

Utilización de áridos reciclados para la evaluación de las propiedades de resistencia mecánica, permeabilidad y contenido de aire en hormigones de grado estructural H-30

Use of recycled aggregates for the evaluation of the properties of mechanical strength, permeability and air content in concrete structural grade H-30

Leal M. ¹, Osses R. ¹, Valdés G. ¹, Letelier V. ¹

¹ Universidad de La Frontera, Chile

Miguel.Leal.Arriagada@gmail.com, phone: +56987249742

INFORMACIÓN DEL ARTICULO

Historial del
artículo:

Recibido
03-08-2012
Aceptado
30-10-2012
Publicado
20-12-2012

Palabras Claves:
Árido reciclado
Hormigón reciclado
Absorción
Porcentaje de
sustitución

RESUMEN

La ventaja más destacada al utilizar áridos reciclados es que soluciona la problemática originada por la eliminación de subproductos de desecho y que, mediante el aprovechamiento de éstos se obtiene una nueva materia prima, con lo que se reduce la cantidad de recursos naturales primarios a extraer.

El material obtenido a través de procesos de chancado provenientes de hormigones en desuso son aptos para la fabricación de hormigones de alto desempeño, si bien los áridos reciclados presentan propiedades ligeramente menos eficaces frente al árido natural ya que pese a su proceso de reciclaje, siempre se mantiene adherido a su superficie restos de mortero viejo, que al ser más poroso y absorbente provoca una variación en las propiedades del hormigón con árido reciclado, es necesario identificar y medir estas deficiencias tomando algunas consideraciones para lograr hormigones reciclados con características similares a un hormigón convencional.

El estudio de las propiedades del hormigón reciclado como resistencia mecánica, contenido de aire y permeabilidad fueron elementales para establecer las variaciones con respecto al hormigón convencional.

En consecuencia, al conocer las propiedades de los áridos reciclados, es posible elaborar un hormigón reciclado de uso estructural, información relevante a la hora de acreditar el uso regular del árido reciclado en hormigones en la construcción, contribuyendo así a un desarrollo sustentable en la utilización de áridos en nuestro país.



ARTICLE INFO

Article history:

Received
03-08-2012

Accepted
30-10-2012

Available
20-12-2012

Keywords:

recycled aggregate
recycled concrete
absorption
Percentage of
substitution

Abstract

The greatest advantage to using recycled aggregate is to solve the problems caused by the elimination of waste products and by taking advantage of them you get a new raw material, thus reducing the amount of primary natural resources to be extracted.

The material obtained by crushing processes in concrete from misuses are suitable for the manufacture of high performance concretes, while recycled aggregates have properties slightly less effective against natural aggregate and that despite its recycling process, always remains attached to its surface remains of old mortar, which being more porous and absorbent causes a variation in the properties of recycled aggregate concrete, it is necessary to identify and measure these deficiencies by taking some considerations to make recycled concrete with characteristics similar to conventional concrete .

The study of the properties of recycled concrete as mechanical strength, permeability and air content were elementary to establish changes with respect to conventional concrete.

Consequently, knowing the properties of recycled aggregates, it is possible to produce a recycled concrete for structural use, relevant information when it comes to credit the regular use of recycled aggregate concrete in construction, thus contributing to sustainable development in the use aggregates in our country.

1. Introducción

En la comunidad Europea la utilización de áridos reciclados se lleva a cabo en forma distinta, ya que hay países en los cuales se recicla un porcentaje importante de árido, caso de los países bajos y en otras naciones en donde el porcentaje de reciclado es mínimo. A pesar de que nuestro país no presenta la escasez de áridos, si podría avanzar en el incremento de las penalizaciones por vertido de escombros e incluso su prohibición regulando la utilización de éstos. En España el porcentaje de reciclado se aproxima al 15% para llegar a un nivel de reciclaje de un 40% a partir del año 2011.

Las recomendaciones plasmadas en el anexo N°15 de la EHE-08 permiten la utilización de árido reciclado procedente de hormigón convencional, excluyendo el uso de árido reciclado en hormigón pretensado y se contempla la sustitución del árido grueso en cantidades no superiores al 20% sin necesidad de estudios ni ensayos complementarios [1].

Diversos estudios han podido establecer que utilizando solo un porcentaje de fracción gruesa de áridos reciclados se puede disminuir considerablemente las diferencias en las propiedades mecánicas entre un hormigón con árido natural y uno con árido reciclado. En general, se puede decir, que los áridos reciclados de hormigón de tamaño mayores 4 milímetros son potencialmente aptos para la fabricación de hormigón. Si la sustitución del árido grueso convencional es menor o igual al 20%, las propiedades mecánicas permanecen prácticamente constantes [2].

Una de las propiedades que resulta más afectada es la absorción y permeabilidad, más altas en áridos reciclados por lo que para una misma consistencia, la demanda de agua del hormigón con árido grueso reciclado es del orden de 5-10 % mayor que para el hormigón convencional [3]. A su vez un 5% de cemento extra puede ser necesario para compensar la reducción de la resistencia, lo que se traduce en que si queremos obtener la misma resistencia que el hormigón de control, se debería aumentar al menos dicho porcentaje de modo de reducir la relación agua-cemento [4].

2. Hormigones reciclados

2.1. Influencia de la calidad en el hormigón de origen

Otro de los parámetros que afectan la resistencia del hormigón con áridos reciclados (en especial si solo se sustituye las fracciones menos gruesas) es la calidad del hormigón de origen [5]. Experimentos han demostrado que las propiedades mecánicas dependen de la propiedades del hormigón de origen y del porcentaje de sustitución en el nuevo hormigón, así la calidad del mortero del hormigón de origen juega un rol importante en la determinación del comportamiento del nuevo hormigón con áridos reciclados [6].

La resistencia de los hormigones reciclados, aumenta con la disminución de la relación agua/cemento. Pero, las relaciones conocidas para los hormigones convencionales no es posible aplicarlas directamente para el caso de hormigones con áridos reciclados, ya que también dependerán de la calidad del árido del hormigón de origen.

Tavakoli et al (1996) presenta los resultados de ensayos realizados con áridos provenientes de dos orígenes distintos, que tenían mayor y menor resistencia que el hormigón de control. Los ensayos se realizaron sustituyendo un 100% del árido grueso. A partir de estos datos pudo concluir que si la resistencia a la compresión del hormigón de origen es mayor que la del hormigón de control, el hormigón hecho con áridos reciclados puede llegar a tener resistencia a compresión mayor que la del hormigón de control. En cambio si el hormigón se hace a partir de un árido de baja calidad, aunque se disminuya la relación de agua/cemento no se podrá obtener una resistencia mayor a esta.

