

## **ANÁLISIS DE VARIABLES QUE AFECTAN A LA RESISTENCIA DEL HORMIGÓN CON ÁRIDOS RECICLADOS PROCEDENTES DE TUBERÍAS PREFABRICADAS**

**<sup>1</sup>\*Tarela, Ester; <sup>1</sup>Letelier, Viviana; <sup>1</sup>Osses, Rodrigo; <sup>1</sup>Cárdenas, Juan Pablo; <sup>2</sup>Moriconi, Giacomo**

**<sup>1</sup>Departamento de Obras Civiles. Universidad de La Frontera  
Av. Francisco Salazar, 01145, Temuco, Chile**

**<sup>2</sup>Department of Scienze e Ingegneria della Materia, dell’Ambiente ed Urbanistica  
(SIAMU)**

**Università Politecnica delle Marche, Italy  
e-mail: \*ester.tarela@ufrontera.cl**

### **RESUMEN**

Se analiza la variación de la resistencia a compresión y tracción de hormigones con áridos reciclados al modificar diversas variables que intervienen en su comportamiento. Los hormigones estudiados se dosifican para una resistencia a compresión de 30MPa. Los áridos reciclados se obtienen de escombros de tuberías prefabricadas de hormigón con una resistencia a compresión de 20MPa. Se consideran cuatro parámetros en este estudio: el porcentaje de sustitución de los áridos gruesos naturales por estos áridos reciclados; la cantidad de mortero adherido a la superficie de los áridos, que se controla aplicando un proceso de abrasión mecánica en lugar de los métodos químicos tradicionales; el tamaño máximo de los áridos gruesos reciclados de sustitución y el porcentaje de adición de cemento especificado en la dosificación. Se utiliza el método estadístico de Taguchi considerando 3 niveles para cada uno de los 4 parámetros para determinar sus efectos sobre la resistencia del material, minimizando el número de ensayos experimentales necesarios. El ensayo se realiza tras periodos de curado de 28 y 90 días. Estos 3 niveles se establecen para cada una de las variables consideradas en base a estudios anteriores o ensayos experimentales previos. Los resultados se cuantifican mediante el método de análisis de varianza (ANOVA), para establecer qué variables afectan en mayor medida a las resistencias finales. Los resultados muestran que una restricción del porcentaje de áridos sustituidos al 30% y una reducción del mortero adherido mediante procesos de abrasión permiten obtener materiales con una resistencia a la compresión equivalente a la de un hormigón de control de resistencia media, cuando el material ha sido curado durante 28 días. La influencia del tamaño del árido reciclado aumenta considerablemente para 90 días de curado, mientras que la importancia del porcentaje de adición de cemento aumenta al considerar la resistencia a tracción. Los resultados indican que controlando ciertos parámetros se obtienen materiales con propiedades mecánicas equivalentes a las de un hormigón de control, permitiendo la reutilización de escombros y reduciendo la cantidad de áridos gruesos naturales necesarios de forma significativa.

**Keywords:** Áridos reciclados; Hormigón reciclado; Propiedades mecánicas del hormigón; Resistencia a compresión.

## 1.- Introducción

El desarrollo sostenible se ha convertido en los últimos años en una obligación, tanto en la ingeniería de construcción como en otras áreas, debido a una fuerte demanda social. Como parte de este proceso global, la utilización de hormigón obtenido a partir de escombros no sólo concierne a regiones industrializadas, sino que responde a una necesidad mundial.

En general, la industria del hormigón prefabricado produce en torno a un 5% de pérdidas de producto debido a materiales defectuosos o fallos de producción. Este material se deshecha y es considerado un residuo en las plantas de producción. Sin embargo, la ausencia de cuerpos extraños como materiales cerámicos, cal, restos de pintura o de armadura hacen de estos residuos el candidato perfecto para el reciclado. Considerar su reutilización en la misma planta de producción ahorraría costos, no solo en material sino también en gastos de gestión de residuos.

Estudios previos en hormigones con áridos reciclados (0,0,0,0,0) muestran diferencias significativas en las propiedades mecánicas de estos materiales respecto a los convencionales.

Una de las causas principales de esta pérdida en la resistencia es el mortero adherido a la superficie de los áridos reciclados. Cuando se utiliza este tipo de áridos es necesario considerar dos interfaces en lugar de una; la habitual (vieja interfaz), entre el mortero viejo y los áridos; y una nueva (nueva interfaz), entre los áridos (incluyendo el mortero adherido) y la nueva matriz de cemento (0,0,0). En consecuencia, la calidad y cantidad de mortero adherido a la superficie de los áridos reutilizados tendrá una gran influencia en el comportamiento mecánico del hormigón reciclado, en particular, en su resistencia (0,0).

En los últimos tiempos se han estudiado diversas alternativas para controlar estas pérdidas en la resistencia. La primera y más habitual consiste en limitar la cantidad de áridos reciclados. Análisis previos (0,0,0,0,0,0,0,0,0) prueban que las propiedades del hormigón no se modifican de forma significativa si se limita la cantidad de áridos sustituidos a porcentajes relativamente bajos. Es por ello que, en estos días, varias normativas técnicas europeas permiten el uso de hasta un 30% de áridos reciclados en la producción de hormigón estructural.

Otras formas de maximizar la resistencia han sido estudiadas. Por ejemplo, ajustar la proporción agua/cemento, aumentando la cantidad de cemento. Esto reduciría el efecto de los áridos reciclados y, en consecuencia, limitaría la reducción de la resistencia a compresión (0,0,0).

El tamaño de los áridos también juega un papel importante en las propiedades del nuevo material. Si se sustituyen áridos finos, la superficie involucrada (interfaces nueva y vieja) aumenta, incrementando la cantidad de mortero adherido en la mezcla de cemento y el hormigón. Su caracterización es compleja, haciéndolo altamente impredecible, dando lugar a alteraciones inesperadas en las propiedades del hormigón fresco y endurecido 0.

