

# Utilización del hormigón reciclado como material de reemplazo de árido grueso para la fabricación de hormigones

## Utilisation of recycled concrete as replacing of coarse aggregate for the concrete manufacturing

Carlos Aguilar\*, María Pía Muñoz\*, Oscar Loyola\*

\* Universidad de Santiago de Chile, Santiago, CHILE  
caguilar@socovesa.cl

Fecha de recepción: 02/ 12/ 2004  
Fecha de aceptación: 28/ 03/ 2005

### Resumen

La presente investigación tuvo como objetivo principal analizar las propiedades de hormigones fabricados con áridos reciclados obtenidos de hormigones demolidos para ser propuestos como una alternativa a una potencial escasez de áridos naturales en cercanías a las grandes zonas urbanas. Para esto, se desarrolló un programa experimental que analizó el efecto sobre las propiedades del hormigón de la clase y dosis de cemento, así como también, la cantidad y tipo de árido reciclado utilizado en la mezcla. Al comparar áridos reciclados con naturales, se observa una disminución en prácticamente todas las propiedades físicas de los áridos reciclados. Destaca la elevada absorción del agregado grueso reciclado. Respecto de las propiedades en estado fresco, los hormigones fabricados con árido grueso reciclado presentan un comportamiento levemente inferior a los que se obtienen con hormigones con árido natural. Se observaron pérdidas de resistencia a compresión y módulo de elasticidad en hormigones elaborados con árido grueso reciclado con respecto a hormigones de árido natural. Se destaca que la sustitución total de árido grueso natural implica menores pérdidas que las presentadas en hormigones con sustitución parcial. Se estima que el mortero adherido a la superficie de la partícula pétreo del árido de hormigón reciclado es el factor crítico que debilita la adherencia y por lo tanto afecta todas las propiedades del hormigón elaborado con árido reciclado.

Palabras Clave: Árido, árido Reciclado, cemento portland puzolánico, hormigón, hormigón reciclado

### Abstract

The present research analyzed the properties of concretes made with Portland Pozzolan cement and recycled aggregate obtained of demolished concretes to be proposed as an alternative to a potential lack of aggregate natural in urban areas. An experimental program was carried out to study the effect of the amount and type of cement and recycled aggregate type on the concrete properties. The results showed decreases in all the physical properties of recycled aggregates. Considering fresh concrete, the concretes made with recycled aggregates presented slightly lower values with respect to the natural aggregate concretes. Similarly in hardened concrete, concrete made with recycled aggregate presented diminished values of strength and modulus of elasticity. It highlights that the total substitution of natural aggregate by recycled concrete, implies smaller losses to those presented in concretes with partial substitution of aggregate. It is estimated that the mortar adhered to the surface of the aggregate of recycled concrete is the critical factor that affects the properties of the recycled aggregate concrete.

Keywords: Aggregate, recycled aggregate, portland pozzolan cement, recycled concrete

## 1. Introducción

La Tierra ha sido testigo de un continuo aumento de su población a través de toda la historia de la humanidad. De la mano de este crecimiento, se han desarrollado actividades productivas, las que han permitido sostener este progresivo incremento. El costo de esta realidad se ha traducido en una explotación ininterrumpida y creciente de los recursos del planeta, sean estos renovables o no.

Esta situación poco ha importado en el pasado, pero hoy las opiniones al respecto han cambiado. La gran demanda de recursos básicos ha generado una gran escasez de materias primas, constituyendo una gran preocupación. A lo anterior, se suma la nueva motivación

de la que el mundo ha sido protagonista: preservar y proteger el medio ambiente de un inminente desequilibrio ecológico.

La conservación de los recursos naturales ha impulsado el reciclaje como un proceso recuperador que logra actividades sin dañar al medio ambiente. En el caso de la construcción con hormigón, se requiere un volumen de recursos importante, especialmente en agregados pétreos. La necesidad de obtener áridos compatibles con los requerimientos de la fabricación de hormigón, ha llevado a la explotación masiva de canteras y lechos de ríos donde es posible encontrar material de buena calidad. Sin embargo, cada vez son más escasos



los áridos que no presentan inconvenientes. Esto ha generado la necesidad de realizar largos viajes desde lugares en donde no hay disponibilidad de buenos elementos hacia aquellos que si los presentan, traduciéndose dicha dificultad en un alza considerable de los costos de transporte o traslado. Por todo lo anterior, el surgimiento de una posible alternativa que reemplace los áridos naturales resulta de gran valor e interés.

Esta opción es el reciclado de hormigón y su objetivo es transformar los materiales de un hormigón antiguo en componentes de un nuevo hormigón. Su implementación no sólo ha permitido eliminar en parte el costo de los áridos (incluyendo también los costos de traslado del material), sino también ha eliminado los requerimientos de un botadero donde disponer los trozos de hormigón inservible.

El proceso es relativamente simple e implica romper, remover y triturar (chancar) el hormigón a un tamaño requerido, con el fin de reutilizarlo como agregado para la fabricación de un nuevo hormigón.

Muchos países llevan años investigando y empleando este proceso y avalan sus beneficios; pero es necesario analizar la información, investigar y adecuar estas técnicas a la realidad nacional, sobre todo considerando que en Chile se utiliza en su mayoría hormigón fabricado con cemento del tipo Portland Puzolánico.

La investigación tuvo como objetivo general analizar el comportamiento y la variabilidad de las propiedades de un hormigón producido con árido de hormigón reciclado, en reemplazo del árido grueso natural, considerando como patrón de comparación un hormigón tradicional elaborado con áridos naturales. Respecto de los objetivos específicos, el estudio pretende evaluar las incidencias que ocasiona la dosis de cemento en un hormigón tradicional y en uno de árido reciclado, considerando la variabilidad en las propiedades finales generada por el porcentaje de árido grueso reciclado que posea este último hormigón. Complementando lo anterior se pretende, dada la escasa evidencia en estudios nacionales e internacionales, realizar la investigación usando cemento portland puzolánico.

