

INFLUENCIA DEL TIPO DE AGREGADO DEL HORMIGÓN DE ORIGEN SOBRE LAS PROPIEDADES DE LOS AGREGADOS GRUESOS RECICLADOS

Zega, C. J.¹, Di Maio, A. A.² y Zerbino, R.³

RESUMEN

La industria de la construcción se caracteriza por ser una gran generadora de desechos, a la vez que utiliza los desechos de otras industrias como materiales adicionales para la elaboración de hormigones. En tal sentido, desde hace más de dos décadas existe una tendencia mundial vinculada con la reutilización de hormigones de desecho triturados como agregados. Las propiedades de estos agregados reciclados difieren de las de los agregados naturales principalmente en su absorción y densidad. Existen antecedentes acerca de la influencia de la composición del hormigón, como por ejemplo su razón a/c, sobre las propiedades de estos nuevos agregados, sin embargo no se tiene conocimiento sobre el efecto del tipo de agregado grueso natural que contiene el hormigón de origen. En este estudio se realiza una caracterización de las propiedades de agregados gruesos reciclados (AGR) obtenidos de la trituración de hormigones convencionales conteniendo cuatro tipos diferentes de agregados gruesos naturales, y elaborados cada uno de ellos con dos niveles resistentes. Además se evalúa el comportamiento mecánico de hormigones elaborados dichos AGR, utilizándolos en un 75 % en volumen como reemplazo del correspondiente agregado grueso natural. Se presentan los resultados de resistencia a compresión, tracción indirecta y flexión, como así también el módulo de elasticidad estático.

INTRODUCCION

La industria de la construcción se ha caracterizado a lo largo de los años por estar fuertemente vinculada con el medioambiente desde dos perspectivas diferentes, por un lado es generadora de desechos pero al mismo tiempo presenta una capacidad para el aprovechamiento y reutilización de los mismos. En tal sentido, utiliza residuos provenientes de otras industrias como adiciones en la fabricación del cemento, para la elaboración de hormigones, o simplemente como material de relleno otorgándoles una disposición final.

En Argentina aún existe una amplia disponibilidad de agregados naturales aptos para la elaboración de hormigones aunque, en muchos casos, es necesario transportarlos a grandes distancias. Además, se puede dar la situación que determinados tipos de rocas naturales presenten diferentes problemas relacionados con su durabilidad, como puede ser la reacción álcali-agregado o la presencia de arcillas expansivas. A estos hechos debe sumarse el inconveniente que ocasiona la falta de lugares para la disposición de los desechos de construcción, situación que ya se produce en los grandes centros urbanos y que está generando una acumulación importante de los mismos.

¹ Becario CONICET, LEMIT. Docente Fac. Ing., UNLP

claudio.zega@gmail.com

² Investigador CONICET, LEMIT. Sub-director LEMIT

³ Investigador CONICET, LEMIT, UNLP

Una de las medidas propuestas para atenuar dichos inconvenientes es el uso de agregados reciclados obtenidos de la trituración de hormigones de desecho en reemplazo de los agregados naturales para la elaboración de hormigones. De esta forma, se estaría cumpliendo un ciclo ideal donde el material de desecho, una vez agotada su vida útil, vuelve a formar parte del material original.

Es sabido que las características de composición, resistencia, forma y textura superficial de las partículas que componen los agregados naturales producen modificaciones en las propiedades del hormigón (1).

Debido a la composición que presentan los agregados reciclados, mortero y roca natural en proporciones variables, sus propiedades se ven modificadas con relación a la de los agregados naturales, afectando principalmente su densidad, absorción de agua y desgaste (2-4).

En algunos estudios se ha analizado la influencia que tiene el nivel de resistencia del hormigón de origen sobre las propiedades de los agregados gruesos reciclados obtenidos a partir de su trituración (4-6). Sin embargo, no se conocen estudios que evalúen la influencia del tipo de agregado grueso natural del hormigón de origen sobre las propiedades de los agregados reciclados y cómo éstas pueden modificar el comportamiento mecánico del hormigón reciclado.

Este estudio tiene por objetivo evaluar el efecto que tiene el tipo de agregado grueso natural que contiene el hormigón de origen sobre las propiedades físico-mecánicas de los agregados gruesos reciclados (AGR). Para ello se seleccionaron cuatro agregados gruesos naturales (AGN), con diferentes características de origen, composición, forma y textura superficial. Se comparan las propiedades determinadas sobre los AGR y AGN tales como granulometría, densidad, absorción de agua, desgaste "Los Angeles" e índice de lajidad, y se analizan las resistencias a compresión, tracción por compresión diametral y flexión, y los módulos de elasticidad estático de los hormigones con ellos elaborados.

EXPERIENCIAS

Plan de trabajo

Se seleccionaron cuatro agregados gruesos naturales (AGN) que presentan marcadas diferencias en su composición, propiedades físicas y mecánicas, forma y textura superficial de las partículas. Todos ellos se emplean con frecuencia en diversas regiones de nuestro país. Se utilizaron tres piedras partidas, un granito (G) de la zona de Olavarría, una cuarcita (Q) de la zona de Mar del Plata, y un basalto (B) de la Provincia de Córdoba, y un canto rodado silíceo (S) procedente del Río Uruguay.