Según algunos estudios si los áridos proceden de un hormigón con resistencia inferior a 30 Mpa es posible obtener, utilizando relaciones agua/cemento adecuadas, un hormigón reciclado con resistencias superiores a 35 Mpa (ACHE, 2006)

2.2. Capacidad de absorción de los áridos reciclados

Normalmente, los áridos reciclados son más absorbentes que el árido natural. La densidad y la absorción de los áridos reciclados son afectados por el mortero adherido y deben ser conocidos antes de ser utilizados en la producción de hormigón con el fin de controlar las propiedades del hormigón fresco y endurecido.

La capacidad de absorción es una de las propiedades más importantes que distingue árido reciclado con respecto al árido natural, algunos investigadores sugieren un límite de 30% de árido reciclado con el fin de mantener los requisitos de la norma de 5% de la capacidad de absorción de áridos gruesos para el hormigón estructural (Instituto de Hormigón Estructural, 1999)

El nuevo método que propone Etxeberria et al 2003, para determinar la absorción de los áridos reciclados se enfoca en tres puntos importantes a considerar, el primero hace referencia al Secado a 105 ± 5 °C para obtener la masa seca del árido, este secado en horno puede eliminar el agua que químicamente se incorporó en la estructura cristalina de los compuestos en el mortero adjunto al agregado. El agua presente en algunos de estos compuestos puede ser liberado al llegar a más de 100 °C de temperatura. Por lo tanto, eliminar el agua cristalizada dará un nivel engañoso de absorción de agua de los áridos.

El segundo punto es el tiempo de remojo antes de llegar a la saturación completa del árido reciclado este varía según las condiciones de la superficie de la pasta de cemento en el hormigón de origen dicha saturación puede llegar a completarse mucho después de 24 horas.

Y por último según la norma se requiere de un secado superficial de los agregados con un paño o una toalla. Sin embargo, el remojo de los áridos en el agua puede desprender algunas partículas de la superficie total del árido reciclado esta operación puede reducir significativamente la masa secada al horno del árido y la restricción de la exactitud de los resultados de las pruebas [2].

2.3. Granulometría y desprendimiento de partículas luego del tamizado

La granulometría del árido reciclado depende principalmente de sistema de trituración que se haya empleado en su proceso de producción. Las trituradoras de impacto, por lo general, son las que permiten alcanzar reducidos tamaños en los áridos produciendo como consecuencia mayor cantidad de finos. A estas trituradoras las siguen las de conos con una producción de finos inferior y las machacadoras de mandíbula [1].

La cantidad de árido grueso generado oscila entre el 70% y el 90% de la producción. Es evidente que el tamaño obtenido en la trituración depende fundamentalmente del tamaño que tenían en el hormigón de origen. Los áridos reciclados presentan formas angulosas debido al proceso de trituración y un aspecto rugoso como consecuencia del mortero adherido a ellos. A raíz de la disgregación que sufre el árido grueso reciclado durante su transporte y almacenamiento, una vez tamizado se siguen obteniendo porcentajes muy reducidos de arena debido a su mayor fragilidad. Dichos valores oscilan entre el 0,5% y el 2%. Esta fracción fina se caracteriza por presentar un elevado contenido de mortero influyendo negativamente en las propiedades del hormigón.

El porcentaje de finos generado, al desprenderse pequeñas partículas de mortero durante la manipulación del árido grueso reciclado, varía entre el 0,27% y el 1,14%. La norma española establece el límite, en relación a la cantidad de finos admisible, en el 1 % del árido grueso observándose que dichos valores quedan por debajo del mismo en la mayoría de los casos. El problema que plantean los finos, al estar presentes en exceso en la superficie del árido, es que la adherencia entre el árido y la pasta de mortero decrece. Por otra parte hace que la cantidad de agua de amasado aumente [1].

La norma inglesa establece el límite de finos en el 5 % cuando el árido reciclado proviene exclusivamente de hormigón, reduciendo dicho valor al 3% si el árido reciclado proviene de material cerámico o mezcla de ambos. La norma alemana establece la limitación de la cantidad de finos en el 4% [1].

2.4 Forma y textura superficial

Por lo general el coeficiente volumétrico medio del árido grueso reciclado supera el valor de 0,20, correspondiente al menor valor establecido por la EHE.

Las partículas de árido reciclado obtenidas suelen presentar una textura más rugosa y porosa que la de los áridos naturales debido a la presencia de mortero adherido a la superficie del árido de origen. Estas circunstancias hacen que los hormigones que se fabriquen con ellos presenten problemas de trabajabilidad.

El coeficiente volumétrico medio de las partículas se ve directamente afectado por el sistema de trituración empleado en la obtención del árido reciclado. Las machacadoras de mandíbula proporcionan áridos reciclados con un coeficiente volumétrico medio más adecuado que las trituradoras de impactos o de conos.

2.5. Propiedades del hormigón reciclado endurecido

2.5.1. Densidad

La menor densidad del árido reciclado hace que la densidad del hormigón reciclado endurecido sea inferior a la del hormigón convencional. Estudios realizados en España precisan que el descenso de la densidad es prácticamente inapreciable cuando la sustitución del árido reciclado grueso es del 20%. Cuando la sustitución es del 50% la densidad experimenta una reducción media del 2,0%. Dicha reducción llega a un valor medio del 3,5% cuando el porcentaje sustituido del árido grueso es del 100%.

2.5.2. Resistencia a compresión

En general, la resistencia a compresión en los hormigones fabricados con áridos reciclados disminuye con respecto a los hormigones convencionales, si se mantiene la misma relación agua-cemento, siendo dicha disminución más significativa cuando mayor sea el porcentaje de árido grueso sustituido. Las causas más influyentes en este aspecto son:

La cantidad de mortero adherido a la matriz de rocosa que hace que el árido reciclado tenga una menor resistencia mecánica que el árido natural.

El aumento de zonas débiles en la masa del hormigón endurecido al utilizar áridos reciclados ya que, a la superficie de contacto entre el árido natural y el mortero adherido que se suma la superficie de contacto, más débil aún, existente entre los áridos reciclados y el mortero nuevo.

2.5.2. Hormigones con sustitución de sólo el árido grueso

Según los estudios realizados el porcentaje de árido grueso reciclado tiene una alta influencia sobre la curva tensión-deformación del hormigón con árido reciclado [8]. Sin embargo la forma de la curva para todos los hormigones con áridos reciclados es similar a la del hormigón con áridos naturales, independientemente del porcentaje reemplazado [7]. Es decir que aunque la forma se mantiene, la posición y el valor de los datos característicos de una curva se modifican. Una de estas modificaciones corresponde a la resistencia a la compresión, la cual disminuye al aumentar el porcentaje de árido reciclado dentro de la mezcla. Una de las mayores razones para esta disminución es la micro estructura de la capa de mortero que esta adherida a los áridos reciclados.

