

Utilización de metodologías para mejorar las propiedades mecánicas del hormigón estructural fabricado con áridos reciclados

Viviana Letelier ¹, Rodrigo Osses ², Gonzalo Valdés ³ y
Giacomo Moriconi ⁴

Recepción: 04-11-2013, Aceptación: 12-12-2013

Disponible en línea: 30-01-2014

PCS: 81.05.Zx

Resumen

En este artículo se presentan los resultados del análisis de dos metodologías propuestas para disminuir las diferencias en la resistencia mecánica de hormigones fabricados con altos porcentajes de árido reciclado con respecto a un hormigón tradicional. Las metodologías fueron aplicadas a hormigones estructurales fabricados con un 40 % de áridos reciclados y se compararon los resultados obtenidos con un hormigón de control. El primer método consistió en aumentar la cantidad de cemento en la mezcla del hormigón en razones de 2,5 % hasta llegar a un 10 %. El segundo método consistió en aplicar un procedimiento de desgaste a los áridos reciclados con el efecto de disminuir la cantidad de mortero adherido. Se evaluaron diferentes grados de desgaste. Los resultados obtenidos muestran que, a largo plazo,

¹ Ph. D. viviana.letelier@ufrontera.cl, Universidad de La Frontera, Temuco, Chile.

² Eng. rodrigo.osses@ufrontera.cl, Universidad de La Frontera, Temuco, Chile.

³ Ph. D. gonzalo.valdes@ufrontera.cl, Universidad de La Frontera, Temuco, Chile.

⁴ Eng. g.moriconi@mta01.univpm.it, Universidad Politécnica delle Marche, Ancona, Italia.

ambas metodologías resultan beneficiosas obteniéndose, en todas las muestras realizadas, resistencias mecánicas equivalentes a las del hormigón de control.

Palabras clave: áridos reciclados; hormigón con áridos reciclados; Propiedades mecánicas.

Methodologies to Improve the Mechanical Properties of Structural Concrete with Recycled Aggregates

Abstract

This paper presents the analysis of results about two methodologies proposed to reduce the differences of mechanical properties presented in recycled concrete made with high percentages of recycled aggregate in respect to a control concrete. Two methodologies were applied to structural concrete with a 40% of recycled aggregates and the results were compared with a control concrete. The first method consisted in increase the amount of cement added in the manufacture of recycled concrete from 2.5% to 10%. The second method consisted of applying an abrasion to the recycled aggregates to decrease the amount of mortar adhered. This method has allowed evaluating the behavior of concrete manufactured with recycled aggregates with different degrees of abrasion. The results show that long-term mechanical properties of the concrete manufactured with both methodologies are similar to control concrete.

Key words: recycled aggregates; recycled aggregate concrete; mechanical properties.

1 Introducción

Actualmente, los problemas ambientales están interesando a diversas áreas de la ciencia. Esto ha llevado a buscar métodos a través de los cuales poder disminuir el impacto que el hombre, en su evolución, ha provocado sobre el ambiente. El área de la construcción, dentro de las distintas alternativas, está estudiando el uso de áridos reciclados provenientes de la demolición de obras civiles para reutilizarlos en la fabricación de nuevo hormigón. Esto permitiría disminuir el consumo de fuentes no renovables, obtenidas de actividades extractivas y, al mismo tiempo, reducir la cantidad de escombros de demolición que termina en los vertederos.

Datos de la literatura [1], [2], [3], [4] [5], [6], [7] , han demostrado como, el uso de áridos reciclados utilizados en cantidades relativamente bajas, no

modifica mayormente las propiedades del hormigón, y actualmente, diversas normativas técnicas europeas autorizan el uso de hasta un 30 % de áridos reciclados en la producción de hormigón estructural.

Estudios realizados en hormigones fabricados con áridos reciclados [8], [9], [10] , han permitido observar cómo, una importante diferencia en el comportamiento mecánico entre hormigones con áridos reciclados y hormigones convencionales, se debe al mortero viejo adherido a la superficie de los áridos reciclados.

Si se piensa en el hormigón convencional como un material compuesto, este puede considerarse constituido de tres partes: áridos gruesos, matriz de mortero con áridos finos y la zona interfacial entre los áridos gruesos y la matriz de mortero [11]. La zona interfacial, por si sola, es muy delgada, pero ocupa una amplia porción relativa dentro de la mezcla de cemento, estimada entre el 20 % y el 60 % del volumen total de la matriz de cemento. La zona interfacial, entre la mezcla de cemento y los áridos, generalmente es considerada “el anillo débil” en el hormigón, dado que, determina el funcionamiento mecánico que tendrá éste [11], [9].