En resumen, el problema principal en la reutilización de áridos reciclados es el mortero antiguo adherido. Diversos estudios tratan el tema de la reducción de la cantidad de este mortero. Ismail & Ramli 0 utilizan diferentes tipos de ácido para minimizar o incluso eliminar las partículas sueltas de mortero adherido a la superficie de los áridos. Las propiedades físicas del hormigón mejoran significativamente, una reducción del mortero antiguo mejora la calidad de las superficies de contacto entre la nueva matriz de cemento y los áridos, aumentando la resistencia mecánica del hormigón.

Teniendo en cuenta estos precedentes, se analizarán los límites óptimos de las variables mencionadas (porcentaje de áridos reciclados, porcentaje de adición de

cemento, tamaño de los áridos de sustitución y la cantidad de mortero adherido), con el fin de obtener resistencias similares a las que presenta un hormigón de control.

## 2.- Descripción del problema

### 2.1.- Materiales

Los áridos gruesos utilizados en esta investigación se obtienen a partir de escombros de hormigón prefabricado de tuberías cilíndricas con una resistencia media a compresión de 20MPa tras 28 días de curado, proporcionadas por una compañía local (*Prefabricados Burzios*, Temuco, Chile). Los escombros se muelen en una trituradora de mandíbula, produciendo áridos de un tamaño máximo de 30mm, posteriormente clasificados mediante tamizado mecánico para utilizar únicamente la fracción entre 6.3 y 19.3mm.

En estudios previos se reduce la cantidad de mortero principalmente mediante la aplicación de disolventes que actúan sobre el material adherido. En este caso se utiliza un proceso mecánico, utilizando una máquina de desgaste de Los Ángeles para provocar abrasión. La cantidad de mortero se cuantifica en función de las revoluciones aplicadas. El procedimiento se ilustra en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

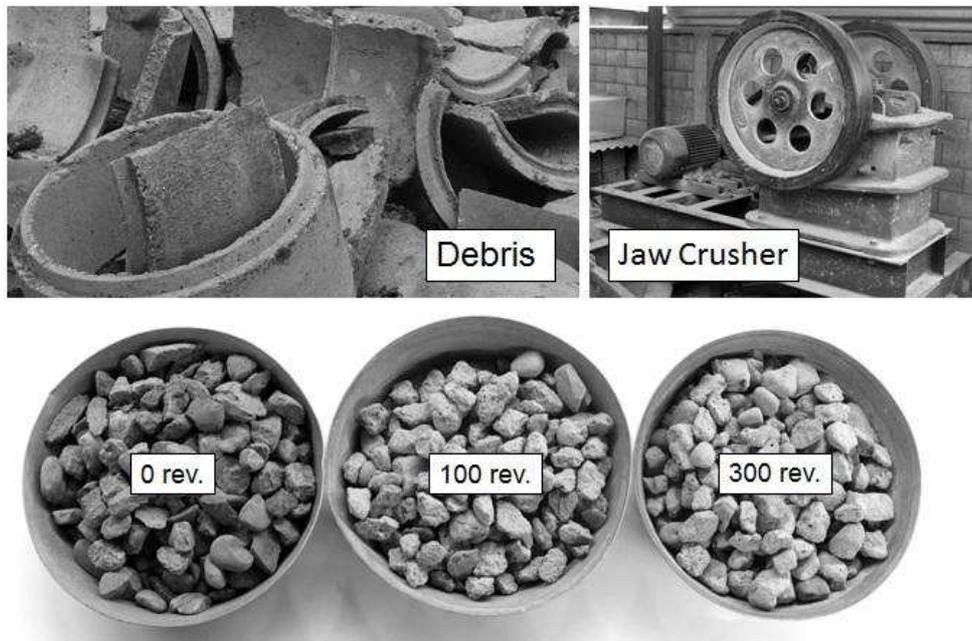


Fig. 10 “Los escombros (debris) molidos en la trituradora de mandíbula (jaw crusher). Ejemplo de áridos sin abrasión (0rev), abrasión mecánica a 100rev y 300rev”

En la Tabla 1 se presentan los valores de la densidad real y la absorción para estos áridos. Los áridos naturales presentan valores más altos de densidad seca ( $G_N$ ) que los reciclados ( $G_R$ ), debido al mortero adherido a su superficie. Por lo tanto, la densidad de los áridos aumentará al reducir la cantidad de mortero.

	Arena	$G_N$	$G_R$	$G_{R100R}$	$G_{R300R}$
<b>Densidad seca (<math>Kg/m^3</math>)</b>	2630	2666	2300	2330	2420
<b>Absorción de agua (%)</b>	1,4	1,7	6,2	5,3	4,0

Tabla 1 “Densidades y absorciones de los áridos”.  $G_N$ : grava natural;  $G_R$ : grava reciclada sin erosión;  $G_{R100r}$ : grava reciclada con erosión a 100rev;  $G_{R300r}$ : grava reciclada con erosión a 300rev.

Por otro lado, el porcentaje de absorción de agua de los áridos reciclados es casi 3.6 veces mayor que la de los áridos naturales. En cualquier caso, al aumentar el nivel de abrasión, la absorción disminuye hasta valores de 3.1 y 2.4 veces la de los áridos naturales para 100rev y 300rev, respectivamente.

Las características del cemento puzolánico utilizado se muestran en la Tabla 2.

	Valores	Requerimientos NCh 148 Of. 68
<b>Características físicas y mecánicas</b>		
Peso específico (g/cm <sup>3</sup> )	2,8	
Expansión en Autoclave (%)	0,1	1,0 max
Fraguado inicial (hh:mm)	02:40	01:00 min
Fraguado final (hh:mm)	03:40	12:00 max
<b>Resistencia a compresión (kg/cm<sup>2</sup>)</b>		
3 días	280	
7 días	320	180 min
28 días	410	250 min
<b>Características químicas</b>		
Pérdida por calcinación (%)	4,0	5,0 max
S <sub>03</sub> (%)	3,5	4,0 max

Tabla 2 "Características del cemento puzolánico".