Con cada AGN se elaboraron hormigones con dos niveles de resistencia (razones a/c 0.45 y 0.65), manteniendo constante el volumen de agregado grueso. Los hormigones fueron curados durante 28 días y posteriormente triturados mediante una trituradora de mandíbulas, procediendo luego a su tamizado para obtener ocho agregados gruesos reciclados (AGR) de igual tamaño nominal que los naturales (6 - 20 mm). En este trabajo los agregados reciclados son identificados con la letra correspondiente al tipo de AGN que

contienen, anteponiendo la letra R y posponiendo la razón a/c del hormigón de origen (RG45, RG65, RQ45, RQ65, RB45, RB65, RS45 y RS65).

Sobre los AGN y AGR se determinaron las propiedades físico-mecánicas tales como granulometría, densidad en condición de saturado y superficie seca, absorción de agua por inmersión en 24 horas, desgaste "Los Angeles" e índice de lajosidad.

Con cada agregado grueso reciclado se elaboró un hormigón reciclado (HR) de características similares a las del hormigón original (H); se mantuvieron constantes las proporciones de los materiales y la razón a/c y el tipo de AGN utilizado, reemplazándolo en un 75 % en volumen por el AGR obtenido de la trituración del correspondiente hormigón original. De este modo, el agregado RG45 fue utilizado para la elaboración de un hormigón de razón a/c 0.45 combinado con 25 % del agregado natural granítico. Este hormigón reciclado se denomina HRG45. Para los demás hormigones se sigue la misma nomenclatura según el tipo de AGR utilizado y la razón a/c del hormigón elaborado.

Todos los hormigones fueron mantenidos durante 28 días en condiciones normalizadas de humedad y temperatura (T: 23 ± 2 °C; HR: 95 %). Luego se determinaron las resistencias a compresión y módulo de elasticidad estático sobre muestras cilíndricas de 150 x 300 mm, resistencia a tracción por compresión diametral sobre cilindros de 100 x 150 mm, y módulo de rotura en flexión sobre prismas de 75 x 100 mm de sección.

Propiedades de los agregados gruesos

Como se mencionó anteriormente, los AGN seleccionados poseen partículas con marcadas diferencias de forma y textura superficial. Asimismo, debido a sus diferentes orígenes, se observan diferentes tamaños de grano y la resistencia de la roca que los compone también resulta sumamente variable. En la Tabla 1 se resumen las características físicas de forma, textura superficial y tamaño de grano de cada uno de ellos.

Tabla 1. Características de los agregados gruesos naturales.

Agregado	Características físicas		
	Forma	Textura superficial	Tamaño de grano de la roca de origen
G	irregular	rugosa	medio
Q			
B	redondeada	lisa	Fino
S			

Con relación al tamaño de los agregados gruesos reciclados, en la Fig. 1 se presentan las granulometrías determinadas sobre cada uno de los ocho AGR, junto con los límites establecidos en el reglamento Argentino CIRSOC (7) para agregados naturales de igual tamaño máximo nominal.

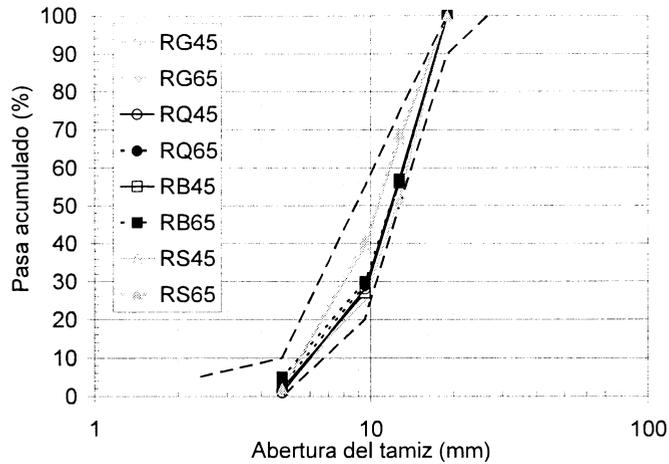


Figura 1. Granulometría de los agregados gruesos reciclados.

Se observa que los AGR presentan distribuciones granulométricas semejantes, independientemente del tipo de agregado grueso natural y de la razón a/c del hormigón del cual provienen, ajustándose a los límites granulométricos normalizados para los AGN. Este hecho pone de manifiesto que la granulometría de los AGR no resulta influenciada de manera importante por las diferentes características de forma y textura de los agregados gruesos naturales que contenían los hormigones de origen. Además, y en coincidencia con la bibliografía, surge que la granulometría del agregado grueso no se ve mayormente afectado por el nivel de resistencia del hormigón original (4, 6).

En la Tabla 2 se informan la densidad saturada y superficie seca (D_{ss}), la absorción de agua en 24 horas (Ab), el desgaste "Los Angeles" (DLA) y el índice de lajosisidad (IL) determinados sobre los AGR en estudio y los correspondientes a cada AGN.

Tabla 2. Propiedades de los agregados gruesos naturales y reciclados.