## 2. Programa experimental

El método experimental consideró tres etapas. Durante la primera se fabricó un hormigón de control constituido por áridos naturales. Durante la segunda, se chancó para ser utilizado como árido grueso en la fabricación de un nuevo hormigón, probetas de hormigón

provenientes de un laboratorio de control de calidad de materiales de construcción. En la tercera y última etapa, se chancó un hormigón proveniente directamente de una demolición para ser utilizado como árido grueso para un nuevo hormigón.

Los parámetros que se mantuvieron constantes durante las tres etapas fueron: dosis de agua, dosis de arena, curva granulométrica y el tamaño máximo nominal del agregado. Por otra parte, las variables independientes fueron el contenido de cemento (3 niveles), el porcentaje de árido grueso reciclado presente en las mezclas (2 niveles) y el tipo de cemento (2 niveles).

Respecto del contenido de cemento para la mezcla de control, se utilizaron dos dosis diferentes para fabricar dos hormigones de distinta resistencia (razón  $W/C=0.6$  y  $W/C=0.45$ ). Lo propio se hizo con las mezclas de árido grueso reciclado de la segunda y tercera etapa, para brindar una comparación directa con la mezcla de control. En consecuencia, el contenido de cemento seleccionado para elaborar un hormigón de razón  $W/C=0.6$  será de  $335 \text{ Kg/m}^3$ , mientras que para el hormigón de razón  $W/C=0.45$  será de  $450 \text{ Kg/m}^3$ .

Dado que los antecedentes bibliográficos señalan que las propiedades resistentes de un hormigón de árido reciclado son menores que las de un hormigón de árido natural, aun conservando idénticas dosificaciones y granulometría (Park, 1999; Tavakoli-Soroushian, 1996; Ravindrarajah-Stewart-Greco, 2001), se incluyó una tercera dosis de cemento en las mezclas de árido reciclado, para determinar el incremento de cemento que sería necesario para obtener una resistencia equivalente a la de la mezcla de control. El incremento de cemento utilizado fue de  $30 \text{ Kg/m}^3$  respecto de la menor dosis, obteniéndose un contenido de cemento de  $365 \text{ Kg/m}^3$ .

La segunda variable de consideración en la investigación corresponde al porcentaje de árido reciclado presente en las mezclas de la segunda y tercera etapa. Se analizó la variabilidad de las propiedades de un hormigón cuando se reemplaza el árido grueso natural parcial o totalmente (50% y 100%, respectivamente) por árido grueso reciclado.

Del análisis bibliográfico se desprende que existe poca evidencia experimental acerca del uso de cemento Portland puzolánico en la fabricación de hormigones de árido reciclado. Por tanto, se estudió como variable de análisis el tipo de cemento, atendándose dos niveles: cemento Portland puzolánico grueso (corriente) y cemento Portland puzolánico fino (alta resistencia).

Para analizar los efectos de las variables independientes sobre las propiedades del hormigón de

árido grueso reciclado, se presenta la combinación de variables a través del factorial mostrado en la Tabla 1.

Los ensayos realizados a los áridos utilizados para la fabricación de hormigones fueron: densidad aparente, densidad SSS, absorción y contenido de huecos (propiedades físicas); granulometría y número de angularidad (propiedades de forma) y desgaste de Los Ángeles (propiedades mecánicas).

Cabe mencionar que todos los hormigones se elaborarán con arena natural, sólo el árido grueso natural será reemplazado parcial o totalmente por árido grueso reciclado. Todo el material que pasa por el tamiz de 5 mm fue descartado debido a que gran cantidad de reportes de investigadores extranjeros señalan que aunque el material fino reciclado podría ser usado, éste tendería a tener una baja trabajabilidad y una elevada absorción, haciendo necesaria una demanda de agua difícil de predecir (Hansen-Narud, 1983).

Las propiedades de los hormigones en estado fresco medidas corresponden al asentamiento de cono de Abrams, densidad aparente y contenido de aire. Además, se registraron la temperatura del hormigón y del ambiente durante la confección del hormigón.

Las propiedades mecánicas y elásticas del hormigón en estado endurecido medidas son la resistencia

a la compresión cilíndrica y módulo de elasticidad del hormigón medidas en probetas de 150x300 mm, considerando una probeta a los 7 y dos probetas a los 28 días de edad del hormigón.

La investigación se realizó en dependencias del Laboratorio de Vialidad de Chile y fue la base de la memoria de Ingeniero Civil de María Pía San Martín y Oscar Loyola. (San Martín y Loyola, 2002).

### 3. Materiales utilizados en la investigación

Se utilizó cemento clase Portland Puzolánico, uno de grado corriente y otro de alta resistencia. Las principales diferencias entre los cementos empleados radican en el contenido de puzolana natural y en la superficie específica.

Los áridos empleados en la fabricación de hormigón consisten en naturales y reciclados. Estos últimos se obtuvieron de probetas cúbicas de laboratorio de 150x150 mm. y de un pavimento de hormigón demolido. Las principales características de los áridos utilizados en la presente investigación son mostradas en la Tabla 2.

Tabla 1. Programa experimental

Dosis de Agua	200 L																	
Curva Granulométrica	Entre curvas N°2 y N°3 de la Road Note N°4																	
Tamaño Máximo Nominal	20 mm																	
Tipo de Árido	Natural				Reciclado de Hormigón Laboratorio				Reciclado de Hormigón Demolido									
Tipo de Cemento	T1		T2		T1		T2		T1		T2							
Dosis de Cemento	335	450	335	450	335	450	335	450	335	450	335	450						
% de Árido Reciclado	0				50	100	50	100	50	100	50	100	100					
N° Hormigón	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18

Donde:

T1: Cemento Portland Puzolánico grado Corriente.