## 2.2.- Método experimental

Durante la fase experimental se analizan las diferencias en la resistencia a compresión y tracción entre el hormigón con áridos reciclados y un hormigón de control con áridos naturales. Se llevan a cabo diferentes ensayos para identificar qué variables tienen mayor influencia en las propiedades finales del material.

De acuerdo con los resultados obtenidos por otros autores y a los rangos establecidos por diversas normativas, se consideran tres valores o niveles para cada una de las variables:

- Porcentaje de áridos reciclados: 20%, 30% y 40%. Esta elección se basa teniendo en cuenta las normativas técnicas que a día de hoy consideran el uso de áridos reciclados.
- Porcentaje de cemento, se establecen en 0%, 5% y 10%, en base a estudios anteriores (0,0,0) pero utilizando material nacional (chileno).
- Tamaño de los áridos reciclados: 6.3-9.5mm, 9.5-12.5mm y 12.5-19.3mm.
- Cantidad de mortero adherido: 0rev, 100rev y 300rev. El uso de abrasión mecánica para reducir la cantidad de mortero adherido a los áridos es una técnica nueva. Los niveles se establecieron a partir de pruebas experimentales previas al análisis.

Para analizar todos los escenarios posibles y determinar la influencia de cada variable deberían considerarse todas las combinaciones posibles. Este diseño factorial implicaría desarrollar 3<sup>4</sup> ensayos. Para reducir este número se aplica el modelo estadístico de Taguchi [21]. Utilizando una combinación de 9 vectores ortogonales el número de dosificaciones requeridas puede minimizarse maximizando la información que aportan los resultados. En este caso se consideran 4 variables independientes con tres valores o niveles cada una, por lo que se utiliza una combinación ortogonal L<sub>9</sub>, limitando el número de ensayos a 9. El método supone que las variables no interactúan entre sí, lo que implica que el efecto de la variación de uno de los parámetros no depende del estado del resto de variables independientes. En la Tabla 3 se muestran los 9 vectores que se consideran. Los resultados se analizarán aplicando el método de análisis de varianza ANOVA.

	Tamaño (mm)	Cemento (%)	Cantidad áridos (%)	Abrasión (rev)
H1	6,3-9,5	0	20	0
H2	6,3-9,5	5	30	100
H3	6,3-9,5	10	40	300
H4	9,5-12,5	0	20	0
H5	9,5-12,5	5	30	100
H6	9,5-12,5	10	40	300
H7	12,5-19,3	0	20	0
H8	12,5-19,3	5	30	100
H9	12,5-19,3	10	40	300

Tabla 3 “Valores de los parámetros utilizados en cada ensayo”

Todas las muestras se realizaron utilizando arena natural, únicamente los áridos gruesos son parcialmente reemplazados por áridos gruesos reciclados.

Se miden las propiedades, consistencia, densidad aparente y contenido de aire de los hormigones. Las propiedades mecánicas se evalúan mediante ensayos de compresión y tracción. Los ensayos de compresión se llevan a cabo siguiendo las normativas NCh1037 y NCh1017, utilizando tres muestras cúbicas de 15x15x15cm curadas durante 28 y 90 días. Los de tracción se realizan siguiendo la normativa NCh1038, utilizando tres muestras prismáticas de 15x15x50cm, curadas durante 28 días.

### 3.- Metodología

Se diseñan las diferentes mezclas utilizando el método de Faury [22] calibrado para una resistencia a compresión de 30MPa tras 28 días de curado. Se considera una proporción agua/cemento de 0.42 para el hormigón de control y hormigones sin adición de cemento. Cuando se considera la adición de cemento esta proporción se reduce un 5 o un 10%.

Para calcular la cantidad final de agua utilizada en cada mezcla se somete a los áridos reciclados a un proceso de pre-saturación alcanzando ésta un valor del 80%. De acuerdo a trabajos previos, este proceso de pre-saturación ayuda a sellar los poros en los áridos reciclados, lo que limita el intercambio de agua y evita problemas con la manejabilidad del hormigón fresco y la proporción agua/cemento (0,0).

Los valores utilizados en la dosificación de los hormigones, considerando los niveles preestablecidos por el método de Taguchi [21], y los resultados obtenidos del cono de Abram se muestran en la Tabla 4.

Todas las muestras se elaboran en condiciones de laboratorio y se extraen del molde 24±2 horas tras realizar la mezcla. Después se sumergen en agua con cal a 23±3°C durante el tiempo de curado necesario (28 o 90 días).

	Arena (Kg/m <sup>3</sup> )	Gn 2,36-19,36 mm	Gr 36,3-19,3 (mm)	Cemento (Kg/m <sup>3</sup> )	Agua (Kg/m <sup>3</sup> )	Consistencia (cm)	Aire (%)
H <sub>0</sub> C	781,8	1024,2	-	382,3	162,6	2,5	1,1
H <sub>1</sub> R	781,8	819,3	204,8	382,3	162,6	1,5	1,5
H <sub>2</sub> R	781,8	717,0	307,3	401,4	162,6	1,5	1,3
H <sub>3</sub> R	781,8	614,6	409,6	420,5	162,6	1,3	1,3
H <sub>4</sub> R	781,8	819,3	204,8	382,3	162,6	4,4	1,7
H <sub>5</sub> R	781,8	717,0	307,3	401,4	162,6	3,0	1,6
H <sub>6</sub> R	781,8	614,6	409,6	420,5	162,6	3,2	1,1
H <sub>7</sub> R	781,8	819,3	204,8	382,3	162,6	3,8	1,0
H <sub>8</sub> R	781,8	717,0	307,3	401,4	162,6	5,5	1,4
H <sub>9</sub> R	781,8	614,6	409,6	420,5	162,6	3,0	1,8

Tabla 4 “Propiedades del hormigón de control (N) y de los reciclados (R) con cada dosificación”

Se llevan a cabo los ensayos siguiendo la normativa NCh1037 Of2009 en cada una de las muestras cúbicas, aplicando la carga formando un ángulo recto a la posición de moldeo.