Rahal (2007) midió una disminución promedio de la resistencia a compresión de 11,6% para hormigones con áridos reciclados con una sustitución del 100% del árido grueso, con respecto al hormigón de control [7]. Según la monografía de la EHE sobre hormigones con áridos reciclados (2006) al considerar una 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 en un 2-15% y cuando la sustitución se limita al 20-30%, la resistencia suele ser inferior al 5 %.

2.5.3. Resistencia a tracción

Tal como en el caso de los hormigones convencionales, la resistencia a tracción dependerá de la resistencia a compresión del hormigón, si bien los coeficientes de correlación pueden variar, sigue existiendo una relación entre ambos parámetros. Por lo tanto, si el uso de áridos reciclados produce variaciones en la resistencia a compresión del hormigón, podremos deducir que las resistencias a tracción también varían. la resistencia en tracción varía entre un 6% y 10% para porcentajes de reemplazo de áridos reciclados entre 25% a 50% respectivamente. En el caso de reemplazos del 100% de árido reciclado la variación aumenta a un 40% con respecto al hormigón de control [9].

De acuerdo a los resultados presentados en la monografía de la EHE, cuando la sustitución afecta al 100% del árido grueso, las pérdidas de resistencia a tracción oscilan en rangos del 6-20%, en cambio cuando la sustitución es menor al 50% las pérdidas son despreciables [8].

Estas diferencias entre autores, se deben a los mismos parámetros que afectan a la resistencia a compresión, es decir calidad del hormigón de origen y métodos de trituración, entre otros.

2.5.4. Resistencia a flexotracción

Las variaciones de la resistencia a flexotracción en los hormigones reciclados presentan unas oscilaciones, en función del porcentaje

del árido sustituido, similar a las experimentadas en las resistencias a tracción. Las reducciones son pequeñas cuando la sustitución no es superior al 50% del árido grueso. Al llegar a sustituir el 100% del árido grueso total la reducción de la resistencia es más notable.

También existen estudios que determinan descensos notables cuando se utilizan áridos reciclados saturados en lugar de secos.

2.5.5. Resistencia al corte

El análisis realizado por Etxeberria et al, (2007) a vigas, utilizando áridos reciclados, determino que los resultados sugieren que el uso de hormigón reciclado debe ser acompañado por una modificación de la dosis de cemento, es decir, aumentando cantidad de cemento lo que se traduce en la disminución de la relación agua/cemento con el fin de evitar una reducción en la resistencia al corte [4].

La disminución de la resistencia al corte alcanza el 26 % cuando se sustituye únicamente el árido grueso. Muchas pérdidas alcanzan el 41 % cuando la sustitución también se realiza en el árido fino. Cuando las sustituciones son por debajo del 25% del árido grueso apenas afectan a la resistencia a corte de elementos estructurales fabricados con áridos reciclados. También existe un buen comportamiento al corte del hormigón reciclado con sustituciones del 50% del árido grueso [1].

2.5.6. Porosidad, absorción y permeabilidad

El deterioro del hormigón debido a fenómenos o causas distintas de las mecánicas se debe, principalmente, a la presencia de agua en su interior con sustancias perjudiciales para el hormigón disueltas en ellas. El transporte de agua hacia el interior del hormigón se realiza a través de los poros y fisuras que presenta y depende del tipo del tamaño y de su distribución.

Al utilizarse árido reciclado en la elaboración de hormigón, la porosidad la absorción y la permeabilidad aumentan, tal como se pone de manifiesto en diferentes estudios. El aumento se hace más notable al incrementarse el porcentaje de áridos reciclados utilizados. Los valores de los incrementos oscilan entre un 15% y un 70%. Cuando también se sustituye la fracción fina del árido los valores de la porosidad y la permeabilidad al aire llegan a duplicarse. Si el porcentaje de sustitución del árido grueso es inferior al 30% apenas se aprecian las diferencias en los valores de la porosidad y la absorción [1].

La permeabilidad del hormigón reciclado, para distintos niveles de resistencia, llega a alcanzar valores que oscilan entre dos o siete veces la permeabilidad del hormigón de control cuando se sustituye el 100% del árido grueso. [10]

2.6. Variables a considerar

Las variables o factores que intervienen en el diseño de este estudio son las siguientes; características del árido, tipo de granulometría, contenido de partículas menores de 4 mm, porcentaje de sustitución del árido grueso, consistencia y resistencia característica.

2.6.1. Características del árido

Las características del árido son muy importantes sobre las propiedades del hormigón reciclado. Así, cuanto más reducida sea la cantidad de mortero adherido que contenga al árido reciclado mas se semejara a un árido natural. En el estudio se tiene un material procedente de distintos hormigones por lo que en todo momento se buscó la homogeneidad del material. En la figura 1 se observa el material utilizado que comprende; áridos rodados con mortero adherido, áridos chancados con mortero adherido, una partícula que es sólo mortero y una partícula que es mortero que incorpora un árido de menor tamaño.



Figura 1. Características visuales del árido reciclado

2.6.2. Granulometría

Su potencial influencia radica en la consistencia del hormigón, la cantidad de aire incluido y en la resistencia del hormigón. La granulometría escogida para la dosificación no se obtuvo de una teoría ideal granulométrica, si no que, se repitió para todas las amasadas según la granulometría que poseían los áridos naturales. Se puede aseverar, eso sí, que la granulometría escogida corresponde a una granulometría continua gruesa de la parábola de Bolomey.

2.6.3. Contenido de partículas menores 4 mm ó desclasificados

Después de separar la fracción gruesa, el árido reciclado sigue generando pequeños porcentajes de arena durante su transporte y manipulación, estos porcentajes pueden hacer que aumente la absorción de agua al concentrarse mayor porcentaje de pasta en estas partículas más pequeñas. En la norma española se determina como 5% el porcentaje máximo que pasen por el tamiz 4 mm para el árido grueso reciclado. En la figura 2 se presenta el material desclasificado previo al proceso de semisecado.



Figura 2. Material menor al tamiz 4 mm

2.6.4. Porcentaje de sustitución

La mayoría de los estudios establecen un 20% de árido grueso reciclado como el límite de sustitución en el hormigón sin que sus propiedades se vean afectadas. La norma española fija este porcentaje para el empleo de hormigón estructural sin que sea necesaria la realización de estudios específicos adicionales o complementarios. Para este trabajo se sustituyó un 23% del peso de la fracción gruesa correspondiente a la granulometría de los áridos naturales.