T2: Cemento Portland Puzolánico grado Alta Resistencia.

Tabla 2. Propiedades de los Áridos

Propiedad		Árido Natural		Árido Grueso de Hormigón de Laboratorio	Árido Grueso de Hormigón Demolido
		Grava	Arena		
<b>CUBICIDAD DE PARTÍCULAS</b>					
Partículas chancadas	%	70	-	83	97
Partículas rodadas	%	25	-	15	1
Lajas	%	5	-	2	2
<b>DETERMINACIÓN DE DENSIDADES</b>					
Aparente Suelta	Kg/m <sup>3</sup>	1.510	1.657	1.313	1.297
Aparente Compactada	Kg/m <sup>3</sup>	1.597	1.721	1.396	1.441
Densidad Real SSS	Kg/m <sup>3</sup>	2.630	2.630	2.530	2.540
Densidad Real Seca	Kg/m <sup>3</sup>	2.610	2.560	2.430	2.440
Densidad Neta	Kg/m <sup>3</sup>	2.650	2.730	2.700	2.710
Absorción de Agua	%	0,6	2,4	4,1	4,1
<b>CONTENIDO DE HUECOS</b>					
Suelto	%	43	35	46	47
Compactado	%	39	33	42	41
DESGASTE DE LOS ÁNGELES	%	14		22	20
INDICE DE TRITURACION	%	-	0,5	-	-

## 4. Resultados y discusión

### 4.1 Áridos Gruesos Reciclados

De la revisión bibliográfica se desprende que la diferencia más notable en las propiedades físicas del árido de hormigón reciclado es su mayor absorción de agua, la cual puede deberse a una absorción realizada por la pasta de cemento adherida a las partículas de hormigón reciclado. Estos elevados valores no hacen al árido de hormigón reciclado inadecuado para hormigones, pero es importante que si estos áridos van a ser usados, entonces los acopios deben ser mantenidos en condición saturada superficialmente seca (Hansen-Narud, 1983; Tavakoli-Soroushian, 1996; Rashwan-Abourizk, 1997; Park, 1999; Ravindrajah-Stewart-Greco, 2001). Por lo tanto, dada la naturaleza de la presente investigación, resulta fundamental llevar a cabo diversos ensayos que den cuenta de las propiedades que poseen los áridos fabricados a partir de hormigón reciclado. Los resultados obtenidos permiten evaluar las ventajas y desventajas que presentan los áridos de hormigón reciclado en comparación a un árido natural, así como señalar las propiedades que se escapan de los requisitos de calidad esperados para un árido y que resultan críticas en las mezclas de hormigón elaboradas con este tipo de árido, los que se discuten a continuación:

#### Cubicidad de partículas.

Del análisis de la Tabla 2 puede observarse que el árido grueso natural está constituido principalmente por partículas chancadas, obtenidos por el proceso para lograr el tamaño máximo de árido requerido para la investigación.

Por otra parte, los áridos gruesos provenientes del chancado de probetas de laboratorio y del pavimento de hormigón demolido, ocasionó que el árido reciclado resultante tuviese una forma fundamentalmente angulosa. En general, las partículas de árido chancado propiamente tal se concentraron en los mayores tamaños, mientras que los menores tamaños quedaron casi íntegramente constituidos por partículas pétreas rodeadas de mortero adherido a su superficie, de forma angulosa y textura áspera. Aun cuando esta situación se presenta para ambos áridos reciclados, es notorio que para el producido a partir de hormigón de pavimento demolido se presenta de manera mucho más marcada. Esto podría atribuirse a la forma que presentaba el árido con el cual se elaboró el hormigón original.

#### Densidad aparente.

La densidad aparente de los áridos reciclados experimenta un descenso respecto de los valores obtenidos

por el árido natural. En términos porcentuales, se produce un descenso de la densidad aparente compactada de 9.8 % cuando se utiliza árido reciclado de hormigón demolido y de 12.6 % cuando se emplea árido reciclado de hormigón de laboratorio. Una situación similar ocurre con la densidad aparente suelta, registrándose una disminución del 14.1% para el árido reciclado de hormigón demolido y de 13% para el árido reciclado de hormigón de laboratorio. Lo anterior puede atribuirse al mayor contenido de huecos entre partículas que presentan los áridos reciclados en comparación con el árido natural.

Por otra parte, al analizar la variación de densidad producida del estado suelto al compactado, es posible advertir que se produce un incremento de 5% cuando se utiliza árido natural, de 10% cuando se emplea árido reciclado de hormigón demolido y de 6% cuando se usa árido reciclado de hormigón de laboratorio. Esto podría indicar un posible trituramiento del árido de hormigón reciclado bajo compactación, particularmente en el árido producido a partir de hormigón de pavimento demolido.

#### Densidad real y neta.

Se observan pérdidas de densidad en los áridos de hormigón reciclado respecto de la obtenida por los áridos naturales. Las densidades registradas en el árido natural, tanto grueso como fino, se mantienen dentro de los rangos típicamente encontradas en Chile (2.600 y 2.700 kg/m<sup>3</sup>). Los valores, tanto de densidad real como neta, resultan bastante similares entre sí para los áridos reciclados, constatándose una muy leve disminución en el producido con hormigón de laboratorio. La pérdida de densidad real de árido saturado superficialmente seco (sss) respecto de la obtenida por el árido natural, alcanza un 3.4% para el árido de hormigón de pavimento demolido y de un 3.8% para el de hormigón de laboratorio. En tanto, la densidad real del árido seco registra un descenso de 6.5% para el árido de hormigón de pavimento demolido y de 6.9% para el hormigón de laboratorio. Este comportamiento puede atribuirse a la elevada porosidad del mortero adherido a la partícula pétreo del árido reciclado. Esta porosidad estaría constituida fundamentalmente por poros accesibles dada la extensa red de capilares que posee el mortero. Lo anterior podría evidenciarse en la propia definición de la densidad real, que considera el volumen macizo de las partículas del árido más el volumen de los poros accesibles e inaccesibles de esas partículas. La diferencia entre la densidad real sss y la real seca está dada por la masa: la primera considera la masa del árido seco más

la masa del agua que llena los poros accesibles, mientras que la segunda, considera sólo la masa del árido seco. Por lo tanto, la diferencia entre ambas densidades reales la constituye la masa asociada a los poros accesibles.