Los ensayos de resistencia a tracción en las muestras prismáticas se llevan a cabo aplicando la carga formando un ángulo recto respecto a la posición de moldeo, de acuerdo con los estándares chilenos NCh1038 Of2009.

En todos los casos se realizan los ensayos para tres probetas por cada dosificación tomando la media como resultado.

#### 4.- Resultados y discusión

Los resultados para las resistencias a compresión y tracción para cada una de las muestras se muestran en la Tabla 5.

Muestra	Compresión (MPa)		Tracción (MPa)
	28 días	90 días	28 días
H <sub>0</sub> C	34,8	40,2	5,3
H <sub>1</sub>	25,5	34,8	4,2
H <sub>2</sub>	30,5	39,2	5,0
H <sub>3</sub>	29,6	36,5	5,1
H <sub>4</sub>	29,7	35,1	4,9
H <sub>5</sub>	35,9	36,2	4,4
H <sub>6</sub>	25,0	32,4	4,6
H <sub>7</sub>	28,7	38,4	4,0
H <sub>8</sub>	35,7	43,1	4,2
H <sub>9</sub>	26,1	36,9	5,5

Tabla 5 “Resultados para cada muestra”

##### 4.1.- Resistencia a compresión

En la Fig. 11 se muestran los resultados para la resistencia a compresión para 28 días de curado. Sólo dos muestras con áridos reciclados, H<sub>5</sub> y H<sub>8</sub>, que alcanzan valores de 35.9 y 35.7MPa respectivamente, igualan o superan la resistencia del hormigón de control (34.8MPa). Ambas muestras tienen un 30% de áridos reciclados a los que se aplicó abrasión a 100rev y llevan un 5% de adición de cemento. A pesar de que todas las muestras se diseñaron para alcanzar una resistencia mínima de

30MPa, solo las tres que contienen un 30% de áridos reciclados, H2, H5 y H8, sobrepasaron este valor.

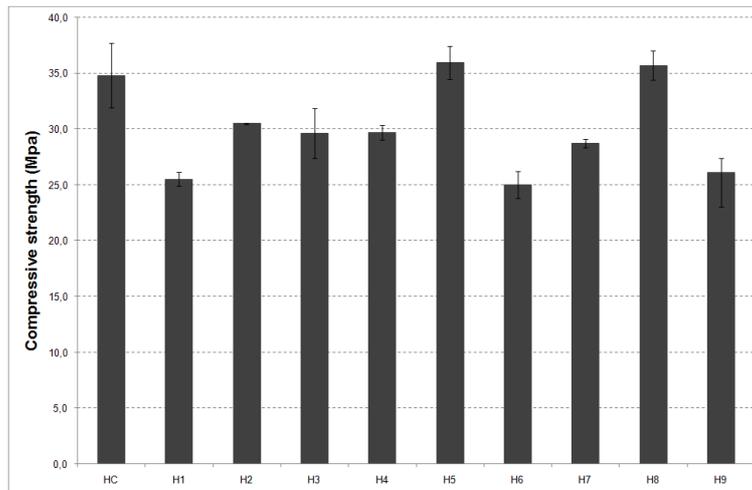


Fig. 11 “Resistencia a compresión después de 28 días de curado”.

Los valores mínimos de resistencia a compresión se obtuvieron para las muestras H1, H6 y H9, con un descenso de entre un 25% y un 28% del valor obtenido para la muestra de hormigón de control. Estas muestras contienen un 40% de áridos reciclados sin abrasión ni adición de cemento. Las otras tres muestras, H3, H4 y H7, presentan una disminución de la resistencia a compresión de entre el 15% y el 17% respecto al hormigón de control.

La Fig. 12 muestra los valores de resistencia a compresión obtenidos después de 90 días de curado. Tras un largo tiempo de curado todas las muestras superan la resistencia de diseño. De todas formas, solo la muestra H8 supera la resistencia del hormigón de control. H6 presenta el valor mínimo, un 19% por debajo del valor obtenido por el hormigón de control. El resto están entre un 5% y un 13% por debajo.

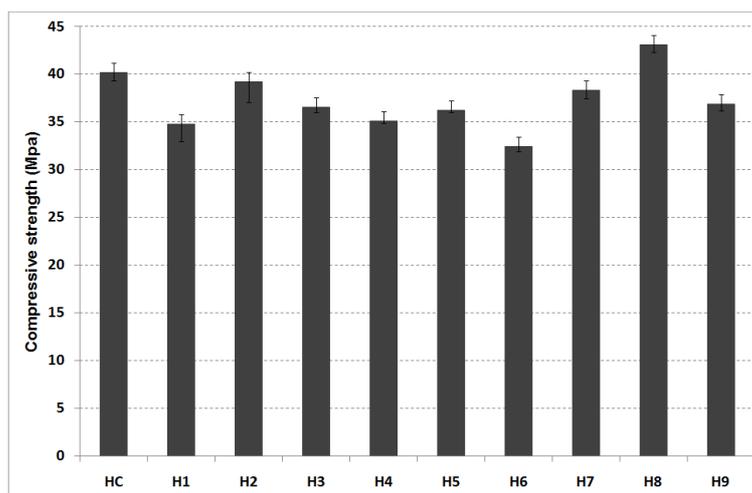


Fig. 12 “Resistencia a compresión después de 90 días de curado”.