El hormigón con áridos reciclados en cambio, presenta una estructura más compleja que la del hormigón convencional porque, a diferencia de este último, tiene dos zonas interfaciales. Una de estas zonas, se crea entre el árido reciclado y la nueva mezcla de cemento (nueva zona interfacial) y la otra, entre el árido reciclado y el viejo mortero adherido a su superficie (vieja zona interfacial) [8], [9], [3]. De este modo, será la cantidad, así como la calidad, del mortero adherido a la superficie de los áridos reciclados, uno de los principales parámetros que influenciarán el comportamiento mecánico del hormigón reciclado.

En general, a mayor porcentaje de áridos reciclados utilizados, se presentan mayores variaciones en las propiedades del nuevo hormigón debido a que aumenta la probabilidad de unión de zonas débiles [12]. Según la Monografía de la EHE [13] sobre hormigones con áridos reciclados, al considerar un sustitución del 100 % del árido grueso, las pérdidas en resistencia suelen estar alrededor del 20 %; cuando la sustitución baja al 50 %, las pérdidas de resistencia se sitúan entre el 2 y el 15 % y cuando la sustitución se limita al 20-30 %, la pérdida de resistencia suele ser inferior al 5 %.

Considerando estos precedentes, las metodologías propuestas buscan

evaluar posibles mejoras en las propiedades mecánicas de los hormigones que utilizan un 40 % de áridos reciclados, a través del incremento de cemento, o bien, de la disminución del mortero adherido.

2 Programa experimental

La fase experimental consistió en aplicar dos metodologías distintas. Estas metodologías buscan disminuir las diferencias de las resistencias mecánicas entre hormigones fabricados con un 40 % de áridos reciclados y, el hormigón de control.

El primer método consideró incrementar el porcentaje de cemento. La adición de una cantidad de cemento, mayor a la calculada según la dosificación, es una medida que, algunos investigadores [14], [15], han realizado para lograr resistencias, en hormigones reciclados, equivalentes a los hormigones de control o de referencia. Estos estudios, han indicado que un 5 % extra de cemento puede ser necesario para compensar la reducción de resistencia. En el presente estudio, se realizaron pruebas considerando un 2.5, 5, 7.5 y 10 % de adición de cemento, en la fabricación de hormigones con un 40 % de áridos reciclados.

El segundo método, se basó en un proceso de disminución de la cantidad de mortero adherido a los áridos reciclados. Este proceso se hizo necesario en cuanto, el mortero adherido, compuesto por pequeños poros y grietas, es el punto más débil de estos áridos [16], [17], siendo uno de los factores principales que causan una disminución de las propiedades del hormigón [18]. Es por esto que, Sánchez de Juan et al [17], proponen limitar la cantidad de mortero como un medio para obtener un árido reciclado de buena calidad, para la producción de hormigón estructural. En este estudio, se buscó disminuir parte del mortero adherido, utilizando la máquina de Abrasión de Los Ángeles. Para ello, se aplicaron distintos grados de desgaste sobre los áridos reciclados (100, 300, 400 y 500 revoluciones).

La evaluación de las propiedades mecánicas de los hormigones fabricados con un 40 % de áridos reciclados, se realizó mediante ensayos de compresión y flexotracción. Los ensayos de compresión se realizaron a los 7, 14, 28 y 90 días sobre probetas cúbicas de 15x15 cm y, los ensayos de flexotracción, a los 28 días sobre probetas prismáticas de 15x15x50 cm.

2.1 Caracterización de materiales utilizados

Los áridos reciclados utilizados en la fase experimental, para la fabricación del hormigón reciclado patrón y los hormigones con adición de cemento, fueron obtenidos de probetas de hormigón del laboratorio, motivo por el cual la resistencia de origen de los áridos reciclados es desconocida ya que ésta variaba en forma aleatoria entre 15 y 45 MPa. Las probetas fueron trituradas a través de un chancador de mandíbula. Debido al mortero adherido a la superficie, los áridos reciclados presentaron una textura áspera y muy porosa, Figura 1.