Analizando los resultados, es posible observar que la densidad real seca del árido natural es de 2.610 kg/m<sup>3</sup>, mientras que la densidad real sss es de 2.630 kg/m<sup>3</sup>, es decir, existe un ligero incremento de 0.8 % por concepto de masa asociada a poros accesibles. Pero en los áridos de hormigón reciclado este incremento alcanza un 4%, pues el árido de hormigón de pavimento demolido registra una densidad real seca de 2.440 kg/m<sup>3</sup> y una densidad real sss de 2.540 kg/m<sup>3</sup>, mientras que el árido de hormigón de laboratorio registra 2.430 kg/m<sup>3</sup> y 2.530 kg/m<sup>3</sup>, respectivamente. En consecuencia, resulta lógico pensar que el descenso de densidad reside en la porosidad que presenta el árido reciclado.

Por otra parte, si se compara la densidad real seca con la densidad neta, se produce un incremento de densidad del 10 % para ambos áridos reciclados, mientras que el árido natural alcanza un 1.5%. Como se mencionó anteriormente, considera el volumen macizo del árido más el volumen de los poros accesibles e inaccesibles de éste; la densidad neta por su parte, considera el volumen macizo del árido más el volumen de los poros inaccesibles. Nuevamente intervienen los poros accesibles, esta vez con el volumen asociado a ellos. Es así como la densidad neta de los áridos reciclados aumenta en mayor medida que la correspondiente al árido natural, pues el volumen considerado disminuye significativamente debido a la exclusión de los poros accesibles.

#### Absorción de agua.

La absorción de agua está relacionada con la porosidad que posea un árido, por lo tanto, se esperaba que los áridos de hormigón reciclado presentaran un elevado nivel de absorción, coincidiendo así con la totalidad de artículos que abordan este aspecto de los áridos en estudio.

El porcentaje de absorción de agua de los áridos naturales se encuentra dentro de los valores requeridos por la normativa. Para el árido grueso se registró 0.6 % (se establece un máximo de 2%), mientras que para el árido fino se obtuvo 2.4 % (se establece un máximo de 3%).

Por otro lado, se aprecia el considerable incremento de absorción experimentado por los áridos de hormigón reciclado, llegando a superar en casi siete veces el valor correspondiente para el árido grueso natural.

Resulta evidente que esta es la diferencia más notable en las propiedades físicas del árido de hormigón reciclado y uno de los aspectos más críticos para su empleo. Las causas que explican este fenómeno, actualmente se alzan sobre el criterio unificado de la comunidad científica que ha estudiado el tema. La causa de este comportamiento reside en el mortero adherido a la superficie de la partícula pétreo. Atendiendo estudios de microscopía óptica y electrónica, la elevada absorción podría producirse por la presencia de microgrietas de 2 a 4  $\mu$  presentes en la pasta de cemento hidratada adherida al árido (Malhotra, 1976). Es posible también que una parte de la absorción se desarrolle en la interfase mortero-agregado.

#### Contenido de huecos.

Se aprecia un incremento en el contenido de huecos, tanto en estado suelto como compactado, de los áridos reciclados respecto del árido natural. Este comportamiento era esperado, pues el contenido de huecos está muy relacionado con la forma que presente el árido en observación. Puesto que el contenido de huecos para un árido redondeado es de 33%, la ya mencionada angularidad de la partícula de árido reciclado produce un aumento de los vacíos entre granos. No obstante, esta diferencia no resulta tan marcada como la de la absorción.

#### Desgaste de Los Ángeles.

Se puede observar que la pérdida de masa es mayor en los áridos reciclados que en el árido natural. Si bien esta diferencia no es tan significativa, el incremento del valor de desgaste en los áridos de hormigón reciclado puede ser atribuible a dos causas: (1) debido a microfisuras generadas en los áridos durante el proceso de reciclado y chancado y; (2) debido a la cantidad y calidad del mortero adherido a la superficie de la partícula pétreo, que posee escasa resistencia al desgaste.

#### 4.2 Propiedades del hormigón en estado fresco

La Tabla 3 presenta los resultados de hormigón fresco obtenidos por los 18 hormigones desarrollados en la investigación. Con estos resultados se realizó un análisis estadístico de tablas ANOVAS para determinar estadísticamente con un 95% de confianza, las variables independientes que influyen en las propiedades del hormigón en estado fresco. El resultado del análisis se resume en la Tabla 4. En los párrafos siguientes se analiza cada propiedad en particular respecto de las variables que resultaron ser estadísticamente significativas.