2.6.5. Consistencia

El aumento de consistencia, que tiene lugar al utilizar el árido reciclado, se puede compensar añadiendo cierto porcentaje de agua durante el amasado, saturando los áridos o utilizando un aditivo superplastificante. En este trabajo se ha elegido la segunda opción, luego de la saturación se optó por dejar el árido reciclado en estado saturado superficialmente seco antes de ingresar a la mezcla.

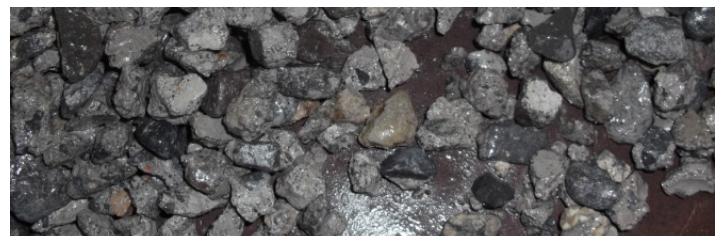


Figura 3. Saturación de árido reciclado

2.6.6. Resistencia característica

La norma española limita la resistencia a compresión de hormigones reciclados a 40 MPa, nuestro estudio eligió un nivel de resistencia por debajo de esta medida y ha buscado disminuir la relación agua-cemento de manera de compensar las disminuciones de resistencia producto de utilizar áridos reciclados.



Figura 4. Probeta ensayada a compresión

2.7. Alcance del estudio

Este trabajo buscó determinar la relación agua-cemento requerida para obtener un hormigón H 30 reemplazando un 23% del peso de la fracción gruesa de los áridos naturales por áridos gruesos reciclados de tamaño entre 6,3 y 12,5 mm.

Para esto fue necesario realizar las siguientes tareas:

Caracterización de los áridos reciclados; este objetivo buscó conocer las propiedades de este tipo de áridos, el análisis de sus características cobró gran importancia en la etapa de dosificación de hormigones reciclados ya que la menor densidad, alta fragmentación y mayor absorción de estos modifica enormemente sus propiedades en relación al hormigón de control.

Se utilizó la normativa referente al tratamiento de "áridos para mortero y hormigón", se trabajó de acuerdo a la normativa actual salvo en el caso de la obtención de la absorción de los áridos reciclados ya que de el procedimiento actual no se obtiene resultados precisos para estos áridos.

El siguiente paso fue determinar la relación agua-cemento óptima para un hormigón reciclado según su permeabilidad y determinación de aire incorporado, para lo cual se elaboró un hormigón de control donde todas sus propiedades representaron una referencia con respecto a los hormigones reciclados. Los hormigones con adiciones de áridos reciclados tuvieron la misma granulometría que el hormigón de control y se diferenciaron de este por su sustitución de un 23 % de árido grueso por árido reciclado y la adición de cemento en cantidades acumulativas de 2,5% con respecto a la dosificación base.

La máxima adición de cemento que se utilizó fue de 10% y el agua se mantuvo constante, fue necesario realizar para las amasadas de hormigón reciclado una corrección de humedad ya que, para evitar absorciones excesivas de agua de los áridos reciclados en la mezcla se saturaron por un periodo de dos días.

Y por último se determinó el comportamiento mecánico del hormigón reciclado a través de ensayos a compresión a los 7 y 28 días y a flexotracción a los 28 días, esta etapa siguió el mismo patrón anterior de adiciones de cemento y porcentaje de sustitución.

2.7.1. Programa de ensayos

En la siguiente tabla 1 se resume el alcance del trabajo realizado según el tipo de amasada, en donde las etapas representan un volumen determinado de hormigón a preparar para los ensayos citados a continuación.

	Amasadas					
	Etapa A		Etapa B		Etapa C	
	Adición de cemento	Compresión 7 y 28 días	Flexotracción 28 días	Permeabilidad 28 días	Compresión 28 días	Determinación del contenido de aire
H.C.		6	3	3	3	2
H.R	0,0%	6	3	3	3	2
H.R	2,5%	6	3	3	3	2
H.R	5,0%	6	3	3	3	2
H.R	7,5%	6	3	3	3	2
H.R	10,0%	6	3	3	3	2

Tabla 1 Ensayos según el tipo de amasada

3. Análisis y discusión de resultados

Agua de absorción de los áridos reciclado y contenido de aire en el hormigón

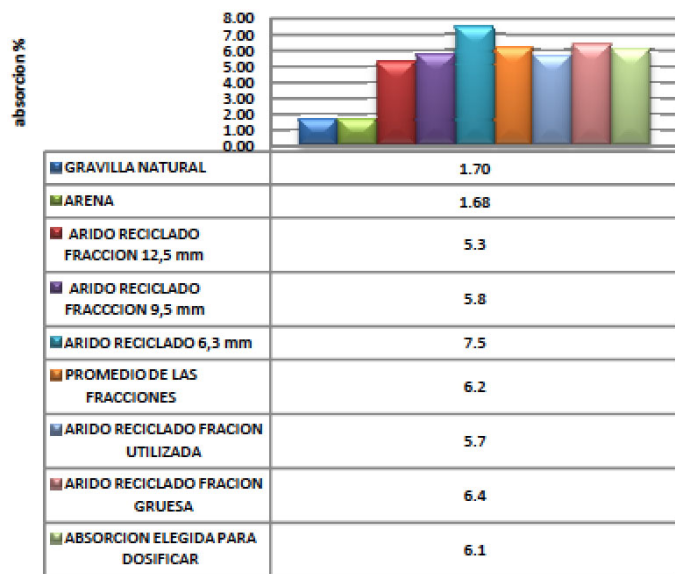


Figura 5. Absorción de los áridos naturales y reciclados

El comportamiento que se observa en las partículas menores como lo son las de 6 milímetros de diámetro, es que son más absorbentes debido al alto contenido de mortero. Si las partículas menores son más absorbente quizás es necesario realizar mezclas de hormigón reciclado con partículas mayores a 9,5 cm a demás estas últimas son levemente menos des-gastables.

El aumento en los valores de absorción de la gravilla reciclada con respecto al de los áridos convencionales, es de un 30% por lo que se demuestra la importancia de este dato en el diseño de mezclas de hormigón reciclado.