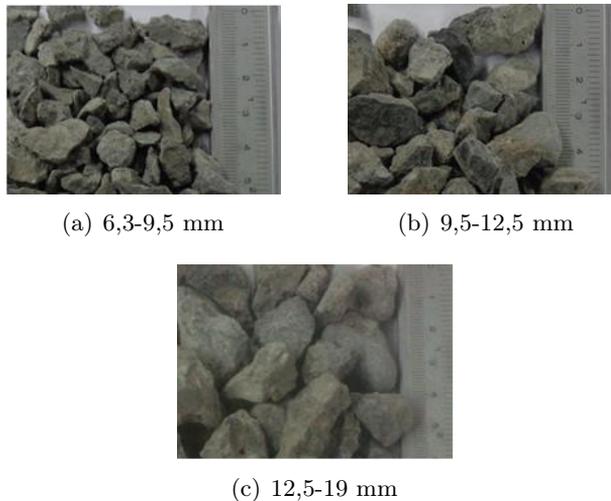


Figura 1: Áridos reciclados

Los áridos reciclados desgastados a través de la máquina de abrasión de Los Angeles son presentados en la Figura 2. Estos áridos fueron obtenidos de aplicar distintos grados de potencia que correspondieron a 100, 300, 400 y 500 revoluciones. Como se observa la abrasión influye sobre la forma y textura de los áridos reciclados, siendo los áridos sometidos a mayor abrasión mas redondeados y menos rugosos que los áridos reciclados con poca o sin abrasión.



(a) 100 revoluciones



(b) 300 revoluciones



(c) 400 revoluciones



(d) 500 revoluciones

Figura 2: Áridos triturados sometidos a diferentes grados de desgaste

Para evitar problemas de trabajabilidad, de acuerdo a las sugerencias realizadas por distintos estudios [19], [20], los áridos reciclados fueron sometidos a una pre-saturación de 24 horas que provocó una saturación cercana al 80 %.

Los valores de las densidades y absorciones de los áridos utilizados se detallan en la Tabla 1. Como se observa el porcentaje de absorción de agua no tiene una relación directa con la cantidad de revoluciones aplicadas ya que las características de los áridos reciclados varían dependiendo del hormigón de origen. En el caso de los áridos reciclados utilizados en este estudio no se conoce la resistencia del hormigón de origen ya que se mezclaban aleatoriamente las probetas de laboratorio trituradas.

Tabla 1: Densidades y absorciones áridos

	Gravilla			Gravilla reciclada			
	Arena	natural	OR	100R	300R	400R	500R
Densidad real seca (kg/m^3)	2640	2690	2245	2449	2492	2452	2527
Absorción de agua (%)	1,7	1,4	8,07	4,5	3,6	4,7	3,4

Para la fabricación de los hormigones se utilizó cemento clase puzolánico, grado corriente, Tabla 2.

Tabla 2: Características del cemento clase puzolánico

	Valores	Requisitos [21]
Características Físicas y Mecánicas		
Peso específico (g/cm^3)	2,8	-
Expansión en autoclave (%)	0,1	1,0 máx.
Fraguado inicial (h:m)	02:40	01:00 mín.
Fraguado final (h:m)	03:40	12:00 máx.
Resistencia compresión (kg/cm^2):		
3 días (%)	280	-
7 días (%)	320	180 mín.
28 días (%)	410	250 mín.
Características Químicas		
Pérdida por calcinación (%)	4,0	5,0 máx.
SO ₃ (%)	3,5	4,0 máx.

2.2 Hormigón con áridos reciclados

Para la comparación de los resultados se realizaron cuatro tipos de hormigones, un hormigón de control (HC), para el cual se utilizaron solo áridos naturales, un hormigón reciclado de referencia (HR), en el cual se utilizó un 40 % de áridos reciclados y relaciones agua-cemento iguales a las del HC, un tercer tipo de hormigones en los cuales se modificó la cantidad de cemento en porcentajes de 2,5 con sigla HR_{CXX} , donde xx corresponde al

porcentaje de cemento agregado y, por último, hormigones con áridos reciclados sometidos a desgaste con la sigla HR_{XXXR} , donde xxx corresponde a la cantidad de revoluciones aplicadas.

Para todos los hormigones, el tamaño máximo utilizado para el árido grueso fue de 19 mm. En el caso del árido reciclado, solo se realizaron reemplazos entre las fracciones entre 6,3 y 19 mm. Esto porque el tamaño del árido reciclado a utilizar influye directamente en las propiedades del hormigón, debido a que la cantidad de mortero adherido a los áridos reciclados aumenta cuanto menor es el tamaño de las partículas [22].

Los valores utilizados en la dosificación de los hormigones, los resultados registrados para los ensayos de docilidad (cono de abrams) y el contenido de aire se presentan en la Tabla 3. Como se observa la trabajabilidad no fue mayormente afectada por el aumento del cemento debido a la pre-saturación que se aplicó a los áridos reciclados, por su parte los áridos reciclados con abrasión mejoraron su trabajabilidad con el aumento de la abrasión ya que según Manzi et al [23] la trabajabilidad es mas influenciada por la forma, textura y distribución de los áridos reciclados que por la cantidad.

