionadas, se realizaron distintas combinaciones con la arena silíceo a fin de determinar los porcentajes para los cuales se obtenía la mayor compacidad, es decir, el menor volumen relativo de vacíos (Vv). Ambos parámetros fueron determinados según lo indicado en IRAM 1548 (12). Los resultados obtenidos se presentan en la Figura 1.

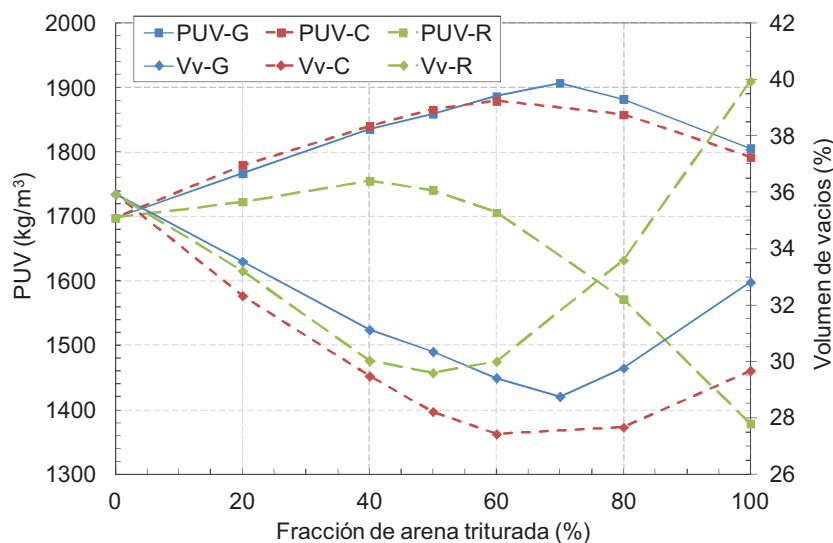


Figura 1: PUV y Vv de las distintas combinaciones realizadas.

Los mínimos Vv no coinciden con los máximos pesos por unidad de volumen (PUV), debido a las diferencias en las densidades relativas de las arenas de trituración respecto a la silíceo. Esto resulta en que para las arenas de trituración naturales (G y C), la combinación que otorga el mayor PUV es también la que presenta el menor Vv, mientras que para la arena reciclada la combinación con mayor PUV es diferente a la que otorga el menor Vv. Esto se explica debido a que la diferencia de densidades entre la arena reciclada y la arena silíceo es la más significativa entre las tres arenas de trituración. El porcentaje de arena de trituración que conlleva a la mayor compacidad es de 70%, 60% y 50% para las de granito, cuarcita y reciclado, respectivamente.

Otro hecho a resaltar es que las combinaciones con arenas granítica y reciclada presentan similares Vv mínimos, 29% y 30% respectivamente, mientras que la mezcla con arena cuarcítica presenta un Vv mínimo del 27,4%.

Morteros y ensayos

Con cada una de las combinaciones que genera el menor Vv, se elaboraron morteros variando la relación arena/cemento, adoptando relaciones 1,5, 2, 2,5 y 3, en peso. Para todos los morteros se utilizó una relación agua/cemento 0,50 y se realizaron las correcciones correspondientes a la absorción de cada tipo de arena de trituración. Se empleó además un cemento portland fillerizado (CPF 40), el cual cumple con los requisitos

de la norma IRAM 50000 (13). Los morteros fueron elaborados según el procedimiento indicado en la norma IRAM 1622 (14).

Se determinaron la consistencia y el contenido de aire incorporado en estado fresco de cada uno de los morteros elaborados. La consistencia fue evaluada mediante el asentamiento (NCh 2257/3) (15) y la fluidez en la mesa de caída libre (IRAM 1570) (16). El contenido de aire fue evaluado por el método volumétrico, según lo indicado en la norma IRAM 1634 (17).

Con cada uno de los morteros elaborados se moldearon 4 probetas de 2cmx2cmx30cm para evaluar la contracción por secado y 3 probetas de 4cmx4cmx16cm para la determinación de la resistencia a flexión y a compresión a la edad de 28 días según IRAM 1622 (14). Todas las probetas fueron desmoldadas a las 24 horas y colocadas en inmersión de agua con cal a $23\pm 2^{\circ}\text{C}$ durante 28 días para su proceso de curado.