	G	RG45	RG65	Q	RQ45	RQ65	B	RB45	RB65	S	RS45	RS65
D _{ss}	2.72	2.52	2.51	2.48	2.37	2.35	3.03	2.66	2.65	2.60	2.45	2.44
Ab (%)	0.3	4.0	4.1	2.0	5.9	6.0	0.8	3.9	4.5	0.5	3.9	4.4
DLA (%)	25.0	34.8	37.4	59.8	52.2	55.4	9.1	25.3	30.3	18.8	31.6	37.0
IL (%)	19.2	12.9	10.1	25.3	14.9	12.7	26.7	11.3	9.9	9.9	11.2	10.4

La densidad de cada AGR resulta inferior a la del correspondiente agregado grueso natural, no existiendo una diferencia apreciable entre los obtenidos de hormigones con distinta razón a/c, lo cual resulta coincidente con lo indicado en la bibliografía (6, 8). Las disminuciones en los valores de densidad de los AGR fueron de aproximadamente 7, 4, 12 y

6 % con relación a las de los agregados G, Q, B y S respectivamente. Una particularidad que se observa es que los agregados reciclados RB presentan densidades superiores a la de los agregados naturales Q y S, independientemente de la razón a/c del hormigón de origen.

Respecto a la absorción de agua, como era de esperar, se observan aumentos importantes en los valores determinados sobre los AGR en referencia a los del AGN, para los diferentes tipos de agregados naturales utilizados, hecho que se encuentra directamente vinculado con la presencia de mortero como parte constituyente de los mismos. Las absorciones de los AGR resultaron aproximadamente 14, 3, 5 y 8 veces mayores que las obtenidas para los agregados G, Q, B y S respectivamente.

En algunos estudios se indica que la absorción de agua de los AGR resulta independiente de la calidad del hormigón de origen (4, 5, 8), mientras que en otros se observan diferencias mínimas (9). Esta aparente contradicción puede estar generada por el tipo de AGN que contenía cada hormigón de origen. De los resultados indicados en la Tabla 2 surge que, para determinados tipos de AGN la absorción de los AGR provenientes de un hormigón con razón a/c 0.65 es superior a la de los AGR que provienen de un hormigón con razón a/c 0.45, mientras que para otros agregados naturales las diferencias son despreciables. Otro hecho que se observa es que el agregado reciclado RQ45 posee una absorción 40 % mayor que la correspondiente a otros AGR obtenidos a partir de hormigones elaborados con otro tipo de AGN y con mayor razón a/c.

De los valores de abrasión por desgaste "Los Angeles" indicados en la tabla surge que en general los agregados gruesos reciclados presentaron pérdidas superiores a la de los correspondientes agregados naturales, para G, B y S los incrementos son del 45, 200 y 82 % respectivamente. Puede apreciarse también que el mayor desgaste en los AGR se produce cuando proceden de los hormigones con una matriz más débil (a/c 0.65), hecho esperable y coincidente con lo indicado en la bibliografía (6, 10). Sin embargo en el caso del agregado cuarcítico se da un hecho particular, ya que los agregados reciclados presentaron un desgaste inferior al del AGN (~ 5 %). Si bien dicho porcentaje puede parecer poco significativo, se debe resaltar que lo esperable es que los agregados reciclados presenten un desgaste superior al del agregado natural que contienen, producto de la presencia de mortero (2-4).

Otro hecho distintivo que puede apreciarse de los resultados obtenidos en el ensayo de desgaste "Los Angeles", es que los agregados reciclados RG, RB y RS presentan pérdidas inferiores a la del agregado natural Q, aún para los provenientes de hormigones con la mayor razón a/c evaluada. Por otro lado, al igual que sucede con la absorción, el agregado RQ45 presenta un desgaste superior al de agregados reciclados provenientes de hormigones que contienen otros tipos de AGN y con mayor razón a/c.

Estos resultados ponen en evidencia que los AGR pueden tener incluso mejores propiedades que algunos tipos de AGN habitualmente empleados.

En el ensayo de lajosidad se observa que los AGR obtenidos de los hormigones que contienen agregados de forma irregular (G, Q y B) presentan menores índices de lajas que los correspondientes AGN. En los hormigones que se trituran, los planos de debilidad (interfaces) se encuentran distribuidos sin una orientación definida, provocando que las partículas de los AGR presenten similares dimensiones en las tres direcciones. Este hecho

resulta acentuado para la razón a/c 0.65, donde los AGR presentan una menor lajosidad, verificándose para los cuatro tipos de AGN utilizados. La menor resistencia de la matriz de los hormigones con razón a/c 0.65 produciría una mayor pérdida de mortero durante la trituración de los mismos haciendo que las partículas de los AGR resulten menos lajosas que las provenientes de los hormigones con razón a/c 0.45. Cabe comentar que el tipo de trituradora influye sobre la forma de las partículas de los agregados resultantes (11, 12), con lo cual se podría esperar que el mismo efecto se produzca sobre las partículas de agregados reciclados obtenidos de la trituración de hormigones.

En general de los resultados obtenidos sobre las propiedades de los AGR, surge que el tipo de agregado grueso natural que contiene el hormigón original tiene una mayor influencia que la razón a/c del mismo sobre propiedades como la absorción de agua y la resistencia a la abrasión.