Tabla 3: Dosificación de hormigones y pruebas en el hormigón fresco

Código	Arena (kg)	Gravilla natural 2,36-19 mm (kg)	Gravilla reciclada 6,3-19 mm (kg)	C (kg)	A/C	cono (cm)	Aire (%)
<i>HC</i>	717,8	1108,9	-	382,3	0,43	3,5	1,3
<i>HR</i>	717,8	375,6	733,3	382,3	0,43	3,0	0,7
<i>HR_{C2,5}</i>	717,8	375,6	733,3	391,8	0,42	2,5	1,0
<i>HR_{C5,0}</i>	717,8	375,6	733,3	401,4	0,41	3,0	1,7
<i>HR_{C7,5}</i>	717,8	375,6	733,3	411,0	0,40	3,5	1,4
<i>HR_{C10}</i>	717,8	375,6	733,3	420,5	0,39	3,5	1,0
<i>HR_{100R}</i>	717,8	375,6	733,3	382,3	0,43	2,5	0,7
<i>HR_{300R}</i>	717,8	375,6	733,3	382,3	0,43	2,5	0,5
<i>HR_{400R}</i>	717,8	375,6	733,3	382,3	0,43	3,0	0,8
<i>HR_{500R}</i>	717,8	375,6	733,3	382,3	0,43	3,5	0,7

3 Resultados y discusión

3.1 Resistencia a compresión

En la Figura 3, se presentan los resultados obtenidos de las resistencias a compresión a los 7, 14, 28 y 90 días. Esta gráfica, permite observar como las diferencias que se producen en las propiedades de los hormigones con áridos reciclados con respecto al hormigón de control se vean atenuadas cuando se aumenta el tiempo de curado de los hormigones. En el caso de las pruebas de compresión realizadas a los 28 días, el hormigón con áridos reciclados de referencia presenta una pérdida de resistencia del 8 % respecto al hormigón de control. Este porcentaje se encuentra dentro del rango, según los estudios presentados por la ACHE [13]. Por su parte, los hormigones fabricados utilizando una adición de cemento, presentan resistencias siempre menores que la del hormigón de control, con variaciones que van desde 1 %, para el hormigón HR_{C10} , hasta 11 % para el hormigón $HR_{C2,5}$. En el caso de los hormigones cuyos áridos fueron previamente desgastados, sólo los hormigones con áridos desgastados a más de 400 revoluciones lograron obtener resistencias equivalentes a las del hormigón de control. Para los hormigones HR_{100R} y HR_{300R} las pérdidas fueron de un 15 % y un 5 % respectivamente. Estos resultados manifiestan el efecto positivo de la disminución de mortero, que ayuda también al cambio de forma de los áridos reciclados, siendo los áridos sometidos a mayor cantidad de abrasión más redondeados y menos rugosos que los áridos sin tratamiento. Matias et al [24] considera que el uso de partículas angulosas y planas puede presentar estratificación de sus capas lo que debilita la durabilidad y resistencia del hormigón, efectos que se controlan utilizando áridos más redondeados.

A los 90 días, sólo el hormigón reciclado de referencia obtuvo resistencias menores a las del hormigón de control, en un 11 %. Esta situación, es similar a la ocurrida en el estudio de Poon et al [8] donde, la mayor resistencia del hormigón preparado con áridos reciclados, se atribuyó a una unión más fuerte desarrollada en la zona interfacial entre la matriz de cemento y el agregado grueso. Se considera que, el desarrollo de la unión interfacial, puede ser diferente en los hormigones con diferentes tipos de agregados debido a que el hormigón con áridos reciclados presenta un proceso de hidratación y de endurecimiento más lento que el hormigón tradicional [25],

[26], [12]. Un enlace más fuerte, entre el cemento y el agregado grueso reciclado, puede ser capaz de compensar, en algunos grados, el efecto negativo debido a la utilización de un agregado más débil, después de un prolongado período de curado.