Las probetas destinadas a la medición de la contracción por secado fueron medidas y pesadas inmediatamente después de retiradas de la inmersión. Luego se colocaron en una cámara seca ($T=23\pm 2^{\circ}\text{C}$; $\text{HR}=60\%$). Las mediciones de contracción y de pérdida de peso se repitieron a 1, 3, 7, 14, 28, 60, 90 y 180 días.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados de las propiedades evaluadas en estado fresco para cada uno de los morteros en estudio se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2: Propiedades de los morteros en estado fresco.

Morteros con arena granítica				
Propiedad	G - 3,0	G - 2,5	G - 2,0	G - 1,5
Asentamiento (cm)	3,2	9,5	11,0	12,7
Extendido (%)	89	115	144	>150
Aire (%)	6,7	4,5	2,8	2,5
Morteros con arena cuarcítica				
Propiedad	C - 3,0	C - 2,5	C - 2,0	C - 1,5
Asentamiento (cm)	0,3	2,2	7,9	12,4
Extendido (%)	43	82	119	146
Aire (%)	4,7	3,0	2,3	1,1
Morteros con arena reciclada				
Propiedad	R - 3,0	R - 2,5	R - 2,0	R - 1,5
Asentamiento (cm)	2,5	7,4	11,5	13,3
Extendido (%)	79	119	141	>150
Aire (%)	6,2	5,2	3,2	1,2

El contenido de aire disminuye con la relación arena/cemento, hecho que se explica por la mayor fluidez de los morteros, lo cual permitiría una liberación más rápida del aire.

Respecto a la fluidez, para cada una de las arenas de trituración empleadas se puede observar que los valores de asentamiento se incrementan al disminuir la relación arena/cemento, resultando similares entre los diferentes tipos de arenas para la relación 1,5. Para esta relación de 1,5 este hecho evidencia la prácticamente nula influencia de las características del agregado sobre la consistencia de los morteros, estando la misma definida por las propiedades de la pasta. Para relaciones arena/cemento mayores, se

observa que los morteros con arena cuarcítica presentan un asentamiento menor, que podría atribuirse al menor volumen de aire que incorporaron, originando una mayor trabazón entre las partículas del agregado. Similar comportamiento puede observarse en el caso del extendido, evidenciándose mayores consistencias en los morteros con la arena C con relaciones arena/cemento elevadas, mientras que para relaciones bajas todos los morteros muestran un comportamiento semejante.

Los resultados de resistencia a flexión y a compresión determinados a la edad de 28 días se presentan en la Tabla 3. En el caso de la resistencia a flexión, no se observa una tendencia definida en cuanto a la variación de la misma con la relación arena/cemento, aunque se puede apreciar una menor dispersión de resultados para la relación 1,5. Esto se explica porque al disminuir dicha relación aumenta el contenido de pasta de cemento, aumentando el espesor de la película de pasta que recubre las partículas del agregado. En estas condiciones, las características del agregado pierden preponderancia, estando las propiedades mecánicas gobernadas por las propiedades de la matriz cementicia. Además, se puede observar que los morteros con la arena G presentan, en general, resistencias a flexión más elevadas, mientras que las mayores resistencias a compresión se obtuvieron con la arena R. Esto se ve claramente en las relaciones flexión/compresión.

Tabla 3: Resistencias a flexión y a compresión.

Relación arena/cemento	Resistencia a flexión (MPa)			Resistencia a compresión (MPa)			Relación flexión/compresión		
	G	C	R	G	C	R	G	C	R
1,5	7,1	6,5	6,5	38,4	36,3	41,7	0,18	0,18	0,16
2,0	7,2	6,1	6,2	33,4	38,2	46,2	0,22	0,16	0,13
2,5	7,2	6,4	6,2	37,8	34,9	45,0	0,19	0,18	0,14
3,0	6,1	7,1	5,9	40,2	39,7	41,1	0,15	0,18	0,14

En las Figuras 2, 3 y 4 se presentan la pérdida de peso relativa de los morteros con las arenas G, C y R, respectivamente, registrada en las probetas durante los 180 días. En todos los casos, se puede observar mayor pérdida de peso al aumentar el contenido de pasta (menor relación arena/cemento), la cual se estabiliza entre los 40 y 60 días. Además, se puede notar que la pérdida de peso porcentual de los morteros con arena reciclada es mayor que en los otros morteros. Esto es en términos relativos, pues las probetas de arena reciclada son las más livianas. En términos absolutos, la pérdida de agua para bajas relaciones arena/cemento es similar para las diferentes arenas evaluadas, mientras que para las relaciones más altas la pérdida de peso absoluta es menor en los morteros con arena cuarcítica.