Tabla 3. Propiedades del hormigón en estado fresco y endurecido

Hormigón	Tipo de Árido	Tipo de Cemento	Dosis de Cemento Kg/m <sup>3</sup>	Porcentaje de Árido Reciclado %	Cono (mm)	Aire (%)	Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )	7 días	28 días	7 días	28 días
C335N	Natural	Corriente	335	0	120	2,2	2.401	13,1	16,7	18.283	20.902
C450N	Natural	Corriente	450	0	90	2,1	2.409	20,4	27,4	21.461	24.591
A335N	Natural	Alta Resistencia	335	0	110	1,8	2.429	16,1	20,5	20.797	22.042
A450N	Natural	Alta Resistencia	450	0	80	1,7	2.429	25,7	32,8	22.260	26.688
C335L50	Reciclado Laboratorio	Corriente	335	50	105	1,3	2.357	8,0	13,8	4.324	8.089
C335L100	Reciclado Laboratorio	Corriente	335	100	100	2,8	2.338	11,2	14,8	12.123	9.002
C450L50	Reciclado Laboratorio	Corriente	450	50	65	1,9	2.364	17,0	21,6	14.586	21.383
C450L100	Reciclado Laboratorio	Corriente	450	100	70	2,0	2.278	14,1	20,5	10.390	19.822
C365L50	Reciclado Laboratorio	Corriente	365	50	70	1,9	2.367	9,9	17,1	7.125	13.426
C365L100	Reciclado Laboratorio	Corriente	365	100	85	2,4	2.324	12,6	16,3	13.128	13.459
A335L100	Reciclado Laboratorio	Alta Resistencia	335	100	60	1,6	2.309	14,0	18,1	10.895	9.153
C335D50	Reciclado Demolición	Corriente	335	50	105	2,9	2.352	9,5	12,0	9.777	7.018
C335D100	Reciclado Demolición	Corriente	335	100	90	2,3	2.329	11,1	14,9	10.167	11.370
C450D50	Reciclado Demolición	Corriente	450	50	70	2,0	2.351	16,4	24,0	17.589	13.599
C450D100	Reciclado Demolición	Corriente	450	100	80	2,3	2.262	14,5	20,9	9.466	18.224
C365D50	Reciclado Demolición	Corriente	365	50	95	1,8	2.354	10,2	18,0	9.992	5.626
C365D100	Reciclado Demolición	Corriente	365	100	80	2,3	2.172	13,0	18,8	11.406	13.900
A450D100	Reciclado	Alta Resistencia	450	100	65	1,9	2.338	23,1	30,2	13.104	14.263

Tabla 4. Variables estadísticamente significativas sobre las propiedades del hormigón en estado fresco

Variable Dependiente	Variable Independiente			
	Dosis de Cemento	Tipo de Cemento	Porcentaje de Árido reciclado	Tipo de Árido
Trabajabilidad	+	+	+	-
Densidad	-	-	+	-
Contenido de aire	-	+	-	-

+: Variable independiente estadísticamente significativa sobre la variable dependiente observada, con un 95% de confianza.  
 -: Variable independiente no estadísticamente significativa sobre la variable dependiente observada, con un 95% de confianza.

**Asentamiento de Cono de Abrams.**

Del análisis de la Tabla 4 se desprende que el asentamiento de cono se ve afectado principalmente por la dosis de cemento, tipo de cemento y por el porcentaje de árido reciclado utilizado. En general, se observa un leve descenso de cono en los hormigones con árido reciclado respecto de los hormigones patrón.

La figura 1a muestra el efecto de la dosis de cemento en la magnitud del asentamiento de cono. Del

análisis de esta figura se puede apreciar una pérdida de asentamiento de cono a medida que aumenta la cantidad de cemento empleada. Esto se advierte tanto en los hormigones tradicionales como en los elaborados a partir de árido reciclado. Lo anterior puede atribuirse a que el aumento de la dosis de cemento implica una mayor cantidad de partículas de cemento a ser hidratadas con la misma dosis de agua, lo que produciría la pérdida de asentamiento registrada.



Respecto al efecto del tipo de cemento sobre el asentamiento de cono, del análisis de la Figura 1b se puede inferir que el empleo de un cemento grado alta resistencia produce un mayor descenso del asentamiento de cono respecto del obtenido al utilizar cemento de grado corriente. Lo anterior puede atribuirse al grado de finura de las partículas del cemento,  $4150 \text{ cm}^2/\text{g}$  para cemento corriente y  $4615 \text{ cm}^2/\text{g}$  para grado alta resistencia.

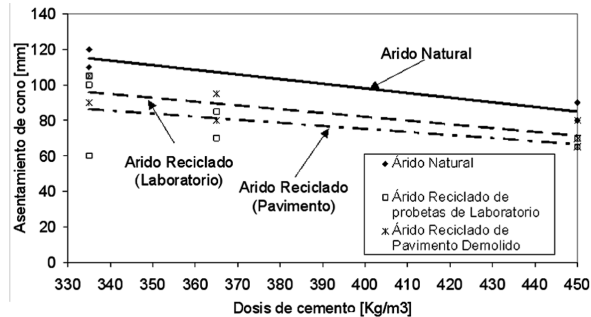


Figura 1a. Relación entre la dosis de cemento y el asentamiento de cono de Abrams separado por tipo de árido utilizado

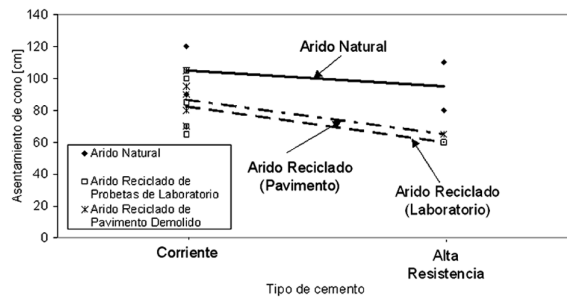


Figura 1b. Relación entre el tipo de cemento y el asentamiento de cono de Abrams separado por tipo de árido utilizado

Finalmente, de los resultados es posible inferir que el asentamiento de cono disminuye conforme aumenta el porcentaje de árido grueso de hormigón reciclado. Lo anterior podría explicarse porque los áridos de hormigón reciclado, a causa del chancado, adquieren una forma angulosa y una textura áspera, produciendo un incremento de la fricción interna que demanda una mayor cantidad de mortero para mantener cierta docilidad en el hormigón. Por otra parte, el mortero adherido al árido de hormigón reciclado será un factor crítico en prácticamente todas las características que serán transferidas al hormigón; para este caso en particular, la elevada absorción del mortero adherido a la partícula pétreo podría incurrir en una considerable pérdida del agua de amasado, para lo cual es preciso asegurar que las correcciones de dosificación practicadas a los áridos, tanto por absorción y humedad, se desarrollen rigurosamente.