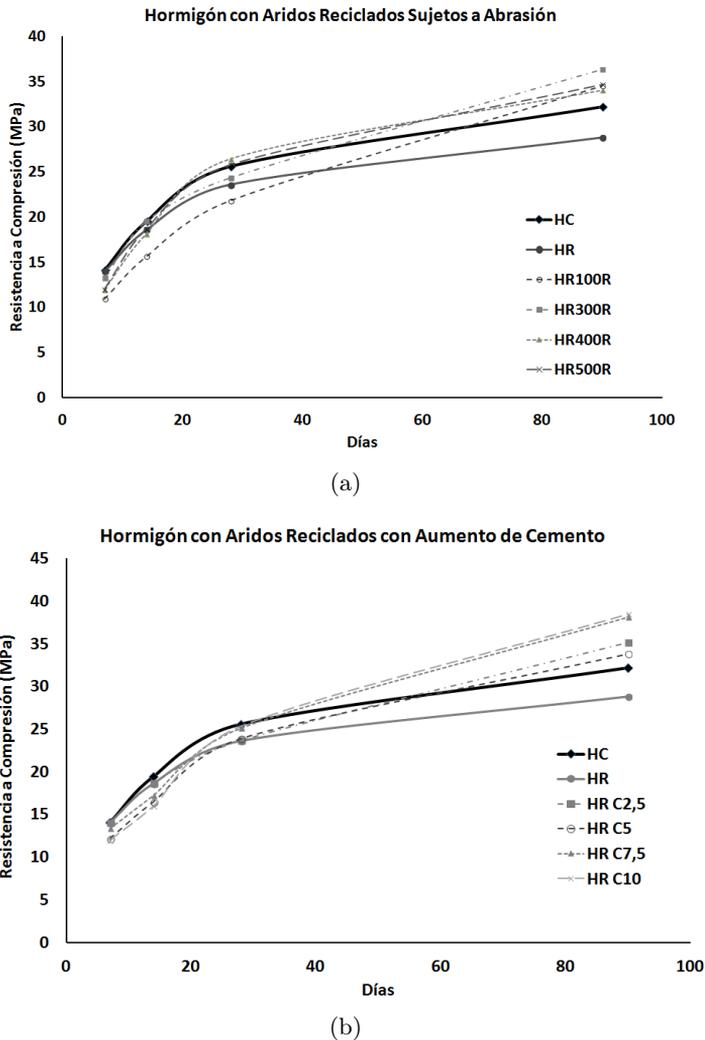


Figura 3: Resistencias a compresión a los 7, 14, 28 y 90 días

Al analizar los datos, se puede observar que, en el caso de los hormigones con adición de cemento, los porcentajes mayores de 7,5 %, no presentan un aumento significativo de resistencia a los 90 días. Esto podría deberse a las propiedades mecánicas del hormigón de origen que controlan las resistencias máximas que se pueden lograr en un nuevo hormigón con áridos reciclados [2].

A los 90 días, las resistencias obtenidas en el método de eliminación de mortero se mantienen entre los 34 y 36 MPa, siendo estos resultados similares a los obtenidos de la adición de 2.5 % de cemento.

La calidad de los áridos reciclados se puede clasificar en relación a la razón de absorción. Una alta absorción, indica altos niveles de mortero adherido, que generalmente conduce a hormigones con inferiores propiedades de resistencia, durabilidad, deformación y retracción [27].

Estefano de Oliveira et al [11] relaciona la absorción de los áridos reciclados con el porcentaje de pérdida de resistencia. Para verificar si existe esta relación en el estudio realizado, considerando que los hormigones fabricados utilizando áridos con distinto grado de desgaste presentaban distintos porcentaje de absorción, se graficaron en la Figura 4 los resultados de las resistencias a los 90 días junto a los porcentajes de absorción.

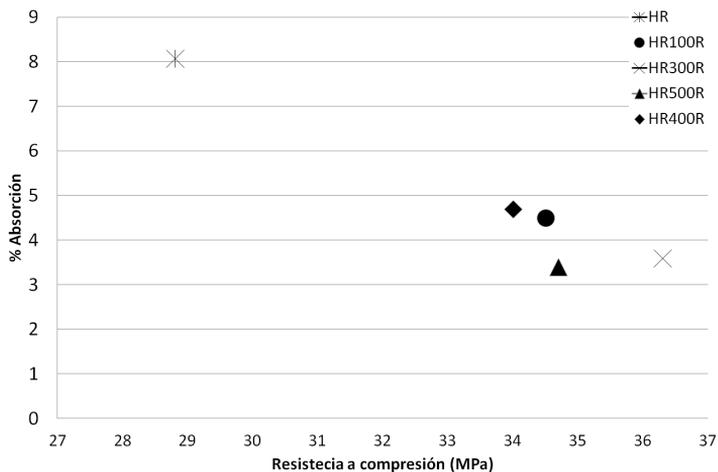


Figura 4: Resistencias a compresión y absorciones.