Contenido de aire

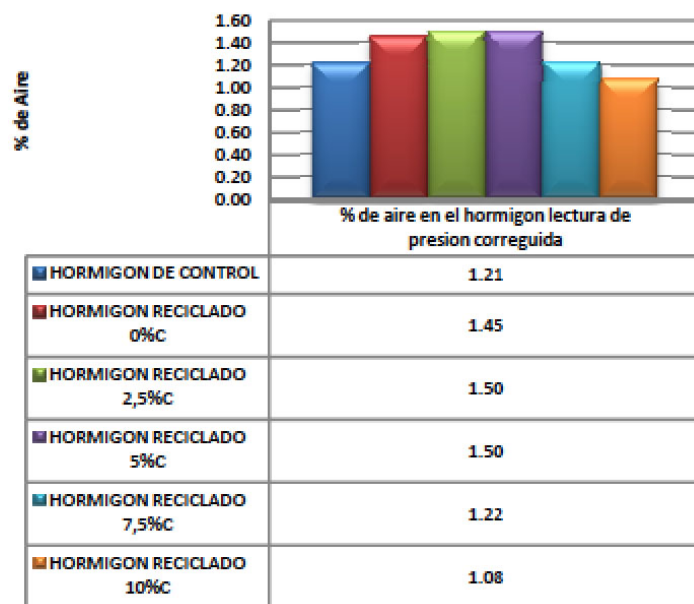


Figura 6. Promedio del contenido de aire en el hormigón fresco

Es posible que el contenido de aire en el hormigón ocupe el espacio destinado a la pasta de cemento y los áridos, en la figura 6 se aprecia una tendencia clara, los hormigones reciclados aumentan su contenido de aire con respecto al hormigón de control en un 0,3% para adiciones de cemento inferiores a 5 % de cemento, cuando se agrega 7,5% de cemento tiende a la baja y a parecerse al hormigón de control. Adiciones con 10% de cemento registran menos aire incorporado que el hormigón de control.

	HR 0%	HR 2,5%	HR 5,0%	HR 7,5%	HR 10%
Diferencias del contenido de aire	-0,24	-0,29	-0,29	-0,01	0,14

Tabla 2. Diferencias en relación al hormigón de control para el contenido de aire

Densidad

En la tabla 2 y 3 se observa cómo se estrechan los valores a medida que se adiciona cemento.

	HR 0%	HR 2,5%	HR 5,0%	HR 7,5%	HR 10%
Diferencias de la densidad (Kg/m ³)	43	42	26	33	25
<i>la densidad del hormigón fresco</i>					

Tabla 3. Diferencias con el hormigón de origen con respecto a la densidad del hormigón fresco

	Densidad (kg/m ³)
Hormigón reciclado 0%C	17
Hormigón reciclado 2,5%C	47
Hormigón reciclado 5,0%C	4
Hormigón reciclado 7,5%C	9
Hormigón reciclado 10%C	3

Tabla 4. Diferencias con el hormigón de origen con respecto a la densidad probeta cubica 15 cm de arista

Resistencias a compresión a los 28 días de endurecido etapa A

El Comportamiento es progresivo de acuerdo a las adiciones de cemento, hay aumento de 1 a 3 Mpa si se agregan 2,5% de cemento. Es posible corroborar que con un 23% de sustitución de áridos reciclados la resistencia a compresión no se ve afectada en las propiedades del hormigón reciclado en comparación con el hormigón de control.

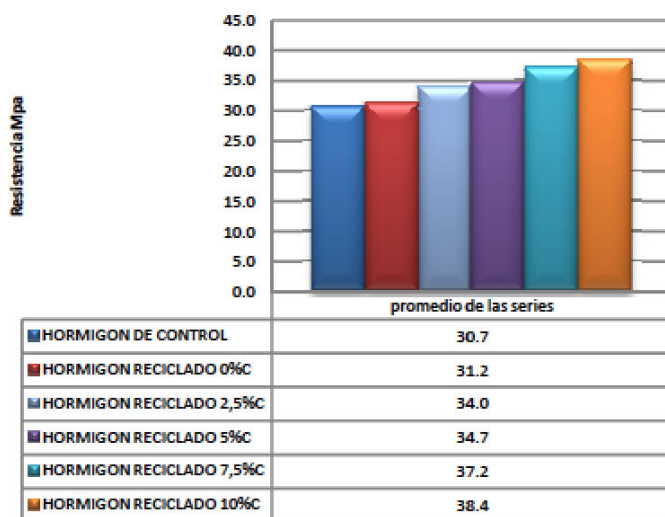


Figura 6. Resistencias a compresión 28 días de endurecido

En la figura 7 se puede apreciar el aumento de resistencia en relación al tiempo, para adiciones entre 0 a 10 % de cemento las resistencias a los 7 días deben estar en los valores de 16 a 20 Mpa y entre 30 a 40 Mpa para resistencias a los 28 días.

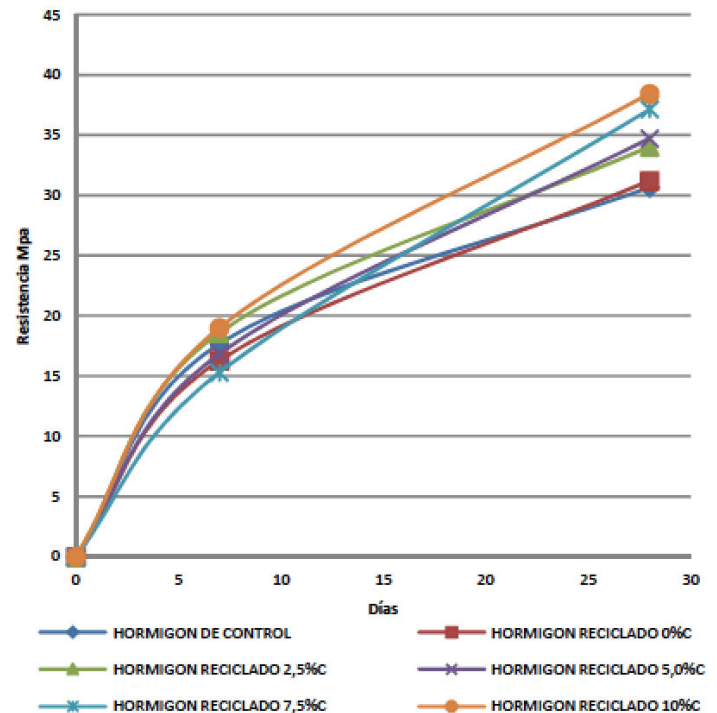


Figura 7. Resistencias a compresión a los 7 y 28 días de endurecido

Es posible que un 10% de cemento sea lo máximo de este componente que se pueda agregar en este caso, para este tipo de hormigones ya que la norma española establece un máximo de 40Mpa de resistencia máxima para hormigones reciclados, ya que luego de estas resistencias el árido trabaja bajo grandes esfuerzos de compresión. En el grafico se observan dos comportamientos el primero; que describe altas resistencias a los 7 días y luego decrece su velocidad con que adquiere resistencia y el segundo comportamiento que describe resistencias dentro de lo normal para luego crecer aceleradamente como es el caso de los hormigones con 2,5 y 7,5 % de adición de cemento. Este comportamiento puede tener explicación en el fraguado interno de los hormigones reciclados ya que la formación de los silicatos de calcio hidratados y el hidróxido de calcio puede llevarse a cabo sólo si se reúnen los siguientes requisitos.