Propiedades de los hormigones

Para la elaboración de los hormigones reciclados, debido a la elevada capacidad de absorción de los AGR y con el fin de dar una mayor influencia a la presencia del agregado reciclado y no introducir otras variables, se decidió mantener el contenido de agua de las mezclas recurriendo a la utilización de un aditivo plastificante para lograr asentamientos semejantes a los obtenidos en los hormigones originales. Para evitar que el aditivo fuera absorbido por los agregados reciclados, se premezclaron los materiales con un 70 % del agua total, el 30 % restante fue incorporada posteriormente junto con el aditivo. De este modo fue posible obtener en todos los casos hormigones de consistencia plástica.

Las proporciones e identificación de las mezclas elaboradas con los diferentes agregados gruesos naturales y reciclados se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3. Proporciones de las mezclas (kg/m³).

Materiales	Hormigones con razón a/c 0.45							
	HG45	HRG45	HQ45	HRQ45	HB45	HRB45	HS45	HRS45
Agua	165	165	180	180	165	165	155	155
Cemento	370	370	400	400	370	370	360	360
Agr. fino	855	855	780	780	855	855	870	870
AGN	980	245	920	230	1095	275	955	235
AGR	-	695	-	660	-	735	-	685
Aditivo	-	1.85	-	2.00	-	1.85	-	1.80
Materiales	Hormigones con razón a/c 0.65							
	HG65	HRG65	HQ65	HRQ65	HB65	HRB65	HS65	HRS65
Agua	165	165	180	180	165	165	155	155
Cemento	255	255	275	275	255	255	245	245
Agr. fino	950	950	880	880	950	950	960	960
AGN	980	245	920	230	1095	275	955	235
AGR	-	695	-	660	-	735	-	685
Aditivo	-	1.30	-	1.40	-	1.30	-	1.25

Tabla 5. Propiedades mecánicas de los hormigones originales y reciclados.

Hormigón	f _c (MPa)		E (GPa)		f _{cd} (MPa)		MR (MPa)	
	Promedio	s	Promedio	s	Promedio	s	Promedio	s
HG45	36.6	2.3	33.2	1.1	4.1	0.2	5.0	0.1
HRG45	39.4	2.9	28.7	1.7	3.8	0.4	5.7	0.2
HG65	25.4	0.2	28.8	0.4	3.2	0.1	3.9	0.2
HRG65	26.0	1.3	27.0	1.8	3.0	0.1	4.2	0.4
HQ45	40.1	2.8	26.5	0.4	4.1	0.2	6.0	0.2
HRQ45	42.6	1.4	25.8	0.4	4.2	0.2	6.5	0.2
HQ65	25.9	1.2	23.3	0.4	3.0	0.1	4.4	0.4
HRQ65	32.2	1.3	24.2	0.2	3.4	0.2	5.1	0.2
HB45	38.9	1.5	37.9	0.8	4.3	0.3	6.2	0.2
HRB45	40.7	2.5	31.1	1.6	3.8	0.4	6.4	0.1
HB65	25.1	0.5	29.1	1.8	3.1	0.2	4.1	0.1
HRB65	26.1	0.7	28.7	1.6	2.9	0.1	4.4	0.3
HS45	35.4	0.2	41.3	1.3	3.6	0.2	5.2	0.3
HRS45	38.7	1.2	32.9	1.6	3.7	0.2	6.1	0.3
HS65	22.4	0.8	34.1	3.2	3.2	0.3	4.3	0.2
HRS65	26.5	0.7	28.5	0.5	3.2	0.2	4.9	0.2

En la Tabla 5 se presentan los resultados de resistencia a compresión (f_c), módulo de elasticidad estático (E), resistencia a tracción por compresión diametral (f_{cd}) y módulo de rotura en flexión (MR) de cada uno de los hormigones estudiados, correspondiendo cada valor informado al promedio y desvío estándar (s) de tres ensayos.

Las resistencias a compresión de los hormigones originales (H) y reciclados (HR), para las razones a/c 0.45 y 0.65, se comparan en las Figs. 2 y 3 respectivamente. Puede observarse que la resistencia a compresión de los hormigones reciclados resultó superior a la del hormigón de original del cual se obtuvieron los agregados reciclados, independientemente del nivel resistente de los mismos. Este hecho debe ser atribuido a una reducción de la razón a/c efectiva, producto del empleo de los AGR en estado seco al aire, y a la mayor rugosidad superficial que presentan los agregados reciclados, que posibilitan una mejora sustancial en la zona de interfaz al beneficiar la adherencia con la nueva matriz. Los incrementos de resistencia de los HR fueron del 8, 6, 5 y 9 % (a/c 0.45) y del 3, 24, 4 y 18 % (a/c 0.65), para los elaborados con los agregados RG, RQ, RB y RS respectivamente.

Se pueden apreciar mayores incrementos de la resistencia a compresión en el caso de los hormigones de razón a/c 0.65 elaborados con los agregados reciclados de tipo cuarcítico y rodado silíceo. Este hecho debe atribuirse a la mejoras en la zona de interfaz, sumada en el caso del agregado cuarcítico, a la mayor resistencia del agregado reciclado (menor desgaste), mientras que en el caso del agregado silíceo, al cambio de forma que sufre la partícula de agregado, que para el natural es redondeada y lisa, y para el reciclado es irregular y rugosa. Si bien ambos hechos son aplicables también a los hormigones con menor razón a/c, resultan claramente evidenciables en el caso de los HRQ65 y HRS65 debido a la menor resistencia de la nueva matriz.