En la gráfica se observa que, efectivamente, las resistencias tienden a estar más relacionadas con el porcentaje de absorción de los áridos que con la cantidad de revoluciones de desgaste. Así, el hormigón reciclado de referencia presenta los mayores porcentajes de absorción, y a su vez, las mayores pérdidas de resistencia con respecto al hormigón de control. Las menores absorciones, en cambio, corresponden a los hormigones HR_{300R} y HR_{500R} con valores de 3.6 y 3.4%, respectivamente. Las resistencias a compresión obtenidas a los 90 días con valores de 36,3 y 34,7 MPa, superan levemente al hormigón de control. El hecho que la resistencia del hormigón HR_{500R} sea menor a la del HR_{300R} , aun si su porcentaje de absorción es menor, podría ser debido a la formación de microfisuras en la estructura de los áridos por la cantidad de revoluciones a las que fueron sometidos los áridos en su proceso de desgaste, debilitando de este modo la resistencia del hormigón.

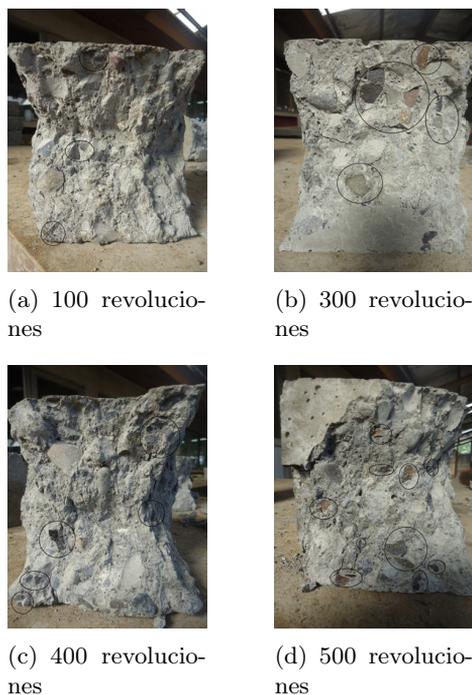


Figura 5: Zona de fractura hormigones con áridos reciclados sometidos a abrasión

Para verificar esta hipótesis se observaron los planos de falla de las probetas estudiadas (Figura 5) donde se observa que en todos los hormigones con áridos reciclados se presenta un tipo de falla mixta debido a la fractura a través de la zona interfacial y de la fractura interna de los áridos reciclados, similar a los resultados de Lee et al [28]. En el caso de los hormigones con áridos reciclados sometidos a mayor número de revoluciones se presenta un mayor número de áridos reciclados con fractura interna. Para validar estas observaciones será necesario realizar estudios futuros que analicen microscópicamente el nivel de microfisuras de los áridos reciclados sometidos a distintos grados de abrasión

3.2 Resistencia a tracción

Los resultados de las resistencias a tracción son resumidos en la Figura 6. Los datos muestran como todos los valores estén comprendidos entre 4.5 MPa y 5 MPa, lo que permite concluir, al igual que otros autores, que el uso de los áridos reciclados no tiene una elevada influencia sobre este parámetro [23], [29].

En la Tabla 4 se puede observar las relaciones existentes entre la resistencia a tracción y la raíz cuadrada de la resistencia a compresión, obteniéndose valores mayores a 0.9 para todos los hormigones utilizados. Estos valores son mayores que el coeficiente 0.7 propuesto por el ACI 318 [30].

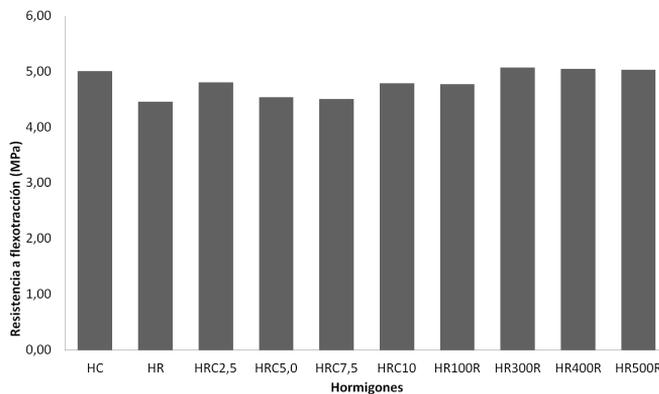


Figura 6: Resistencias a flexotracción.