Los resultados evidencian que los hormigones presentan un mejor comportamiento tras 90 días de curado (Fig. 13). Esta conclusión coincide con estudios previos (0,0) que atribuyen la resistencia a compresión a una unión más fuerte en la interfaz cemento-áridos gruesos. Yu & Shui 0 postulan que durante el proceso de hidratación del cemento algunas partículas no reaccionan. Al utilizar áridos reciclados estas partículas están presentes en el mortero adherido a la superficie, así que, cuando se

lleva a cabo un nuevo proceso de hidratación podrían reactivarse, dando lugar a un aumento de la resistencia a compresión a largo plazo. Además, teniendo en cuenta que los procesos de hidratación y endurecimiento son significativamente más lentos cuando se utilizan áridos reciclados (0,0,0) podrían crearse enlaces más fuertes entre el cemento y los áridos gruesos reciclados, lo que podría compensar hasta cierto punto los efectos negativos del uso de áridos más débiles cuando se aplica un curado de larga duración.

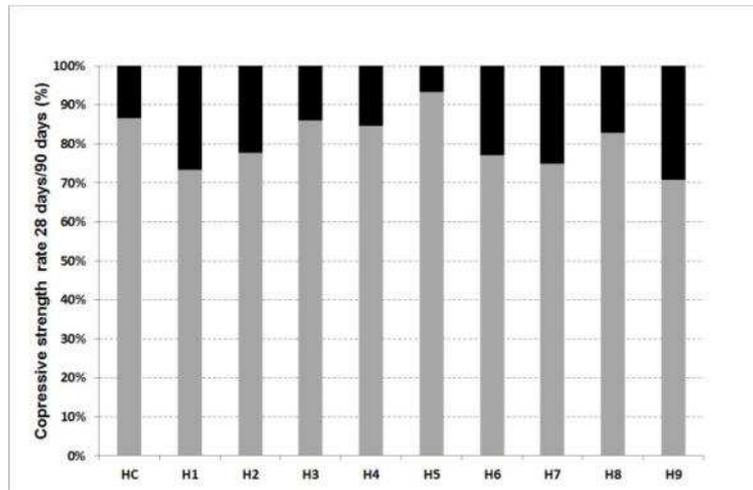


Fig. 13 “Resistencia a compresión relativa tras 28 días/tras 90 días de curado”.

#### 4.2.- Influencia de cada variable

En esta sección, los resultados obtenidos utilizando el método de optimización de Taguchi [21] se interpretan para determinar la influencia de cada uno de los parámetros en la resistencia a compresión tras 28 y 90 días de curado.

En la Fig. 14 se muestra la influencia de dos parámetros, el nivel de abrasión y el porcentaje de adición de cemento, en la resistencia a compresión. Las curvas para ambos parámetros tienen una forma similar, aumentando la resistencia a compresión al aumentar sus valores. El efecto es más significativo para los resultados obtenidos tras 28 días de curado, un aumento del 0% al 10% en la adición de cemento resulta en una muestra un 8% más resistente y un aumento en la abrasión de 0rev a 300rev resulta en un material un 14% más resistente.

Tras 90 días de curado la adición de cemento prácticamente no aumenta el efecto (en torno a un 1% de aumento en la resistencia a compresión), lo que podría deberse a las propiedades mecánicas originales del hormigón de control, que controla los máximos alcanzables al añadir áridos reciclados 0. En cuanto al proceso de abrasión, la resistencia a compresión aumenta un 6% cuando se aplican 300rev. Este comportamiento está de acuerdo con las observaciones de Matias et al. 0 sobre el efecto de las partículas planas angulares. Consideran que este tipo de partículas puede dar lugar a estratificación, limitando la durabilidad y resistencia del hormigón. Este efecto puede controlarse utilizando áridos más redondeados. Cuando se utilizan áridos reciclados, el proceso de abrasión provoca un cambio en la forma, suavizando los bordes y dando lugar a un material más redondeado. Además, Ismael y Ramli 0 concluyen que uno de los principales factores que causan los valores bajos de resistencia a compresión en hormigones con áridos reciclados es el mortero adherido a sus superficies; y Gonzalez y Etxeberria 0 señalan que el uso de áridos reciclados con niveles más elevados de absorción afecta a las propiedades finales del hormigón. El proceso de abrasión, como se muestra en la Tabla 1 da lugar a un descenso en los niveles de absorción al reducir el mortero adherido.

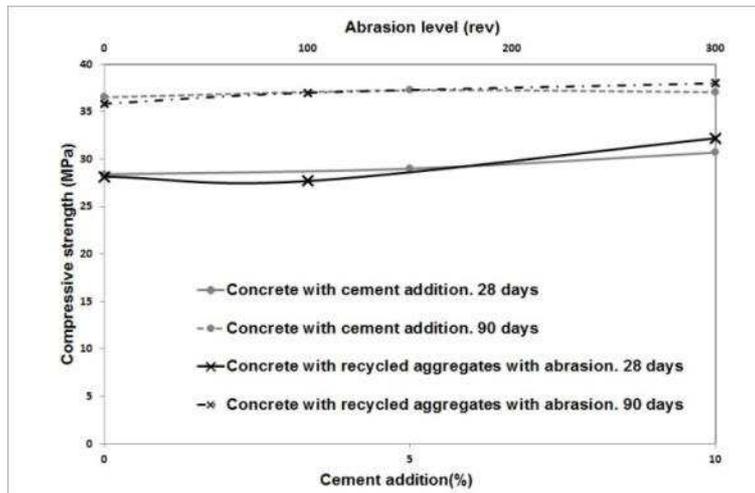


Fig. 14 “Variación de la resistencia a compresión con el nivel de abrasión y el porcentaje de adición de cemento tras 28 y 90 días de curado”.