Densidad del hormigón fresco.

Del análisis estadístico se determinó que la densidad del hormigón fresco se ve influenciada fundamentalmente por el porcentaje de árido reciclado utilizado en los hormigones en reemplazo de árido natural.

De los resultados mostrados, se puede inferir que se produce una diferencia entre los valores de densidad del hormigón fresco respecto de los resultados de hormigones fabricados con árido reciclado y con árido natural, presentando menores valores los hormigones con árido reciclado, tendencia que se hace más evidente a medida que se aumenta el porcentaje de árido reciclado. Este comportamiento se puede atribuir a la baja densidad que presenta el árido de hormigón reciclado respecto de la densidad registrada para el árido natural. Como se mencionó anteriormente, la baja densidad del árido reciclado reside en la presencia del mortero permeable adherido a la partícula pétreo.

#### 4.3 Propiedades del hormigón en estado endurecido Resistencia a la Compresión.

Existe un acuerdo general sobre el hecho de que la resistencia a compresión y flexión es algo menor comparada con la de las mezclas de control, viéndose influenciadas por factores claves, tales como: la resistencia del hormigón original, la razón entre áridos finos/gruesos del hormigón original, la razón entre el tamaño máximo del árido del hormigón original y del árido reciclado y la absorción de agua del árido de hormigón reciclado (Hansen-Narud, 1983; Park, 1999; Ravindrarajah-Stewart-Greco, 2001). Se ha observado en diversos estudios que la resistencia del hormigón de árido reciclado podría ser más baja que la correspondiente a un hormigón de control hecho con áridos naturales a una misma razón W/C, cuando la resistencia del hormigón de control excediera la resistencia del hormigón original del cual es obtenido el árido reciclado. Algunas evidencias muestran que cuando el hormigón falla, la adherencia del mortero al árido de hormigón chancado es la que constituye la unión más débil (Frondistou-Yannas, 1977).

Los resultados de la presente investigación de los hormigones elaborados a partir de áridos reciclados presentaron valores de resistencia a compresión disminuidos respecto de los alcanzados por los hormigones tradicionales. Esta pérdida de resistencia se vio influenciada principalmente por dos factores: por el porcentaje de árido de hormigón reciclado que reemplazó al árido grueso natural y por el tipo de árido utilizado en la confección de las mezclas.

Las figuras 2 y 3 presentan los resultados de

resistencia a la compresión respecto del porcentaje de áridos reciclado. En cuanto al efecto del porcentaje de árido reciclado sobre la resistencia a compresión de un hormigón de resistencia baja esperada (dosis de cemento de 335 kg/m<sup>3</sup>, ver Figura 2) y elaborado con cemento grado corriente, se registraron severas pérdidas de resistencia (entre 17% y 26% a los 28 días) cuando el reemplazo de árido grueso natural por árido grueso reciclado fue parcial. Cabe destacar que la mayor pérdida se produjo cuando se utilizó árido reciclado de pavimento demolido. Asimismo, cuando el porcentaje de sustitución fue total, se registraron pérdidas de resistencia de aproximadamente 10% para ambos tipos de árido reciclado. Este comportamiento podría atribuirse a la interacción de dos efectos: primero, a la baja resistencia del mortero adherido a la superficie de la partícula pétreo reciclada y; segundo, a un inadecuado acomodo entre las partículas de árido natural y reciclado de hormigón de demolición, considerando que éste último procedía de un pavimento de hormigón con tamaño máximo de árido de 40 mm (a diferencia de las probetas de laboratorio, constituidas por un árido de tamaño máximo 20 mm) y cuyo trituramiento generó una forma significativamente angulosa (97 % de las partículas correspondieron a material chancado y 2 % a lascas, a diferencia del 83 % chancado del árido de probetas de laboratorio). Posiblemente, para un hormigón de resistencia baja, éste sea un factor mucho más relevante que la cantidad de árido reciclado que contenga.

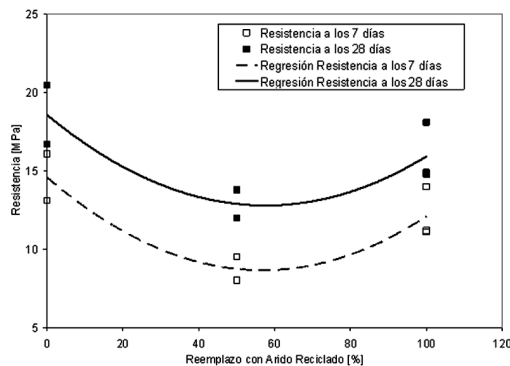


Figura 2. Relación entre la Resistencia a la compresión a los 7 y 28 días y el porcentaje de árido reciclado para una dosis de cemento de 335 Kg/m<sup>3</sup>

Por otra parte, para un hormigón de resistencia alta esperada (dosis de cemento de 450 kg/m<sup>3</sup>, ver figura 3) y elaborado con cemento grado corriente, las mayores pérdidas de resistencia (entre 24% y 25% a los 28 días) se produjeron cuando la sustitución de árido reciclado fue total, siendo las mezclas confeccionadas con árido

reciclado de antiguas probetas de laboratorio las más afectadas. Como puede advertirse, la pérdida de resistencia de estos hormigones se produjo en condiciones opuestas a la del caso anterior, tanto en porcentaje como en tipo de árido reciclado. Este comportamiento podría atribuirse a que, aunque sigue existiendo un inadecuado acomodo entre partículas de árido natural y reciclado cuando el porcentaje de reemplazo fue parcial, un hormigón con mayor contenido de cemento (resistencia más alta) es más susceptible a la calidad y cantidad de árido reciclado. Es así como las mayores pérdidas de resistencia se concentraron donde el porcentaje de sustitución de árido grueso natural fue total, trayendo consigo efectos relevantes como una mayor dosis de mortero adherido a las partículas trituradas, particularmente en el caso del árido de hormigón reciclado de probetas de laboratorio.