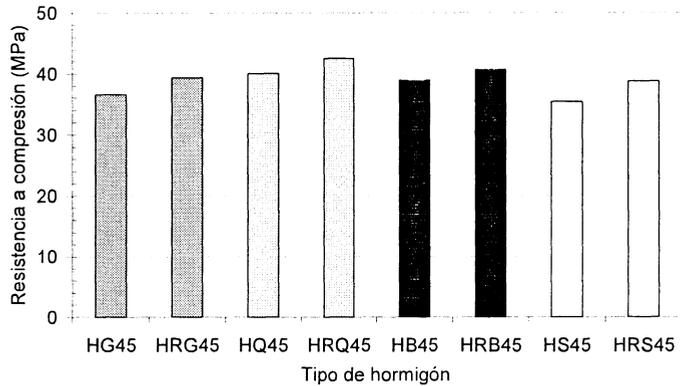


Figura 2. Resistencia a compresión de los hormigones originales y reciclados de razón a/c 0.45.

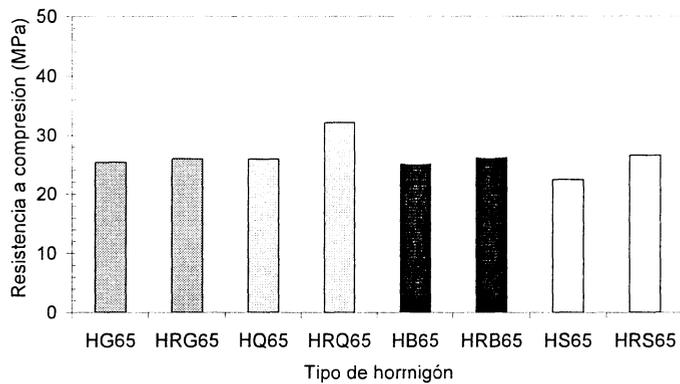


Figura 3. Resistencia a compresión de los hormigones originales y reciclados de razón a/c 0.65.

Las resistencias a tracción por compresión diametral, obtenidas para las razones a/c 0.45 y 0.65, se comparan en las Figs. 4 y 5 respectivamente. Para la razón a/c 0.45 se observa que los hormigones HG45 y HB45 presentan resistencias a tracción superiores a la de los hormigones elaborados con los agregados reciclados del mismo tipo (HRG45 y HRB45) a pesar de que en estos últimos la resistencia a compresión fue algo mayor. Este hecho es atribuido a la existencia de interfaces en el interior de los agregados reciclados que favorecen la fractura a través de los mismos, lo que da lugar a una menor tortuosidad en la propagación de fisuras durante el ensayo de compresión diametral. En el caso de los hormigones HQ45 y HS45, el comportamiento difiere sustancialmente con relación a los anteriores, presentando los hormigones reciclados resistencias similares o superiores a la de los originales. Para el caso del agregado cuarcítico la adherencia en las interfaces dentro de las partículas es mucho mayor por lo que no existen cambios en el mecanismo de falla con relación al mismo tipo de agregado natural (Q). En el caso del agregado RS, si bien las partículas tienen mayor adherencia que el correspondiente agregado natural (S) esto no tiene mayores efectos debido a las posibles fallas a través de las partículas que disminuyen

la tortuosidad del plano de fractura en el HRS45 con respecto al HS45. El comportamiento observado permite verificar los resultados de estudios anteriores donde los hormigones reciclados fueron elaborados también con canto rodado silíceo, aunque con distinto nivel resistente y tamaño máximo (13).

En los hormigones con razón a/c 0.65 el ordenamiento de la resistencia a tracción es similar al de los hormigones con el mayor nivel resistente, aunque el efecto desfavorable del mayor número de interfaces en los hormigones reciclados parece atenuarse, hecho que debe atribuirse a la menor resistencia de la nueva matriz, obteniéndose en los hormigones HRG65, HRB65 y HRS65 similares resistencias a tracción que en los respectivos hormigones originales. En el caso del hormigón HRQ65, la mejora mencionada en la zona de interfaz y la mayor resistencia del agregado reciclado, hacen que la pequeña diferencia observada para la razón a/c 0.45 se vea incrementada para este nivel resistente.

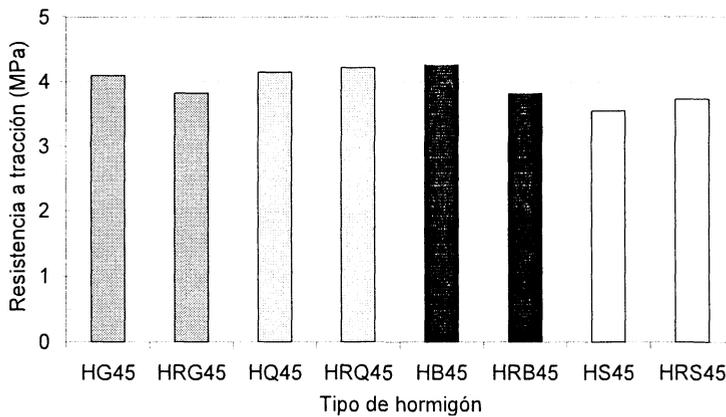


Figura 4. Resistencia a tracción por compresión diametral de los hormigones originales y reciclados de razón a/c 0.45.