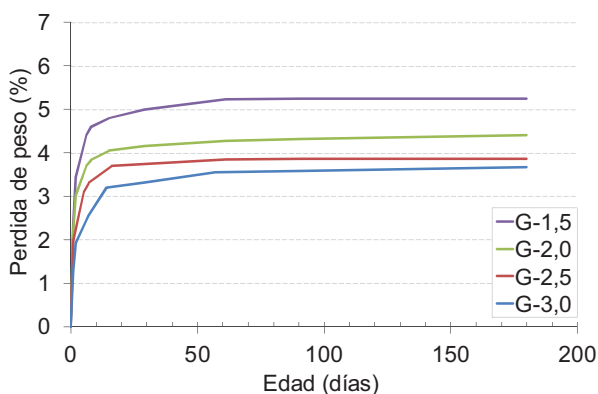


Figura 2: Pérdida de peso relativa en morteros con arena granítica.

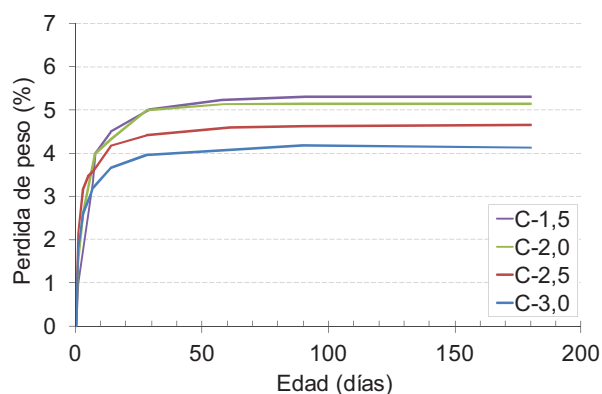


Figura 3: Pérdida de peso relativa en morteros con arena cuarcítica.

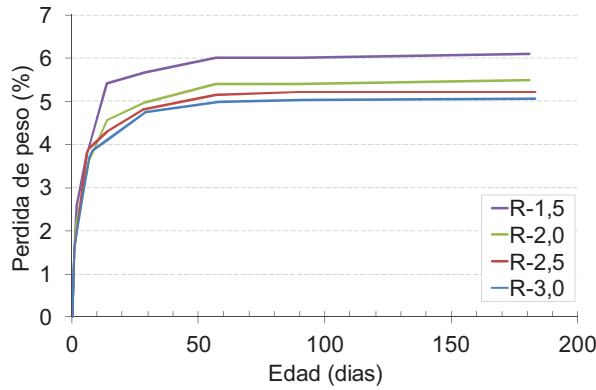


Figura 4: Pérdida de peso relativa en morteros con arena reciclada.

En las Figuras 5, 6 y 7 se presentan los resultados de la contracción por secado de los morteros con arenas G, C y R, respectivamente, evaluada hasta la edad de 180 días. En todos los casos se puede observar que la contracción por secado se incrementa al disminuir la relación arena/cemento, debido a un mayor contenido de pasta y una menor restricción por parte de los agregados. Además, para los morteros con arena granítica, desde las primeras edades se pueden apreciar diferencias en los valores de contracción en función de la relación arena/cemento, mientras que para los morteros con arena cuarcítica y reciclada dichas diferencias comienzan a ser visibles a partir de los 10 días.

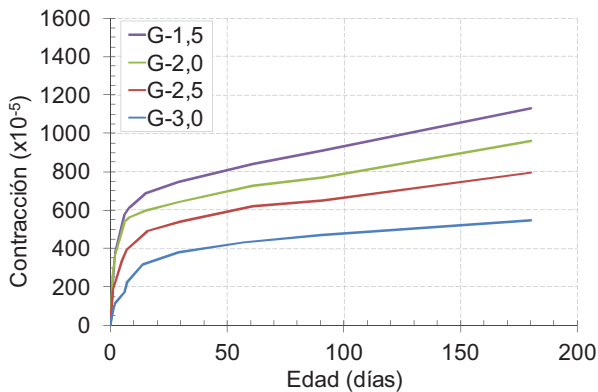


Figura 5: Contracción por secado de morteros con arena granítica.