El efecto de la cantidad de áridos reciclados y su tamaño mínimo se analizan en la Fig. 15. Cuando el tamaño máximo de los áridos aumenta de 9.5mm a 19.3mm la resistencia aumenta un 8% para 28 días de curado y un 7 % para 90 días. El uso de partículas de mayor tamaño reduce la cantidad de mortero en la mezcla, reduciendo las interfaces y por lo tanto las zonas debilitadas. Cuando el porcentaje de áridos reciclados alcanza un 40% la resistencia a compresión decae un 14% y un 12% respecto de los valores obtenidos con un 30%, tras 28 y 90 días de curado respectivamente. Kwan et al. 0 y Gonzalez y Etxeberria 0 concluyen que este decaimiento responde a la baja calidad del mortero adherido.

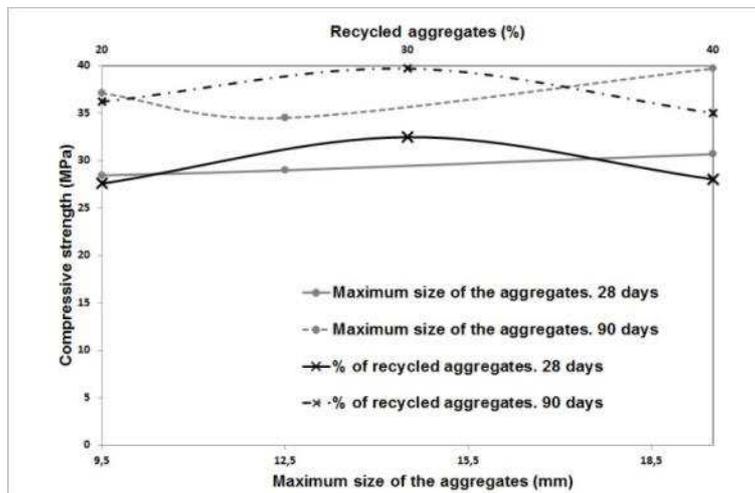


Fig. 15 “Variación de la resistencia a compresión con porcentaje y el tamaño de los áridos reciclados tras 28 y 90 días de curado”.

La Tabla 6 muestra los resultados del ANOVA a partir de los valores obtenidos mediante el método de Taguchi.

Variable	GL	Suma Cuad		Varianza (V)		Participación (%)	
		28d	90d	28d	90d	28d	90d
<b>% Áridos</b>	2	88.8	48.7	44.4	24.3	69.0	35.9
<b>Abrasión</b>	2	20.4	11.4	10.2	5.7	15.9	7.9
<b>Cemento</b>	2	14.1	0.9	7.0	0.5	10.9	0.2
<b>Tamaño max</b>	2	5.4	69.4	2.7	34.7	4.23	51.4

Tabla 6 “Resumen de los resultados del ANOVA para la resistencia a compresión”

Las tasas de participación varían con los días de curado. Tras 28 días, los parámetros más significativos son la cantidad de áridos reciclados y el nivel de abrasión, mientras que tras 90 días el tamaño de los áridos gana importancia en detrimento del nivel de abrasión, que apenas tiene influencia.

#### 4.3.- Resistencia a tracción

Los resultados obtenidos para la resistencia a tracción se muestran en la Fig. 16. Todos los valores se encuentran entre 4 y 5.5MPa, presentando diferencias leves entre sí. Autores (0,0,0) concluyen que la resistencia a tracción no está tan influenciada por la cantidad o calidad de los áridos reciclados como la resistencia a compresión.

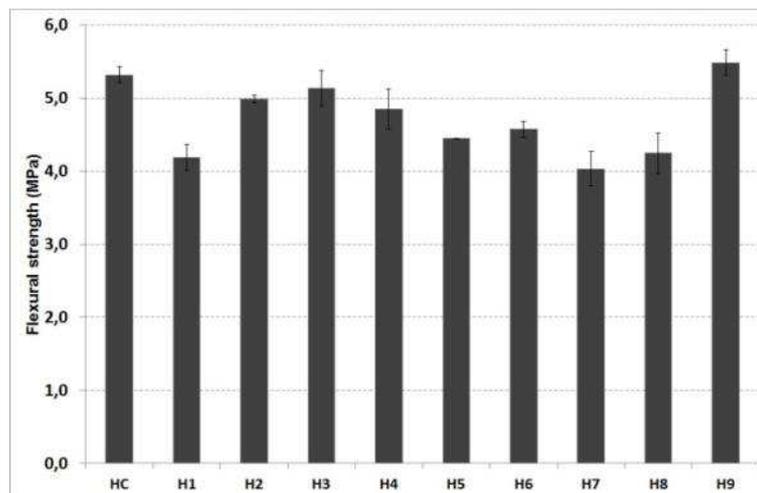


Fig. 16 “Resistencia a tracción tras 28 días de curado”.

Los valores más altos se obtienen para las muestras H3, H4, H5 y H9, tres de ellas contienen más de un 30% de áridos reciclados y más de un 5% de adición de cemento. Por otro lado las muestras con los valores mínimos, H1, H7 y H8, contienen un 30% o menos de áridos reciclados y dos de ellas no contienen adición de cemento. La Fig. 17 muestra los resultados para cada una de las variables. La resistencia a tracción aumenta levemente con la cantidad de áridos reciclados. Este efecto puede deberse a la textura de estos áridos. El mortero adherido aporta una rugosidad de la que carecen los áridos naturales, provocando mayor fricción cuando se aplica tracción. Las muestras con mayor resistencia a flexión son, según estos resultados las que contienen un 5% de adición de cemento.