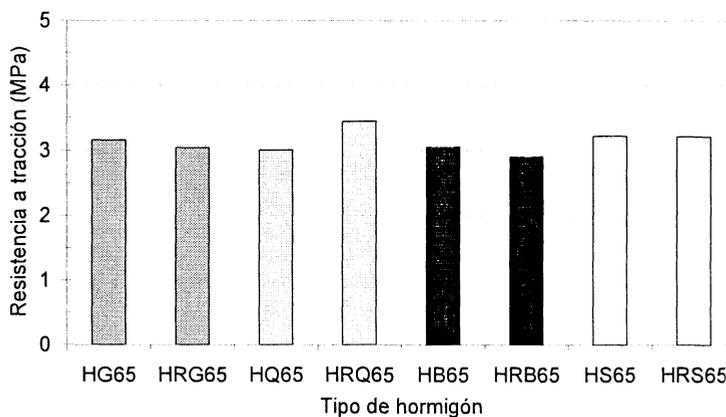


Figura 5. Resistencia a tracción por compresión diametral de los hormigones originales y reciclados de razón a/c 0.65.

Las resistencias a flexión de los hormigones originales y reciclados se comparan en las Figs. 6 y 7. El comportamiento en flexión es muy diferente al de tracción indirecta, asemejándose más al que presentan los hormigones en compresión. Para ambos niveles resistentes, se observan incrementos del módulo de rotura de los hormigones reciclados con relación a los hormigones convencionales, independientemente del tipo de agregado natural utilizado. Los porcentajes de aumento fueron del 13, 8, 3 y 17 % (a/c 0.45) y del 7, 17, 7 y 15 % (a/c 0.65) para los elaborados con los agregados RG, RQ, RB y RS respectivamente. Nuevamente debe resaltarse la mayor ganancia de resistencia de los hormigones HRQ65 y HRS65 debido, como ya se mencionó, a las modificaciones que sufren los agregados reciclados con relación a los naturales.

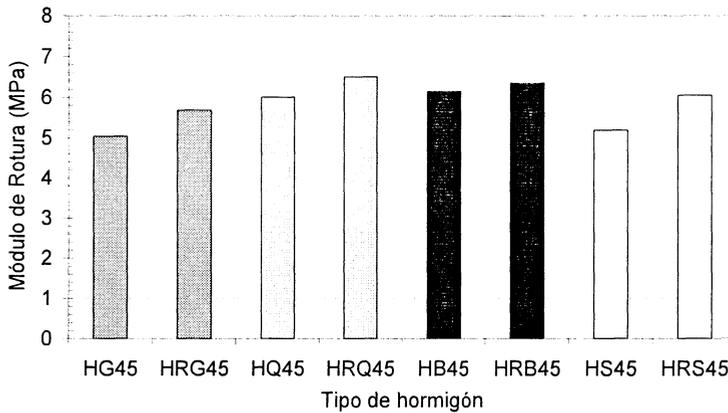


Figura 6. Módulo de rotura en flexión de los hormigones originales y reciclados de razón a/c 0.45.

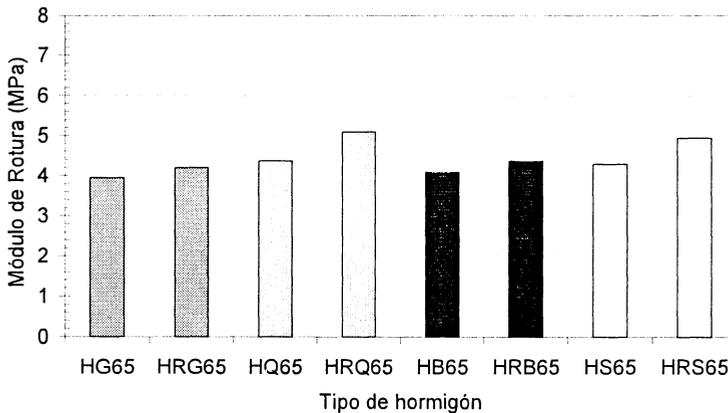


Figura 7. Módulo de rotura en flexión de los hormigones originales y reciclados de razón a/c 0.65.

Debido a la composición de los agregados reciclados (roca y mortero en proporciones variables), es esperable que el módulo de elasticidad del hormigón reciclado resulte inferior al de un hormigón de igual nivel resistente elaborado con agregado natural del mismo tipo (2-4). Dicha diferencia será más importante cuanto mayor es el porcentaje de agregado reciclado empleado (13-15). Sin embargo, el módulo de elasticidad estático se encuentra fuertemente vinculado al nivel resistente del hormigón, por lo que un incremento del mismo provoca un aumento en el valor de la rigidez del hormigón. En las Figs. 8 y 9 se comparan los módulos de elasticidad estático determinados para los hormigones con razones a/c 0.45 y 0.65 respectivamente.

