

Hormigón reciclado estructural: utilización de árido reciclado procedente de escombros de hormigón

Structural recycled concrete: utilization of recycled aggregate from construction and demolition wastes

Pilar Alaejos Gutiérrez^{1*}, Marta Sánchez de Juan¹

Palabras clave

árido reciclado;
hormigón estructural;
propiedades;
durabilidad;

Resumen

En este documento se recogen las principales conclusiones obtenidas en los estudios realizados por el Laboratorio Central de Estructuras y Materiales del CEDEX sobre la utilización de árido reciclado en hormigón estructural. Los resultados de este estudio han permitido establecer unas recomendaciones sobre los requisitos que debe cumplir el árido reciclado para su utilización en la fabricación de hormigón estructural, así como las correcciones que deben realizarse en la tecnología del hormigón convencional para su aplicación en hormigón reciclado.

Keywords

recycled aggregates;
structural concretes;
properties;
durability;

Abstract

This paper aims to present the main results of CEDEX's research works concerning the use of recycled aggregates for structural concretes. By way of conclusion, recommendations on the requirements of the recycled aggregates have been established, providing information about the influence of these aggregates on the properties of structural concrete.

1. INTRODUCCIÓN

Se entiende por **árido reciclado** el árido obtenido mediante el procesamiento de residuos de construcción y demolición (RCDs). En función de la naturaleza de los residuos de origen, los áridos reciclados se pueden clasificar en áridos reciclados procedentes de hormigón, árido reciclados cerámicos o áridos mixtos cuando proceden de una mezcla de residuos de distinta naturaleza.

La necesidad de la utilización de áridos reciclados en la construcción está fundamentada por motivos de índole medioambiental, debido a la generación de grandes volúmenes de residuos de difícil gestión. Los destinos posibles que puede tener el árido reciclado son su utilización en rellenos y terraplenes, en bases y subbases de carreteras, y finalmente como árido de un nuevo hormigón. Lógicamente el nivel de exigencia de las características que debe cumplir el árido es creciente con las utilidades citadas, siendo las más restrictivas las que debe cumplir para su utilización en hormigón.

El primer paso para fomentar el reciclaje de estos residuos (que actualmente se estima inferior al 15%), es la elaboración de normativa que garantice una utilización adecuada del material para las distintas aplicaciones. En España la utilización de los áridos reciclados en hormigón estructural, aplicación en la que se centra este artículo, queda regulada en la Instrucción de Hormigón Estructural EHE-08, dentro del *Anejo 15º*. “*Recomendaciones para la utilización de hormigones reciclados*”.

Aunque actualmente en España no se reciclan los RCDs en hormigones de uso estructural, excepto de forma muy puntual, en Europa son varios los países que sí lo hacen, aunque en todos los casos se trata de una aplicación minoritaria. Como muestra de ello, hay que destacar el caso de países como Bélgica que, debido a su escasez de áridos, recicla un 17% para la fabricación de hormigón.

La mayor parte de los estudios y normativas parecen coincidir en que la utilización del árido reciclado en hormigón estructural debe limitarse únicamente a aquellos áridos procedentes de escombros de hormigón, y todos ellos aconsejan la utilización de la fracción gruesa, ya que la fracción fina empeora sustancialmente la calidad del hormigón reciclado.



Figura 1. Acopio residuos de hormigón.

* Autor de contacto: pilar.alaejos@cedex.es

¹ Laboratorio Central de Estructuras y Materiales del CEDEX, Madrid, España.



Figura 2. Detalle de los residuos.



Figura 3. Árido grueso reciclado procedente de escombros de hormigón.

En este documento se recogen las principales conclusiones obtenidas en los estudios realizados por el Laboratorio Central de Estructuras y Materiales del CEDEX sobre la utilización de árido reciclado en hormigón estructural. Los resultados de este estudio han permitido establecer unas recomendaciones sobre los requisitos que debe cumplir el árido reciclado para su utilización en la fabricación de hormigón estructural, así como las correcciones que deben realizarse en la tecnología del hormigón convencional para su aplicación en hormigón reciclado.

Los resultados alcanzados por el CEDEX, así como los trabajos desarrollados por el Grupo de Trabajo “Hormigón Reciclado” perteneciente a la Comisión Permanente del Hormigón y a la Asociación Científico-Técnica del Hormigón Estructural, coordinado por el CEDEX y que ha contado con la participación de numerosos expertos en este tema en España, han servido de base para el desarrollo de la normativa técnica incluida en el Anejo 15 de la Instrucción EHE-08, dando lugar, además a varios documentos que complementan esta normativa.

Para evaluar las propiedades y la uniformidad de producción del árido reciclado se ha realizado un control mediante la toma de quince muestras quincenales que produce una planta de reciclado de escombros de Madrid. Se ha realizado una caracterización física y química completa de las muestras: granulometría, finos, forma, densidad, absorción, los Ángeles, impurezas, cloruros y sulfatos. Asimismo, se han extraído testigos del hormigón acopiado en

planta, siendo caracterizados posteriormente en el laboratorio.