Tabla 4: Relaciones entre la resistencia a tracción y la resistencia a compresión

Hormigón	Resistencia a	Resistencia a	$\frac{f_t}{\sqrt{f'_c}}$
	tracción f_t	compresión f'_c	
	(MPa)	(MPa)	
<i>HC</i>	5,0	25,6	0,99
<i>HR</i>	4,5	23,6	0,92
<i>HR_{C2,5}</i>	4,8	22,9	1,00
<i>HR_{C5,0}</i>	4,5	23,9	0,93
<i>HR_{C7,5}</i>	4,5	25,1	0,90
<i>HR_{C10}</i>	4,8	25,4	0,95
<i>HR_{100R}</i>	4,8	21,8	1,02
<i>HR_{300R}</i>	5,1	24,3	1,03
<i>HR_{400R}</i>	5,1	26,4	0,98
<i>HR_{500R}</i>	5,0	25,8	0,99

4 Conclusiones

Las absorciones de agua, en el árido reciclado utilizado en el estudio, se registran cerca de seis veces la del árido natural. Sin embargo, en el caso de los áridos reciclados sometidos a abrasión, este valor baja, encontrándose entre 2,4 y 3,6 veces. Lo anterior demuestra que, el proceso de desgaste utilizado fue eficaz, logrando disminuir los altos valores de absorción mediante la eliminación del mortero adherido en el árido reciclado.

Con respecto a la resistencia a compresión, a los 28 días, no es posible observar un efecto claramente positivo por el aumento de la cantidad de cemento o por la disminución del mortero adherido, a través del proceso de desgaste de los áridos reciclados. Sin embargo, a largo plazo (90 días), sólo el hormigón de referencia obtiene una resistencia a compresión menor, en un 11 %, a la resistencia del hormigón de control. Tanto los hormigones sometidos a un aumento de la cantidad de cemento, como aquellos sometidos a disminución del mortero adherido, presentan resistencias mayores o equivalentes a las del hormigón de control.

Los resultados presentados en este trabajo muestran como ambas metodologías permiten mejorar las propiedades mecánicas del hormigón con áridos reciclados. Siendo estas mejoras visibles a un mayor tiempo de curado. A los 90 días, una adición de solo 2,5 % de cemento o someter a los áridos

reciclados a una abrasión de 100 revoluciones, permite obtener hormigones reciclados similares a los hormigones tradicionales. En estudios futuros se espera poder cuantificar la carga energética que supone la utilización de estas metodologías en modo de poder discernir entre ambos métodos.

Agradecimientos

Este estudio es parte del proyecto Diufro DI12-0029 “Influencia del tamaño del árido grueso reciclado en el comportamiento mecánico del hormigón reciclado”. Se agradece el apoyo financiero de la Universidad de La Frontera Temuco-Chile.

Referencias

- [1] J. Xiao, J. Li, and C. Zhang, “Mechanical properties of recycled aggregate concrete under uniaxial loading,” *Cement and Concrete Research*, no. 35–6, pp. 1187–1194, 2005. 180
- [2] K. Rahal, “Mechanical properties of concrete with recycled coarse aggregate,” *Building and Environment*, no. 42–21, pp. 407–415, 2007. 180, 189
- [3] V. W. Y. Tam, K. Wang, and T. C. M., “Assessing relationships among properties of demolished concrete, recycled aggregate and recycled aggregate concrete using regression analysis,” *Journal of Hazardous Materials*, no. 152–2, pp. 703–714, 2008. 180, 181
- [4] A. K. Padmini, K. Ramamurthy, and M. S. Mathews, “Influence of parent concrete on the properties of recycled aggregate concrete,” *Construction and Building Materials*, no. 23–2, pp. 829–836, 2009. 180
- [5] X. Li, “Recycling and reuse of waste concrete in china: Part II Structural Behaviour of recycled aggregate concrete and engineering applications,” *Resources, Conservation and Recycling*, no. 53–3, pp. 107–112, 2009. 180
- [6] V. K. Bairagi, K. Ravande, and V. K. Pareek, “Behaviour of concrete with different proportions of natural and recycled aggregates,” *Resources Conservation and Recycling*, no. 9, pp. 109–126, 1993. 180
- [7] K. Eguchi, K. Teranishi, A. Nakagome, H. Kishimoto, K. Shinozaki, and M. Narikawa, “Application of Recycled Coarse Aggregate by Mixture to Concrete Construction,” *Construction and Building Materials*, no. 21, pp. 1542–1551, 2007. 180