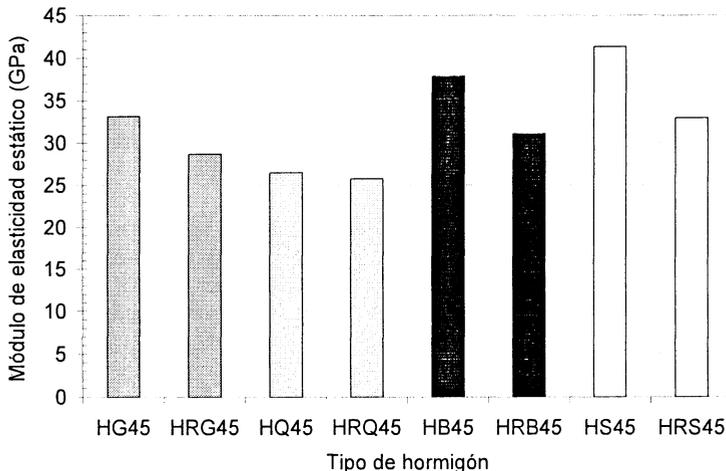


Figura 8. Módulo de elasticidad estático de los hormigones originales y reciclados de razón a/c 0.45.

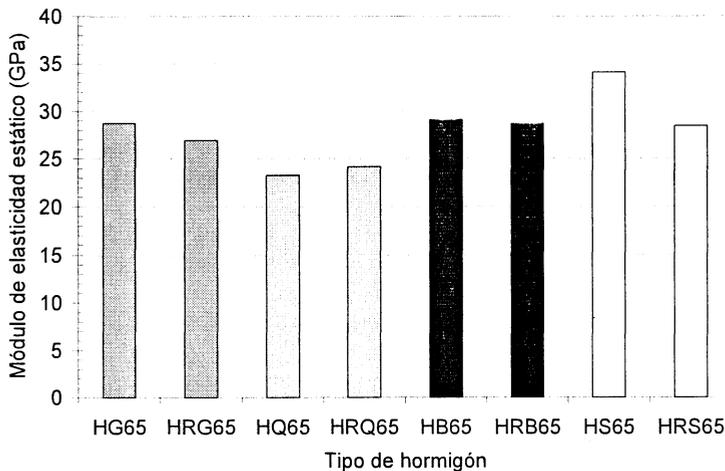


Figura 9. Módulo de elasticidad estático de los hormigones originales y reciclados de razón a/c 0.65.

Los resultados muestran en los hormigones reciclados menor rigidez que en los respectivos hormigones originales, a pesar que su resistencia a compresión resultó ligeramente superior a la de estos últimos en todos los casos., hecho que se atribuye al mortero que forma parte de los agregados reciclados y a que el porcentaje de reemplazo utilizado (75 %) fue bastante elevado (2-4, 13), aportándoles una mayor deformabilidad. En los hormigones HRG, HRB y HRS se verificaron descensos del 13, 18 y 20 % y del 6, 2 y 16 % para las razones a/c 0.45 y 0.65 respectivamente, con relación a los de los hormigones originales.

En los hormigones elaborados con los agregados cuarcíticos el comportamiento obtenido fue diferente, resultando el módulo de elasticidad del HRQ45 similar al del hormigón HQ45, mientras que para el HRQ65 el módulo incluso se incrementó levemente con relación al HQ65 (~ 4 %). En este caso, el incremento en la resistencia a compresión de los hormigones reciclados tuvo una fuerte influencia sobre el valor del módulo de elasticidad, hecho que puede ser atribuido a la mayor resistencia del agregado grueso reciclado respecto del natural (menor desgaste "Los Angeles") y a la mejora producida en la zona de interfaz mortero-agregado reciclado.

Otra observación que surge de las Figs. 8 y 9 está relacionada con la influencia de la densidad y la resistencia de los AGR sobre el módulo de elasticidad. Puede observarse que los hormigones reciclados HRG, HRB y HRS presentan módulos de elasticidad superiores al de los hormigones HQ, para ambos niveles resistentes. Nuevamente se confirma que al utilizar AGR pueden no sólo obtenerse propiedades comparables sino incluso superiores desde el punto de vista técnico a la de algunos tipos de AGN de uso corriente.

CONSIDERACIONES FINALES

A partir del análisis de las propiedades físicas y mecánicas de los agregados gruesos reciclados (AGR) obtenidos de la trituración de hormigones elaborados con diferentes tipos de agregados gruesos naturales (AGN) y distintos niveles resistentes, y del comportamiento resistente en compresión, tracción y flexión de los hormigones elaborados con los AGR, se puede concluir que:

- Los agregados gruesos reciclados presentaron curvas granulométricas semejantes, independientemente del tipo de agregado grueso y de la razón a/c del hormigón original.
- El tipo de agregado grueso natural del hormigón original tiene una mayor influencia sobre las propiedades de los AGR resultantes de su trituración que la razón a/c del mismo.
- La resistencia a compresión y el módulo de rotura en flexión de los hormigones reciclados fueron superiores a las de los hormigones originales a partir de los cuales se obtuvieron los AGR. Este hecho es atribuido a la disminución de la razón a/c efectiva en los hormigones reciclados debido al empleo de los AGR en estado secos al aire, y a una mejora de la zona de interfaz matriz - agregado reciclado como consecuencia de su mayor rugosidad y porosidad superficial. Las diferencias fueron más importantes en los hormigones elaborados con piedra cuarcítica y rodados silíceos, esto se atribuye a un incremento de la resistencia del agregado reciclado cuarcítico y a un cambio en la forma y textura superficial de las partículas en el caso del agregado reciclado silíceo.