Si hay suficiente espacio para que los productos de hidratación se formen.

Si hay suficiente agua para ser usada durante la hidratación.

Este último punto cobra gran importancia ya que al utilizar áridos reciclados debido a su estructura porosa pueden presentar una absorción después de 24 horas de inmersión entre 5% y hasta más de 25 %, lo que permite una alta incorporación de agua en el hormigón para la realización del curado interno.

De las edades de 7 a 28 días todos los hormigones aumentaron entre 13 a 15 Mpa.

Resistencias a compresión a los 28 días de endurecido etapa C

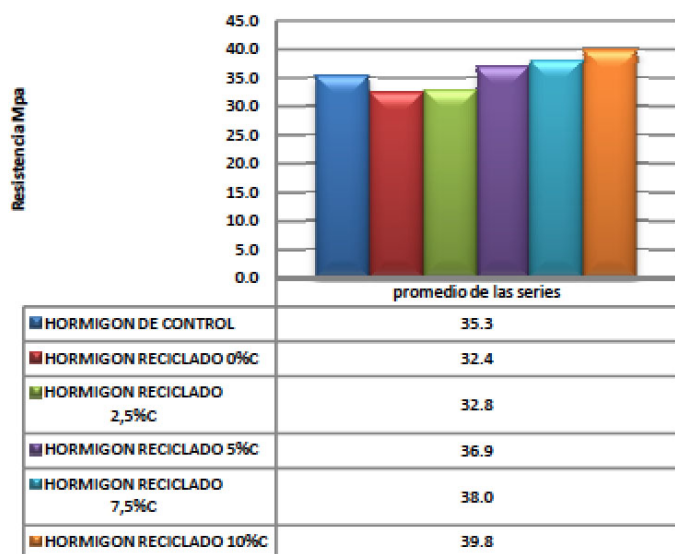


Figura 8. Promedio de las Resistencias a compresión de las series de hormigones de contenido de aire en el hormigón

Sin duda el hormigón que más se asemeja al hormigón de control es el hormigón reciclado con 5% de cemento agregado a la dosificación patrón, por lo que se puede asumir que es la relación de agua-cemento mas optima. Al igual que las amasadas de la etapa A aumentan su resistencia cuando se agrega cemento y si bien ninguna es inferior a la resistencia de diseño (30Mpa) los hormigones reciclados con adiciones de cemento del orden de 2,5% y sin adición de cemento caen por debajo de la resistencia del hormigón de control, entonces es posible que el contenido de aire en estas probetas influyan en la resistencia final del hormigón reciclado.

Por lo que si se buscara una relación óptima entre resistencia y contenido de aire la adición de cemento más insuperable sería la de 7,5% de cemento.

	HR 0%	HR 2,5%	HR 5,0%	HR 7,5%	HR 10%
Diferencias Mpa cubo 15 cm arista	2,9	2,5	-1,6	-2,7	-4,5

Tabla 5. Diferencias con el hormigón de origen cubos arista 15 cm

	HR 0%	HR 2,5%	HR 5,0%	HR 7,5%	HR 10%
Diferencias Mpa cubo 20 cm de arista	- 0,6	- 3,4	- 4,1	- 6,5	- 7,8

Tabla 6. Diferencias con el hormigón de origen cubos arista 20 cm

	HC	HR 0%	HR 2,5%	HR 5,0%	HR 7,5%	HR 10%
Diferencias entre cubos	4,6	1,2	-1,2	2,2	0,8	1,3

Tabla 7. Diferencias a compresión entre probetas de 15 y 20 cm de arista

Las probetas de 15 cm de arista poseen mayores resistencias a los 28 días en 2 Mpa promedio a las probetas de 20 cm de arista.

Resistencias a flexotracción

El hormigón reciclado con 0% de cemento posee similares características a flexotracción que el hormigón de control.

Las adiciones de cemento aumentan la resistencia a flexotracción en el orden del 0,8 a 1,0 Mpa.

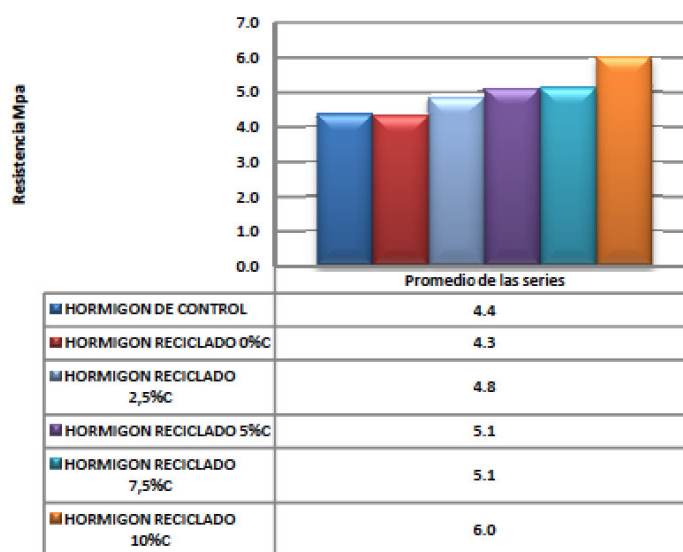


Figura 9. Promedio de las resistencias a flexotracción a los 28 días

	Resistencia	Densidad
Hormigón reciclado 0%C	0,03	40
Hormigón reciclado 2,5%C	0,46	64
Hormigón reciclado 5,0%C	-0,75	34
Hormigón reciclado 7,5%C	-0,76	37
Hormigón reciclado 10%C	-1,67	27

Tabla 8. Diferencia en relación al hormigón de origen para la flexotracción

Permeabilidad

El hormigón de control presenta penetraciones regulares con una incidencia pareja en la pasta de hormigón, en tanto las probetas de hormigones reciclados se caracterizan por penetraciones de agua dispersas, altamente incidentes en el hormigón y como se muestra en las siguientes figuras estas presentan un comportamiento impredecible sin tendencia a la baja como se esperaría con el aumento del porcentaje de cemento. Al parecer el agregar proporciones de cemento no asegura la impermeabilidad en los hormigones reciclados.