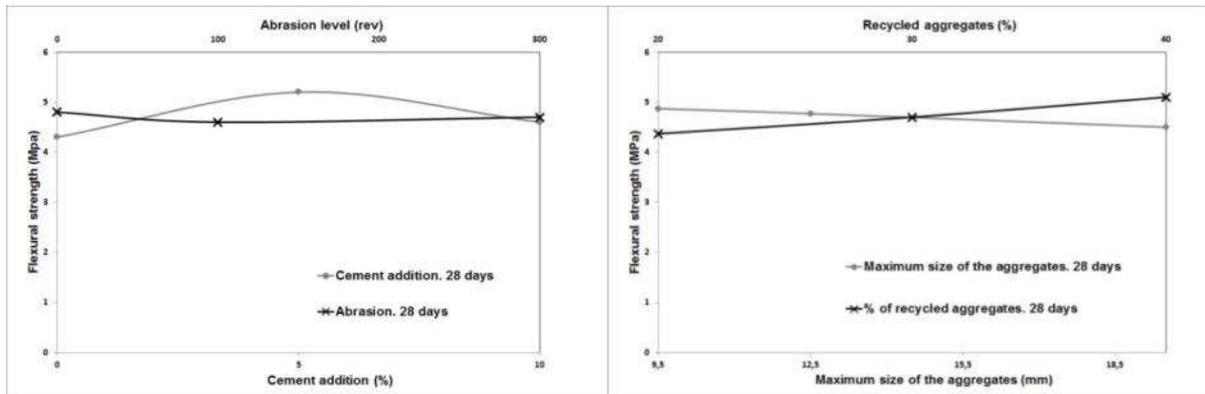


Fig. 17 A) “Variación de la resistencia a tracción con la abrasión y la adición de cemento tras 28 días”. B) “Variación de la resistencia a tracción con la cantidad y el tamaño de los áridos reciclados”.

Variable	GL	Suma Cuad	Varianza (V)	Participación (%)
% Aridos	2	0.735	0.367	30.0
Abrasión	2	0.068	0.034	2.8
Cemento	2	1.428	0.714	58.3
Tamaño max	2	0.215	0.107	8.8

Tabla 7 “Resumen de los resultados del ANOVA para la resistencia a tracción”.

La normativa ACI 318-11 [30] propone la ec. 1 para calcular la resistencia a tracción.

$$f_r = 0,62 \sqrt{f'_c} \tag{1}$$

Donde  $f_r$  es la resistencia a tracción (MPa) y  $f'_c$  es la resistencia cilíndrica a compresión (MPa).

Los resultados experimentales y los obtenidos utilizando la ec. 1 para las muestras analizadas se presentan en la Fig. 18. Todas las muestras muestran valores mayores que los especificados por la ACI 318 0. Como los valores calculados son conservadores se puede afirmar que los hormigones con áridos reciclados exceden las resistencias esperadas en todos los casos.

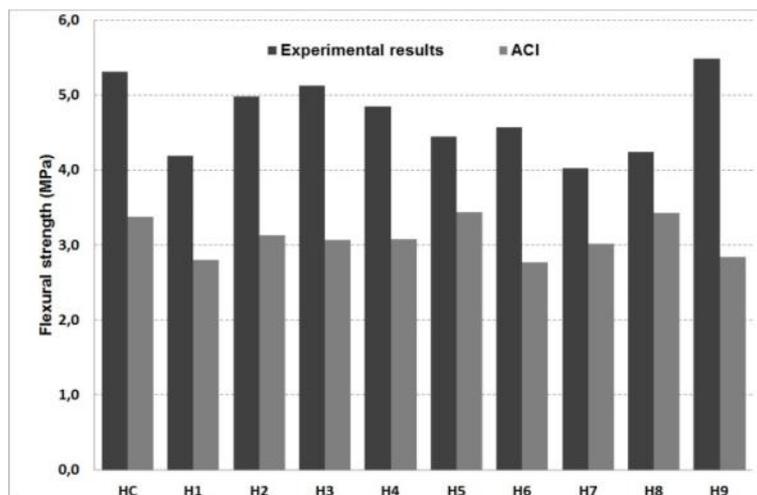


Fig. 18 “Resistencia a tracción obtenida de forma experimental y utilizando la ec (1)”.

### 5.- Conclusiones

Uno de los principales problemas del uso de áridos reciclados en hormigones es el mortero adherido a la superficie del mismo. La doble interfaz y el aumento en los

valores de absorción de agua del material debilitan la mezcla final. Los áridos reciclados presentaban valores de absorción 3.6 veces superiores a la de los áridos naturales. Se ha ensayado un nuevo procedimiento para reducir este mortero de forma mecánica, mediante desgaste. Someter a los áridos a una abrasión a 100rev reduce el valor de la absorción a 3.1 veces el de los naturales y a 2.4 veces cuando las revoluciones se triplican (300rev). El proceso es efectivo, reduce la cantidad de mortero adherido y por lo tanto, los valores de absorción de agua.

En cuanto a la influencia ejercida por los 4 parámetros analizados, el análisis muestra que el efecto de la cantidad de áridos reciclados y el nivel de abrasión dominan en la resistencia a compresión para muestras curadas durante 28 días.

Se puede concluir que el uso de un 30% de áridos reciclados en el hormigón no reduce los valores de resistencia a compresión de un hormigón tradicional.

Reducir la cantidad de mortero adherido, medido directamente mediante el nivel de abrasión mecánica aplicado, aumenta la resistencia a compresión en hasta un 14% tras 28 días de curado y un 6% tras 90. En cualquier caso, para establecer conclusiones más concretas sobre el comportamiento de este parámetro es necesario analizar niveles de abrasión superiores aplicando más revoluciones al material.

La resistencia a compresión de hormigones con áridos reciclados puede optimizarse controlando el porcentaje de áridos sustituidos y la cantidad de mortero adherido a su superficie.

## AGRADECIMIENTOS

Este estudio forma parte del proyecto FONDEF CA 13I10261 "Desarrollo y diseño de un Eco-Bloque de hormigón en base a materiales reciclados, con menor impacto ambiental, menor costo y mayor eficiencia térmica", financiado por CONICYT.