- La resistencia a tracción indirecta mostró un comportamiento diferente según el tipo de agregado grueso del hormigón de origen. La resistencia fue inferior a la de los hormigones originales en los hormigones reciclados elaborados con los agregados graníticos y basálticos, mientras que en los preparados con los agregados cuarcíticos y con el rodado silíceo la resistencia fue superior en los reciclados. La disminución para los hormigones reciclados en el caso del granito y el basalto se debe a que las interfaces en el interior de las partículas del AGR favorecen la fractura dando lugar a una superficie de rotura menos tortuosa. Por su parte la mayor resistencia del agregado reciclado cuarcítico con relación al natural justifica los incrementos observados mientras que en el caso del canto rodado silíceo los aumentos se deben a la mejoras de forma y adherencia de las partículas.

- Los hormigones elaborados con los agregados reciclados procedentes de hormigones preparados con granito, basalto y rodado silíceo (HRG, HRB y HRS) presentaron un módulo de elasticidad inferior al de los correspondientes hormigones originales, mientras que en el caso de los HRQ se obtuvo un módulo de elasticidad superior al de los HQ. Este hecho se vincula con la mayor rigidez y resistencia del AGR puesta en evidencia en el ensayo de desgaste.

- Varias observaciones sobre los agregados en sí mismos como sobre las propiedades de los hormigones con ellos elaborados, dan cuenta que los AGR pueden no sólo tener o dar lugar a propiedades comparables a las de algunos tipos de AGN de uso corriente en nuestro país sino incluso resultar superiores desde el punto de vista técnico. Esto refuerza la potencialidad en el uso de AGR para la producción de hormigones.

REFERENCIAS

- (1) Giaccio, G. and Zerbino, R. "Failure mechanism of concrete: combined effects of coarse aggregates and strength level". *Advanced Cement based Materials, USA*, Vol. 7, N° 1, 1998, pp. 41-48.
- (2) Zega, C.J. y Di Maio, A.A. "Efecto del agregado grueso reciclado sobre las propiedades del hormigón". *Boletín Técnico del Instituto de Materiales y Modelos Estructurales, IMME, Venezuela*, Vol. 45, N° 2, 2007, pp. 1-11.
- (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". *Proc. Symposium fib "Structural Concrete and Time"*, La Plata, Argentina, 2005, pp. 761-768.
- (4) 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, N° 111, 1986, pp. 201-246.
- (5) Sri Ravindrarajah, R. and Tam, C.T. "Properties of concrete made with crushed concrete as coarse aggregate". *Magazine of Concrete Research*, Vol. 37, N° 130, March 1985, pp. 29-38.
- (6) Hansen, T.C. and Narud, H. "Strength of recycled concrete made from crushed concrete coarse aggregate". *Concrete International, ACI*, Vol. 5, N° 1, January 1983, pp. 79-83.

- (7) Reglamento CIRSOC-201. Proyecto, Cálculo y Ejecución de Estructuras de Hormigón Armado y Pretensado. Tomo I. Instituto Nacional de Tecnología Industrial, Argentina, 1982.
- (8) Di Maio, A., Gutierrez, F. y Traversa, L.P. "Comportamiento físico-mecánico de hormigones elaborados con agregados reciclados". Proc. 14º Reunión Técnica de la Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón, 2001, Argentina, pp. 37-44.
- (9) Hasaba, S., Kawamura, M., Torik, K. and Takemoto, K. "Drying shrinkage and durability of the concrete made of recycled concrete aggregate". Trans. of the Japan Concrete Institute, Vol. 3, 1981, pp. 55-60. Cited in: Hansen, T.C. "Recycled aggregates and recycled aggregate concrete. Second State-of-the-art", 1986.
- (10) Tavakoli, M. and Soroushian, P. "Strengths of recycled aggregate concrete made using field-demolished concrete as aggregate". Materials Journal, ACI, March-April 1996, pp. 182-190.
- (11) Czarnecka, E.T. and Gillott, J.E. "Effect of different types of crushers on shape and roughness of aggregates". Cement, Concrete and Aggregates, Vol. 4, N° 1, 1982, pp. 33-38.
- (12) Bouquety, M.N., Descantes, Y., Barcelo, L., de Larrard, F. and Clavaud, B. "Experimental study of crushed aggregate shape". Construction and Building Materials, Vol. 21, N° 4, 2007, pp. 865-872.
- (13) Zega, C.J., Taus, V.L. y Di Maio, A.A. "Comportamiento físico-mecánico de hormigones reciclados elaborados con canto rodado". Boletín Técnico del Instituto de Materiales y Modelos Estructurales, IMME, Venezuela, Vol. 44, N° 3, 2006, pp. 17-26.
- (14) Di Maio, A.A., Giaccio, G. y Zerbino, R. "Hormigones con agregados reciclados". Ciencia y Tecnología del Hormigón, LEMIT, N° 9, 2002, pp. 5-10.
- (15) Zega, C.J., Taus, V.L. and Di Maio, A.A. "Effect of entrained air on recycled concrete properties". Journal of ASTM International, Vol. 3, N° 10, 2006. (disponible en www.astm.org)