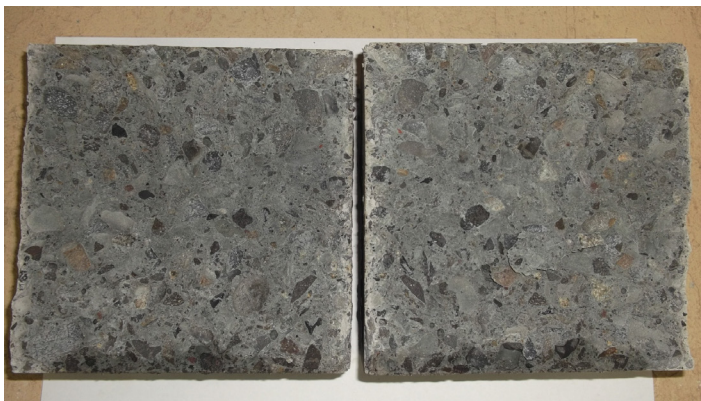


Figura 10. Permeabilidad del hormigón de control

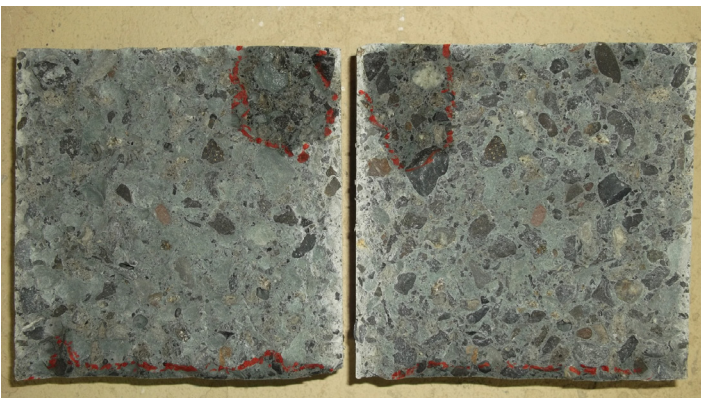


Figura 11. Permeabilidad del hormigón reciclado sin adición de cemento

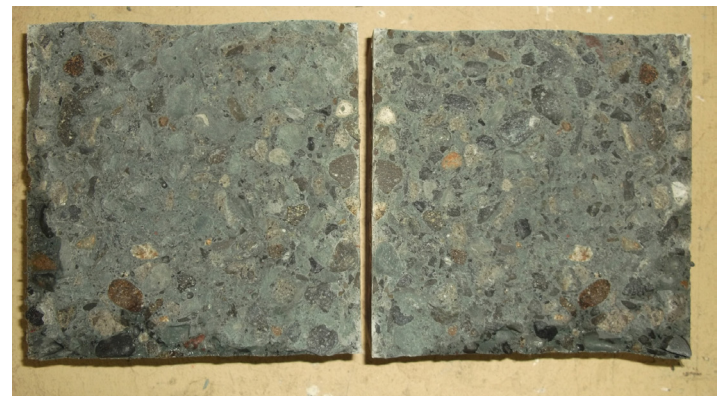


Figura 12. Permeabilidad del hormigón reciclado con adición de un 5% de cemento

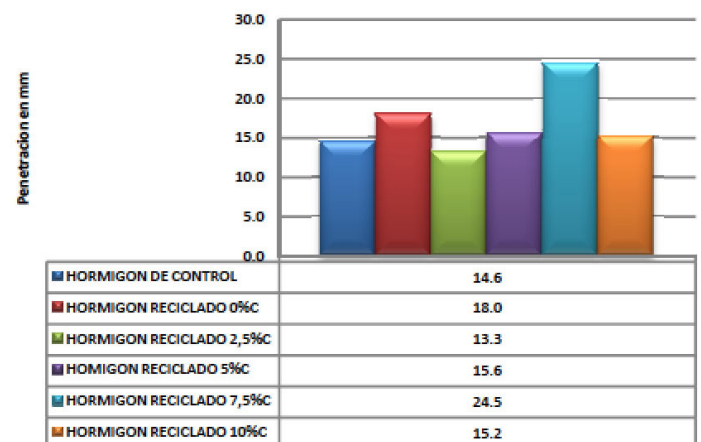


Figura 13. Permeabilidad promedio de las series

3. Conclusiones

Este trabajo establece la calidad de los hormigones elaborados con sustituciones de áridos reciclados, todo esto, en comparación a un hormigón tradicional para uso estructural.

Se analizó el comportamiento de hormigones reciclados con sustitución de un 23% del árido grueso, proveniente de probetas de hormigón de distinta procedencia.

Para lograr parámetros de confianza fue necesario caracterizar el árido reciclado, conocer su forma, comportamiento al desgaste, densidad y absorción, esta última aumenta considerablemente con respecto al árido natural. Para analizar su comportamiento claramente más inferior que un hormigón convencional, se han adicionado porcentajes de cemento para mejorar sus propiedades, de manera de lograr un hormigón con similares o iguales características que el hormigón de control.

Además de estudiar la resistencia de los hormigones reciclados se busco realizar pruebas de permeabilidad y determinación de aire, propiedades que tiene directa relación con su durabilidad. El hormigón de referencia se diseñó para resistir 30Mpa y su banda granulometría se replicó para todas las amasadas de hormigones reciclados.

Sobre el hormigón reciclado fresco.

Las sustituciones de árido reciclado grueso provocan un aumento de la consistencia si estos no son saturados previamente, para el caso de las amasadas de las etapas A y B, no se observó pérdida de trabajabilidad obteniendo asentamientos que oscilaron entre los 2 a 5 cm.

Sin embargo en las amasadas de la etapa C se registraron conos de 1 cm, esto debido al tiempo en que se realizó la toma del asentamiento, correspondiente a una hora desde su vaciado a la bandeja de muestreo, a pesar de que las condiciones de temperatura ambiente y humedad del aire estaban controladas los hormigones reciclados luego de una hora pierden totalmente su trabajabilidad pero como se pudo apreciar en la figura 2.5 superaron la resistencia a la que fueron diseñados.

También hay aumento del contenido de aire en un lapsus de 18 minutos que es lo que se demora en tomar la segunda muestra de contenido de aire en hormigones

Debido a la granulometría gruesa de los hormigones fabricados, a medida que se adicionó cemento, la mezcla fue mucho más pastosa, la densidad del hormigón reciclado fresco es menor en comparación al hormigón de control en el mismo estado y según los datos de la amasada de la etapa C, aún adicionando el 10% de

cemento no logró alcanzar la misma densidad que el hormigón de control, los hormigones reciclados alcanzan densidades iguales o levemente superiores al hormigón de control sólo en estado endurecido. Asumiendo que el reemplazo de las cantidades árido fue en pesos idénticos al hormigón de control, hay una parte de mortero del árido reciclado que se desprende y no queda en la mezcla final.

Sobre el hormigón reciclado endurecido.