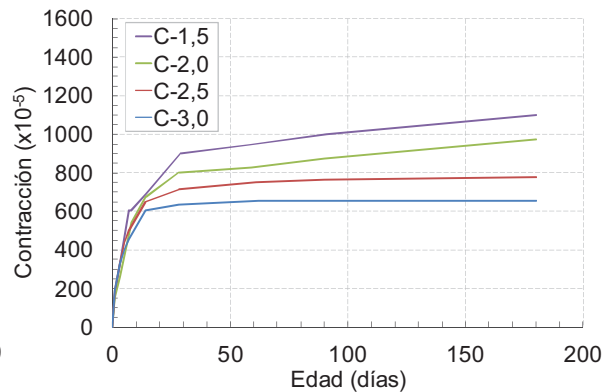


Figura 6: Contracción por secado de morteros con arena cuarcítica.

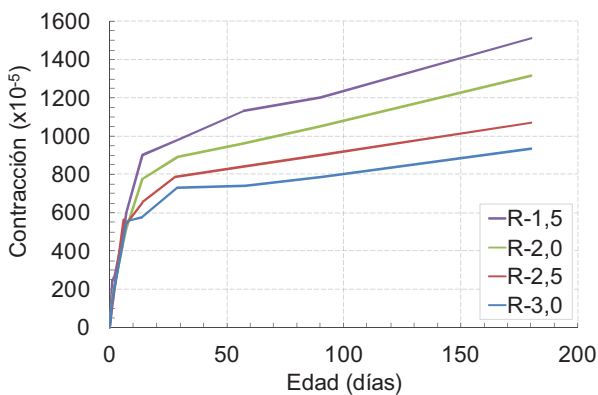


Figura 7: Contracción por secado de morteros con arena reciclada.

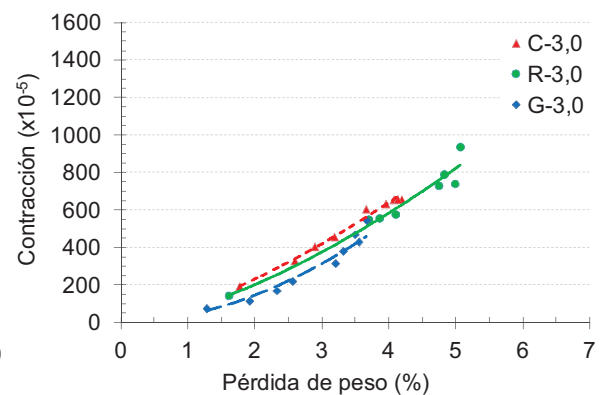


Figura 8: Relación contracción vs. pérdida porcentual de peso

De las Figuras 5 y 6 se puede observar que los morteros con arena granítica y cuarcítica presentan similares valores de contracción a la edad de 180 días, aunque los incrementos de contracción a las primeras edades resultan más importantes en los morteros con cuarcita. En el caso de los morteros con arena reciclada, se aprecian valores de contracción superiores a los registrados para los morteros con arenas naturales, a las diferentes edades evaluadas.

La Figura 8 presenta las relaciones entre la contracción y la pérdida porcentual de humedad. En todos los casos, las diferencias encontradas de contracción entre los diferentes morteros en cuanto a tipo y contenido de arena de trituración deben ser atribuidas primeramente a la velocidad de pérdida de humedad de las muestras, y en segundo término a los diferentes módulos de elasticidad de las arenas de trituración empleadas, donde la arena G aporta la mayor restricción relativa a la deformación por secado. De esta forma, a iguales características de la pasta, una estructura de poro más cerrada y un mayor módulo de elasticidad del agregado resultarían en menores tensiones de contracción y menores deformaciones resultantes para resistir las mismas, respectivamente.

Al comparar las curvas de contracción con las de pérdida de peso, se puede observar que esta última se estabiliza aproximadamente a la misma edad para todos los morteros, mientras que no ocurre lo mismo con la contracción, la cual continúa aún a la edad de 180 días. Este hecho debe ser atribuido a los diferentes tamaños de poros que presenta la pasta de cemento. Al principio, se pierde el agua de los poros grandes, que representa la mayor pérdida de peso y también mayor contracción, siendo luego el agua de los poros pequeños la que empieza a ser liberada, la cual representa una mínima pérdida de peso, aunque genera grandes modificaciones en la estructura interna de la pasta hidratada (2).