## REFERENCIAS

- [1] Poon, C. S., Shui, Z. H., & Lam, L. (2004). Effect of microstructure of ITZ on compressive strength of concrete prepared with recycled aggregates. *Construction and Building Materials*, 18, 461-468.
- [2] Tam, V. W. Y., Gao, X. F., & Tam, C. M. (2005). Microstructural analysis of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing approach. *Cement and Concrete Research*, 35, 1195-1203.
- [3] Tam, V. W. Y., Gao, X. F., Tam, C. M., & Ng, K. M. (2008). Physio-chemical reactions in recycled aggregate concrete. *Journal of Hazardous Materials*, 163, 823-828.
- [4] Ismail, S., & Ramli, M. (2013). Engineering properties of treated recycled concrete aggregate (RCA) for structural applications. *Construction and Building Materials*, 44, 464-476.
- [5] Lee, G. C., & Choi, H. B. (2013). Study on interfacial transition zone properties of recycled aggregate by micro-hardness test. *Construction and Building Materials*, 40, 455-460.7
- [6] Seo, D. S., & Choi, H. B. (2014). Effects of the old cement mortar attached to the recycled aggregate surface on the bond characteristics between aggregate and cement mortar. *Construction and Building Materials*, 59, 72-77.
- [7] Gonzalez, A., & Etxeberria M. (2014). Experimental analysis of properties of high performance recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 52, 227-235.
- [8] Xiao, J., Li, J., & Zhang, Ch. (2005). Mechanical properties of recycled aggregate concrete under uniaxial loading. *Cement and Concrete Research*, 35(6), 1187-1194.
- [9] Rahal, K. (2007). Mechanical properties of concrete with recycled coarse aggregate. *Building and Environment*, 42(1), 407-415.

- [10] Tam, V. W. Y., Wang, K., & Tam, C. M. (2008). Assessing relationships among properties of demolished concrete, recycled aggregate and recycled aggregate concrete using regression analysis. *Journal of Hazardous Materials*, 152(2), 703-714.
- [11] Padmini, A. K., Ramamurthy, K., & Mathews, M. S. (2009). Influence of parent concrete on the properties of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 23(2), 829-836.
- [12] Li X. (2009). Recycling and reuse of waste concrete in China: Part II. Structural behaviour of recycled aggregate concrete and engineering applications. *Resources, Conservation and Recycling*, 53(3), 107-112.
- [13] Bairagi V.K., Ravande K., & Pareek, V.K. (1993). Behavior of concrete with different proportions of natural and recycled aggregates. *Resources Conservations and Recycling*, 9, 109-126.
- [14] Eguchi, K., Teranishi, K., Nakagome, A., Kishimoto, H., Shinozaki, K., & Narikawa, M. (2007). Application of Recycled Coarse Aggregate by Mixture to Concrete Construction. *Construction and Building Materials*, 21, 1542-1551.
- [15] Kwan, W. H., Ramli, M., Kam, K.J., & Sulieman, M. Z. (2012). Influence of the amount of recycled coarse aggregate in concrete design and durability properties. *Construction and Building Materials*, 26(1), 565–573.
- [16] Mas, B., Cladera, A., del Olmo, T., & Pitarch, F. (2012). Influence of the amount of mixed recycled aggregates on the properties of concrete for non-structural use. *Construction and Building Materials*, 27(1), 612–622.
- [17] Tabsh, S. W., & Abdelfatah, A. S. (2009). Influence of recycled concrete aggregates on strength properties of concrete. *Construction and Building Materials*, 25, 1165-1167.
- [18] Etxeberria, M., Mari, A., & Vásquez, E. (2007) Recycled aggregate concrete as structural material. *Materials and Structures*, 40, 529-541.
- [19] Li, J., Xiao, J., & Huang, J. (2006). Influence of recycled coarse aggregate replacement percentage on compressive strength of concrete. *Chinese J Build Matter*, 9 (3), 297-301.
- [20] Instrucción Española del Hormigón Estructural EHE-08, 2008
- [21] G., Taguchi (1987). The System of Experimental Design: Engineering Methods to Optimize Quality and Minimize Costs (1st edition). UNIPUB/Kraus International Publications, White Plains, N.Y.
- [22] J., Faurly (1958). Le Béton. Editions Dunod, Paris, Fr.
- [23] Agrela, F., Sánchez de Juan, M., Ayuso, J., Geraldés, V.L., & Jiménez J.R. (2011). Limiting properties in the characterization of mixed recycled aggregates for use in the manufacture of concrete. *Construction and Building Materials*, 25(10), 3950-3955.
- [24] Letelier V., Osses R., Valdés G., & Moriconi G. (2014). Utilización de metodologías para mejorar las propiedades mecánicas del hormigón estructural fabricado con áridos reciclados. *Revista Ingeniería y Ciencia*, 10(19), 179-195.
- [25] Yu, R., & Shui, Z. (2013). Influence of agglomeration of a recycled cement additive on the hydration and microstructure development of cement based materials. *Construction and Building Materials*, 49, 841–851.
- [26] Evangelista L. & de Brito, J. (2007). Mechanical behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates. *Cement and Concrete Composites*, 29, 397–401.
- [27] Matias, D., de Brito, J., Rosa, A., & Pedro, D. (2013). Mechanical properties of concrete produced with recycled coarse aggregates – Influence of the use of superplasticizers. *Construction and Building Materials*, 44, 101-109.
- [28] Manzi, S., Mazzotti, C., & Bigozzi, M. C. (2013). Short and long-term behaviour of structural concrete with recycled concrete aggregate. *Cement and Concrete Composites*, 37, 312–318.
- [29] Gonzalez-Fonteboa, B., & Martinez-Abella, F. (2008). Concrete with aggregates from demolition waste and silica fume. Materials and mechanical properties. *Building and Environment*, 43, 429–437.
- [30] ACI 318-11, (2011). Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary, ACI Committee 318, 503.