Densidad

La pérdida de densidad de hormigones reciclados endurecidos no suele traducirse en pérdidas de resistencia, como los datos lo demuestran densidades mayores a los 2400 Kg/m³ han tenido las más bajas resistencias a compresión en comparación a probetas menos densas. El porcentaje de sustitución es un factor determinante en la pérdida de densidad del hormigón reciclado y según los datos expuestos esta disminución corresponde a un 1% promedio, esta comparación solo es analizable para el hormigón de control y el hormigón reciclado sin adición de cemento.

La densidad es una propiedad que se recupera no en su 100% a medida que se agrega cemento a la mezcla, según lo experimentado agregar 10% de cemento es lo más cercano para obtener valores similares a el hormigón de control.

Mortero adherido

Se desconoce si la pérdida de masa o fracturación de los áridos reciclados, para este estudio es un factor a considerar. El árido reciclado se introdujo a la mezcla una vez agregados todos los componentes y solo estuvieron en la mezcladora una duración menor a 12 minutos para las etapas A y B y 6 minutos para la etapa C. Se hace necesario conocer el comportamiento del árido reciclado con más tiempo dentro de la mezcla.

Porcentaje se sustitución

El porcentaje de sustitución utilizado según distinta información consultada, no debía presentar variaciones en las propiedades de resistencia del hormigón reciclado con respecto al hormigón de control, en gran medida esto fue así, pero cabe mencionar que según los ensayos permeabilidad y determinación de aire son necesarias adiciones de cemento, no para lograr una mejor resistencia sino para optimizar su durabilidad.

Absorción

Según la absorción de agua del árido reciclado elegida para dosificar, ésta aumentó en un 32% el agua de absorción con respecto a un hormigón convencional, siendo una sustitución de un 23% de árido grueso reciclado efectiva. También tiene importancia la cantidad total de fracciones incorporadas en la mezcla, por ejemplo, las dosificaciones de todas las amasadas tienen un 30% de tamaño 12,5 mm, un 30% de tamaño 9,5 mm y un 40% de tamaño 6,3 mm del total de árido reciclado incorporado (23%). Esto es muy importante ya que la partícula de 6,3 mm que está en mayor cantidad es la más absorbente, tiene menor densidad y es más desgastable. Se hace necesario investigar la incidencia de agregar grandes cantidades de partículas menores a 6,3 mm o también investigar otras proporciones de sustitución en hormigones reciclados.

Resistencia

La resistencia se ve afectada por el porcentaje de sustitución del árido reciclado y la mejor calidad del árido reciclado se ve definida por; la menor cantidad de mortero adherido a él y una menor absorción, parámetros que dependen de las características del hormigón de origen.

El impacto que provoca sobre las resistencias el porcentaje de sustitución, absorción de agua y mortero adherido de los áridos reciclados se ve compensada cuando detrás de ello hay una adición de cemento. Según los resultados no se presentan variaciones en la resistencia a compresión y flexotracción cuando la sustitución es de un 23% del árido grueso reciclado.

La adición acumulativa de un 2,5% de cemento provoca aumentos de resistencia a compresión entre 1,6 a 4,5 Mpa con respecto al hormigón de control para probetas de 15 cm de arista. Para cubos con arista 20 cm los incrementos de resistencia con respecto al hormigón de control aumentan de un 1 a 3 Mpa.

Y para la flexotracción el comportamiento también es creciente debido a las adiciones de cemento que aumentan la resistencia a flexotracción entre un 0,8 a 1,0 Mpa.

Contenido de Aire

Algo que está muy relacionado con la permeabilidad es la cantidad de aire en el hormigón las probetas confeccionadas a partir de este ensayo poseen gran cantidad de aire, esto es muy apreciable en las caras de las probetas, por lo que se puede decir que desde que se detiene el mezclado el hormigón reciclado incorpora aire a su estructura.

Sin embargo los resultados de las resistencias a compresión de las probetas con 15 cm de arista arrojaron valores y tendencias iguales a los hormigones con 20 cm de arista e incluso tienen resistencias mayores a estas últimas mencionadas. La adición de cemento más óptima para este caso fueron los hormigones reciclados con 7,5 % de cemento.

Permeabilidad

No hay una tendencia clara que asegure que la adición de cemento impida el avance del agua por presión, es más, queda demostrado que los hormigones reciclados carecen de impermeabilidad al agua estos se comportan de manera distinta al hormigón tradicional. Se cuestiona de gran manera la durabilidad de los hormigones reciclados, del comportamiento ante agentes químicos y ambientales que ingresen al hormigón reciclado y dañen su estructura. Es posible que la utilización de fracciones sobre los 9,5 mm, áridos con dos o más procesos de trituración o áridos reciclados lavados, sin contaminantes se comporten de mejor forma ante esta propiedad.



4. Referencias

- [1] López F., 2008, "Influencia de la variación de los parámetros de dosificación y fabricación de hormigón reciclado estructural", Tesis doctoral para optar al grado de doctor en ingeniería industrial, Universidad de Oviedo, España.
- [2] Etxeberria M et al. Grupo de trabajo "Hormigón Reciclado". Utilización de árido reciclado para la fabricación de hormigón estructural, 2003.
- [3] Ayman Hanoun Robas. "Influencia de la variación de las propiedades del árido reciclado en el hormigón endurecido". 2008.
- [4] Etxeberria M et al. "Influencia de la cantidad de árido grueso reciclado y producción proceso en las propiedades del hormigón áridos reciclados. Cemento y concreto de investigación, 2007.
- [5] Xiao J., Li J., Zhang Ch., "Mechanical properties of recycled aggregate concrete under uniaxial loading", Cement and Concrete Research 35 (2005) 1187- 1194.
- [6] Rahal K., "Mechanical properties of concrete with recycled coarse aggregate", building and environment 42 (2007) 407-415.
- [7] Asociación Científico - Técnica del hormigón estructural, "utilización de árido reciclado para la fabricación de hormigón estructural", monografía (ACHE); M-11, 2006.
- [8] Gonzalez- fonteboa B., Martinez- Abella F., Carro Lopez D., Seara - Paz S. "Stress-strain relationship in axial compression for concrete using recycled saturated coarse aggregate", Construction and Building Materials 25 (2011) 2335-2342.
- [9] Bairagi N.K., Ravande K., Pareek V.K., "Behaviour of concrete with different proportions of natural and recycled aggregates", Resources conservation and recycling 9 (1993) 109-126.
- [10] Sánchez de Juan, M. "Estudio sobre la Utilización de Árido Reciclado en Hormigón Estructural". Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Madrid. 2005.
- [11] Bucarey, Arnoldo, 1996, "Cemento, Fabricación y Clasificación", 22.