CONCLUSIONES

A partir de los resultados hallados en estos estudios respecto al empaquetamiento granular de distintas arenas de trituración, en conjunto con una arena silíceo natural, como así también respecto al comportamiento de morteros elaborados con distintas relaciones arena/cemento, particularmente sobre la contracción por secado, surge que:

- El máximo empaquetamiento de las distintas arenas de trituración empleadas se produce para diferentes porcentajes de mezcla con la arena de río, resultando también diferentes los porcentajes de vacíos de cada una de ellas debido a sus correspondientes características geométricas.
- Para bajas relaciones arena/cemento, la consistencia de los morteros es similar para las diferentes arenas de trituración evaluadas, prevaleciendo las características de la pasta. Al aumentar dicha relación, los morteros pierden fluidez, debido a la incidencia del agregado.
- Los morteros con arena cuarcítica y granítica presentaron similares valores de contracción a la edad de 180 días, pero la contracción inicial para los morteros de arena granítica fue menor. Esto se atribuye a una estructura diferente de poros que retrasa el escape de la humedad retenida en la pasta, y a un diferente módulo de elasticidad de las partículas de arena.
- Los morteros con arena reciclada presentaron mayores valores de contracción en comparación con los morteros con arenas granítica y cuarcítica a las diferentes edades evaluadas, debido a su mayor velocidad de pérdida de humedad y al menor módulo de elasticidad de los mismos como consecuencia de su mayor porosidad.

REFERENCIAS

- 1) Bissonnette B., Pierre P., Pigeon M.. "Influence of key parameters on drying shrinkage of cementitious materials", *Cement and Concrete Research*, 29 (10), (1999), pp. 1655-1662.
- 2) Mindess S., Young J. "Concrete". Prentice Hall PTR, (1981), 671p.
- 3) Mehta K., Monteiro P. "Concreto: estructura, propiedades y materiales". IMCYC, (1998), 381p.
- 4) ICPA. "Diseño racional de mezclas de hormigón – método ICPA". Instituto del Cemento Portland Argentino.
- 5) ACI 211.1. "Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete", American Concrete Institute, (2002).
- 6) Neville A.M. "Tecnología del Concreto", Instituto Mexicano del cemento y del Concreto, A:C., Tomo I, (1977).
- 7) Cabrera O.A., Traversa L.P., Ortega N.F. "Fluidez de morteros cementicios con arenas machacadas". *Materiales de Construcción*, 60 (30), (2010), pp. 115-130.
- 8) Chan Yam J.L., Carcaño R.S., Moreno E.I. "Influencia de los agregados pétreos en las características del concreto". *Ingeniería*, 7-2, (2003), pp. 39-46.
- 9) Casuccio M., Giaccio G., Zerbino R. "Aderenza matrice-aggregato in calcestruzzo riciclato". *ENCO J*, 29, (2005), pp. 10-13. (www.enco-journal.com/journal/ej29/giornale.htm)
- 10) ACI Committee 224. "ACI 224R - Control de la Fisuración en Estructuras de Hormigón". American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., 53p., (2008).
- 11) Traversa, J.P, Cabrera, A. "Evaluación de la contracción por secado en morteros con arenas naturales de trituración". *Hormigón*, 37, (2001), pp. 45-54.
- 12) IRAM 1548. Agregados. Determinación de la densidad a granel y de los espacios vacíos. Instituto Argentino de Normalización y Certificación. (2003).
- 13) IRAM 50000. Cemento. Cementos para uso general. Composición, características, evaluación de la conformidad y condiciones de recepción. Instituto Argentino de Normalización y Certificación. (2010).
- 14) IRAM 1622. Cemento portland. Determinación de resistencias mecánicas. Instituto Argentino de Normalización y Certificación. (2006).
- 15) NCh 2257/3. Morteros – Determinación de la consistencia – Parte 3: Método del asentamiento del cono. Instituto Nacional de Normalización. Chile. (1996).
- 16) IRAM 1570. Morteros para mampostería. Determinación de la consistencia. Método de escurrimiento. Instituto Argentino de Normalización y Certificación. (1994).
- 17) IRAM 1634. Cemento portland. Método para la determinación del contenido de aire en morteros. Instituto Argentino de Normalización y Certificación. (1963).