- [8] C. S. Poon, Z. H. Shui, and L. Lam, “Effect of microstructure of ITZ on compressive strength of concrete prepared with recycled aggregates,” *Construction and Building Materials*, no. 18, pp. 461–468, 2004. 181, 187
- [9] V. W. Y. Tam, X. F. Gao, and T. C. M., “Microstructural analysis of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing approach,” *Cement and Concrete Research*, no. 35, pp. 1195–1203, 2005. 181
- [10] V. W. Y. Tam, X. F. Gao, T. C. M., and K. M. Ng, “Physio-chemical reactions in recycled aggregate concrete,” *Journal of Hazardous Materials*, no. 153, pp. 823–828, 2008. 181
- [11] M. J. Estefano de Oliveira, C. Silveira de Assis, and A. Wanderley Terni, “Study on Compressed Stress, Water Absorption and Modulus of Elasticity of Produced Concrete Made by Recycled Aggregate,” *Interantional RILEM Conference on the Use of recycled Materials and Structures*, pp. 636–642, 2008. 181, 189
- [12] W. H. Kwan, M. Ramli, K. J. Kam, and M. Z. Sulieman, “Influence of the amount of recycled coarse aggregate in concrete design and durability properties,” *Constructions and Building Materials*, no. 26, pp. 565–573, 2012. 181, 188
- [13] A. científico-técnica del hormigón estructural, “Utilización de arido reciclado para la fabricación de hormigón estructural,” *Monografía (ACHE)*, no. M11, pp. 117–125, 2006. 181, 187
- [14] S. Frondistou-Yannas, “Waste concrete as aggregate for new concrete,” *ACI Journal Proceedings*, no. 74, pp. 373–376, 1977. 182
- [15] M. Etxeberria, A. Mari, and E. Vazquez, “Recycled aggregate concrete as structural material,” *Materials and Structures*, no. 40, pp. 529–541, 2007. 182
- [16] M. Etxeberria, E. Vazquez, A. Mari, and M. Barra, “Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete,” *Cement and Concrete Research*, no. 37, pp. 735–742, 2007. 182
- [17] M. Sanchez de Juan and P. Alaejos Gutierrez, “Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate,” *Construction and Building Materials*, no. 23, pp. 872–877, 2009. 182
- [18] S. Ismail and M. Ramli, “Engineering properties of treated recycled concrete aggregate (RCA) for structural applications,” *Constructions and Building Materials*, no. 44, pp. 474–476, 2013. 182

- [19] F. Agrela, M. Sanchez de Juan, J. Ayuso, V. L. Geraldés, and J. R. Jimenez, “Limiting properties in the characterization of mixed recycled aggregates for use in the manufacture of concrete,” *Construction and Building Materials*, no. 25, pp. 3950–3955, 2011. 184
- [20] M. Barreto, J. de Brito, and A. Santos, “Metodos de evaluacion de las reacciones alcali-silice en hormigones con aridos reciclados,” *Revista Ingenieria de Construccion*, vol. 24, pp. 141–152, 2009. 184
- [21] I. N. d. N. C. NCh148, *NCh148Of.68 Cemento - Terminologia, clasificacion y especificaciones generales*, 1968. 185
- [22] T. C. Hansen, “Recycling of Demolished Concrete Masonry,” *Rilem Report*, no. 6, p. 316, 1992. 186
- [23] S. Manzi, C. Mazzotti, and M. C. Bigozzi, “Short and long-term behaviour of structural concrete with recycled concrete aggregate,” *Cement and Concrete Composites*, no. 37, pp. 312–318, 2013. 186, 191
- [24] D. Matias, J. de Brito, A. Rosa, and D. Pedro, “Mechanical properties of concrete produced with recycled coarse aggregates Influence of the use of superplasticizers,” *Construction and Building Materials*, no. 44, pp. 101–109, 2013. 187
- [25] B. Mas, A. Cladera, T. del Olmo, and F. Pitarch, “Influence of the amount of mixed recycled aggregates on the properties of concrete for non-structural use,” *Construction and Building Materials*, no. 27, pp. 612–622, 2012. 187
- [26] L. Evangelista and J. de Brito, “Mechanical behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates,” *Cement and Concrete Composites*, no. 29, pp. 397–401, 2007. 188
- [27] T. Watanabe, N. Sayaka, H. Chikaroni, and M. Otsu, “Compressive failure in concrete of recycled aggregate acoustic emission,” *Construction and Building Materials*, no. 21, pp. 470–476, 2007. 189
- [28] G. C. Lee and H. B. Choi, “Study and interfacial transition zone properties of recycled aggregate by micro-hardness test,” *Constructions and Building Materials*, no. 40, pp. 455–460, 2013. 191
- [29] B. Gonzalez-Fonteboa and F. Martinez-Abella, “Concrete with aggregates from demolition waste and silica fume. Materials and mechanical properties,” *Building and Environment*, no. 43, pp. 429–437, 2008. 191
- [30] A. 318-11, “Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary,” *ACI Committee 318*, p. 503, 2011. 191