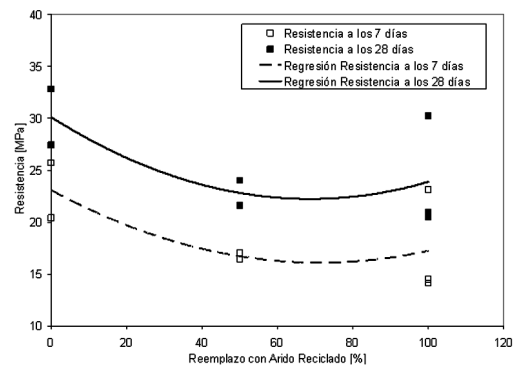


Figura 3. Relación entre la Resistencia a la compresión a los 7 y 28 días y el porcentaje de árido reciclado para una dosis de cemento de 450 Kg/m<sup>3</sup>

En cuanto al efecto del tipo de árido utilizado sobre la resistencia a compresión de un hormigón de resistencia alta esperada (dosis de cemento de 450 kg/m<sup>3</sup>) y elaborado con cemento grado alta resistencia, se registraron pérdidas de resistencia no tan marcadas (8% a los 28 días) cuando se reemplazó totalmente el árido grueso natural por árido de hormigón reciclado de pavimento demolido. Esto podría atribuirse a la baja calidad del mortero adherido a la partícula de árido reciclado o, para ser más preciso, a la eventual debilidad de la interfase mortero antiguo – árido antiguo o mortero nuevo – mortero antiguo. Cabe mencionar que para los hormigones de resistencia baja esperada, esta variable no resultó con efectos estadísticamente significativos sobre la resistencia a compresión.

Finalmente y de acuerdo a los antecedentes bibliográficos en los que se señalaba que las propiedades resistentes y elásticas de un hormigón de árido reciclado resultaban menores que las de un hormigón de árido



natural, aun conservando idéntica dosificación y granulometría – situación ya constatada en los análisis precedentes – se decidió incluir una tercera dosis de cemento en las mezclas de árido reciclado, para determinar el incremento de cemento que sería necesario para obtener una resistencia equivalente a la de la mezcla de control. De esta manera, se compararon las propiedades del hormigón patrón (con 335 kg/m<sup>3</sup> de cemento) con las correspondientes a los hormigones de árido reciclado que incluyeron un incremento de cemento de 30 kg/m<sup>3</sup> respecto de la menor dosis, obteniéndose una dosis de cemento de 365 kg/m<sup>3</sup>. Los resultados indicaron que estos últimos hormigones lograron una resistencia equivalente a la obtenida por el hormigón tradicional de árido natural. Este comportamiento se observó tanto en las mezclas de hormigón de árido reciclado de probetas de laboratorio como en las de pavimento demolido, ya sea con sustitución total o parcial del árido grueso natural. No obstante, esto es aplicable a un hormigón dosificado para resistencia baja y elaborado con cemento Portland Puzolánico grado corriente, siendo arriesgado predecir la dosis adicional que requeriría un hormigón diseñado para alcanzar resistencias superiores y preparado con otro tipo de cemento.

#### Módulo de Elasticidad.

Diversos investigadores afirman que los valores de módulo de elasticidad obtenidos por el hormigón de árido reciclado son considerablemente más bajos que los correspondientes a un hormigón de control (Park, 1999; Rashwan, 1997; Tavakoli-Soroushian, 1996; Ravindrajah-Stewart-Greco, 2001)

Los resultados de módulo de elasticidad de la presente investigación alcanzado por los hormigones preparados con árido reciclado indicaron severos descensos en relación con los valores obtenidos por el hormigón patrón. Al igual que para la resistencia y dada la relación existente entre ésta y el módulo de elasticidad, las propiedades elásticas de los hormigones en estudio se vieron altamente influenciadas por el porcentaje de árido reciclado y por el tipo de árido.

En cuanto al efecto del porcentaje de árido reciclado sobre el módulo de elasticidad de un hormigón de resistencia baja esperada (dosis de cemento de 335 kg/m<sup>3</sup>) y elaborado con cemento grado corriente, se registraron severos descensos (entre 42% y 44% a los 28 días) cuando se reemplazó totalmente el árido grueso natural por árido grueso reciclado. Estos bajos valores se vieron aún más marcados cuando el reemplazo fue parcial (descenso del módulo de elasticidad entre 50% y 66%

a los 28 días), resultando más disminuido al utilizar árido grueso reciclado de pavimento demolido.

Por otra parte, analizando los efectos del tipo de árido utilizado sobre el módulo de elasticidad de un hormigón de resistencia baja esperada (dosis de cemento de 335 kg/m<sup>3</sup>) y elaborado con cemento grado alta resistencia, se registró un descenso a los 28 días de 51% cuando se reemplazó totalmente el árido grueso natural por árido grueso reciclado. Asimismo, para un hormigón de resistencia alta esperada (dosis de cemento de 450 kg/m<sup>3</sup>) y elaborado con cemento grado alta resistencia, se registró un descenso a los 28 días de 45% cuando se reemplazó totalmente el árido grueso natural por árido grueso reciclado. Todo lo anterior podría atribuirse, además de las razones expuestas para la resistencia a compresión, a la baja calidad y deformabilidad del mortero adherido al árido de hormigón reciclado. Finalmente, la tentativa de utilizar un incremento de cemento de 30 kg/m<sup>3</sup> para alcanzar un módulo de elasticidad equivalente al del hormigón patrón demostró que no fue suficiente o que, probablemente, este propósito no pasa exclusivamente por aumentar la dosis de cemento en la dosificación de las mezclas de árido reciclado. Esta propiedad sigue siendo altamente susceptible a la calidad del árido de hormigón reciclado y a la deformabilidad del mortero adherido a éste.

## 5. Conclusiones

En general, se observaron alteraciones al comportamiento en prácticamente todas las propiedades físicas de los áridos reciclados, así como en las propiedades resistentes y elásticas de los hormigones preparados con estos. Algunas de las diferencias con el hormigón patrón son menores y no constituyen un inconveniente para su utilización. Sin embargo, para controlar aquellas propiedades afectadas severamente es indispensable introducir agentes que proporcionen una mejoría a este tipo de hormigones.

El proceso de triturado aplicado, tanto en el hormigón de laboratorio como en el de pavimento demolido, ocasionó que el árido reciclado resultante tuviese una forma fundamentalmente angulosa y textura áspera. Aun cuando esta situación se presenta para ambos áridos reciclados, es notorio que para el producido a partir de hormigón de pavimento demolido se presenta de manera mucho más marcada, lo cual podría atribuirse a la forma que presentaba el árido con el cual se elaboró el hormigón original.

Analizando las propiedades físicas que poseen



los áridos de hormigón reciclado respecto de los áridos naturales, se destaca la notable diferencia de absorción de agua, la cual llega a superar en casi siete veces el valor correspondiente para el árido grueso natural, constituyéndose como uno de los aspectos más críticos para su empleo. Las causas que explican este fenómeno serían consecuencia del mortero adherido a la superficie de la partícula pétreo y en particular, a la presencia de microgrietas de 2 a 4  $\mu$  en la pasta de cemento hidratado adherida al árido. Es posible también que una parte de la absorción se desarrolle en la interfase mortero-agregado.

Al momento de analizar las propiedades del hormigón en estado fresco, se observó que el asentamiento de cono de Abrams se ve influenciado principalmente por la dosis de cemento, por el tipo de cemento y por el porcentaje de árido chancado utilizado como reemplazo del árido grueso natural. En general, se observa un leve descenso de cono en las mezclas con árido reciclado respecto de las mezclas de control. Asimismo, la densidad del hormigón fresco también se ve altamente influenciada por el porcentaje de árido reciclado que sustituye al árido grueso natural en los hormigones estudiados, disminuyendo a medida que la presencia de árido reciclado aumenta.

Respecto de las propiedades del hormigón en estado endurecido, se llegó a las siguientes conclusiones:

Los hormigones elaborados a partir de áridos reciclados presentaron valores de resistencia a compresión disminuidos respecto de los alcanzados por los hormigones tradicionales. Esta pérdida de resistencia se vio influenciada principalmente por dos factores: por el porcentaje de árido de hormigón reciclado que reemplazó al árido grueso natural y por el tipo de árido utilizado en la confección de las mezclas.

La obtención de una resistencia a compresión equivalente a la de un hormigón tradicional puede ser posible incrementando la dosis de cemento en aproximadamente 10%. No obstante, esto es aplicable a un hormigón dosificado para resistencia baja y elaborado con cemento Portland puzolánico grado corriente, siendo arriesgado predecir la dosis adicional que requeriría un hormigón diseñado para alcanzar resistencias superiores y preparado con otro tipo de cemento.

Respecto del módulo de elasticidad alcanzado por los hormigones preparados con árido reciclado, los resultados indicaron severos descensos en relación con los valores obtenidos por el hormigón patrón. Al igual que para la resistencia y dada la relación existente entre ésta y el módulo de elasticidad, las propiedades elásticas de los hormigones en estudio se vieron altamente

influenciadas por el tipo de árido y por el porcentaje de árido reciclado. Por otra parte, la obtención de un módulo de elasticidad equivalente al de un hormigón tradicional no pasa exclusivamente por aumentar la dosis de cemento en la dosificación de las mezclas de árido reciclado. Esta propiedad sigue siendo altamente susceptible a la calidad del árido de hormigón reciclado y a la deformabilidad del mortero adherido a éste.

## 6. Agradecimientos

Los autores agradecen al Laboratorio Nacional de Vialidad de Chile por la asesoría técnica y la buena disposición del personal para llevar a buen término la presente investigación. Asimismo, los autores agradecen la donación de materiales y cooperación de la empresa de cementos Polpaico.

## 7. Referencias

- Frondistou-Yannas, (1977), Waste concrete as aggregate for new concrete. *ACI Journal*, vol.74, N°8, pp. 373-376.
- Hansen T. C., y Narud H. (1983), Strengths of recycled concrete made from crushed concrete coarse aggregate. *Concrete International Journal*, vol. 5, N°1, pp. 79-83.
- Loyola O., y Muñoz M.P. (2002), Utilización del Hormigón Reciclado como Material de Reemplazo del Arido Grueso en la Fabricación de Hormigones. Memoria de Ingeniero Civil, Universidad de Santiago de Chile.
- Malhotra V. M. (1976), The use of recycled concrete as a new aggregate. *Energy and Resource Conservation in the Cement and Concrete Industry*, Canmet, Ottawa.
- Park S. G. (1999), Recycled concrete construction rubble as aggregate for new concrete. *Building Research Levy and the Foundation for Research, Science and Technology. Study Report N°86*. Nueva Zelanda.
- Rashwan M. S., y Abourizk S. (1997), The properties of recycled concrete. *Concrete International Journal*, vol. 19, N°7.
- Ravindrarajah R. S., Stewart M., y Greco D. (2001), Variability of recycled concrete aggregate and its effects on the properties of concrete. *Second International Conference on Engineering Materials*.
- Tavakoli M., y Soroushian P. (1996), Strength of recycled aggregate concrete made using field-demolished concrete as aggregate. *ACI Material Journal*, vol. 93, N°2, pp. 182-190.