La segunda parte del estudio ha consistido en establecer el porcentaje máximo admisible del árido grueso reciclado en hormigón estructural, estudiando la influencia que tiene en el hormigón la incorporación de distintos porcentajes de árido reciclado.

Para ello se ha seleccionado un árido reciclado de calidad límite, pero admisible para fabricar hormigón según las especificaciones establecidas en la fase anterior, y se han ensayado las siguientes propiedades del hormigón: consistencia, contenido de aire ocluido, resistencia a compresión, resistencia a tracción, módulo de elasticidad y retracción, en hormigones con porcentajes de árido grueso reciclado de 20%, 50% y 100%.

2. RECOMENDACIONES EN LA PRODUCCIÓN DE ÁRIDO REICLADO

Para el empleo de árido procedente de escombros de hormigón en la fabricación de hormigón nuevo es necesario un procesamiento del residuo, en el que se pueden diferenciar varias fases:

- a) *Demolición selectiva en origen.* Se deben establecer una serie de precauciones durante el proceso de demolición para evitar que los escombros de hormigón se mezclen con tierras, y se reduzca al máximo el contenido de otros materiales de construcción que resultarían indeseables (por ejemplo cerámicos o productos asfálticos). Además, si los escombros van a ser reciclados, conviene utilizar métodos de demolición que reduzcan in situ su tamaño de tal forma que puedan ser tratados por el sistema de trituración de la planta de reciclaje, menores de 1200 mm en plantas fijas y de 400-700 mm para plantas móviles.
- b) *Acopio de residuos según su naturaleza.* Los materiales deben acopiarse por separado en las plantas de producción de áridos reciclados: escombros cerámicos, hormigón y aglomerado asfáltico. Los destinos de los diferentes acopios de materiales reciclados dependerán de la naturaleza o composición mayoritaria de los residuos. Así, mientras que para obras de tierra o terraplenes se suelen utilizar tanto residuos cerámicos, de asfalto, de hormigón o residuos compuestos por ambos, para otras aplicaciones más restrictivas, como la fabricación de hormigón, los materiales reciclados deben proceder únicamente de residuos de hormigón. Esto es debido a que la incorporación de material cerámico o asfalto provoca una disminución tanto de las propiedades mecánicas del hormigón como de su durabilidad. Además, la incorporación de materiales cerámicos puede implicar la presencia de otros tipos de impurezas, como yeso o vidrios, propios de residuos procedentes de edificación.
- c) *Transformación de los escombros de demolición en áridos.* Las plantas de producción de árido reciclado (figura 4) son similares a las plantas de producción de árido natural (incluyen machacadoras, cribas, mecanismos transportadores), y sólo requieren ade-



Figura 4. Vista general de la planta de reciclado de escombros.

más electroimanes para la separación del acero y otros sistemas de eliminación de impurezas.

- d) *Acopio de los áridos reciclados.* Además de almacenar los áridos reciclados según su naturaleza (cerámicos, de hormigón, etc.), se deberán establecer acopios independientes de árido grueso y fino reciclado, ya que para su utilización en hormigón, queda excluido el empleo de arena reciclada, debido a que presenta una diferencia de calidad muy acusada con respecto a la arena natural.

3. CARACTERÍSTICAS DEL ÁRIDO RECICLADO

Existen numerosos estudios que han evaluado las propiedades de los áridos reciclados, obteniéndose una gran dispersión de resultados, ya que la calidad de los mismos depende de numerosos factores, como pueden ser, entre otros, el grado de limpieza que presentan los áridos, las técnicas de procesamiento utilizadas o la calidad del hormigón de origen en el escombros.

Al fijar las especificaciones que debe cumplir el árido reciclado para su aplicación en hormigón estructural, se deben tener en cuenta las siguientes particularidades que presentan este tipo de áridos:

- La primera es que tiene unas características específicas distintas al árido natural, ya que está compuesto de dos materiales de distinta naturaleza: árido natural y mortero de cemento adherido al mismo (figura 5), lo que en ocasiones, impide cumplir algunas de las especificaciones que establece la EHE para el árido convencional.
- Además, las características propias del material hacen adecuado el control de otras propiedades, como pueden ser el contenido de arena o el contenido de impurezas.

- Para estas nuevas propiedades, será necesario establecer métodos de ensayo adecuados, así como modificar o adaptar los métodos ya existentes para el árido natural a este tipo de áridos.
- El origen de estos áridos implica una mayor heterogeneidad en su producción.

En la tabla 1 se incluyen los rangos de resultados obtenidos en cada una de las propiedades del árido evaluadas en el estudio experimental realizado en el CEDEX.

Según se observa en la tabla 1, las propiedades que aparecen sombreadas presentan diferentes grados de incumplimientos con respecto a los límites establecidos para los áridos naturales. Mientras que la absorción se incumple casi sistemáticamente, el coeficiente de Los Ángeles, el contenido de terrones de arcilla o el contenido de partículas ligeras presentan incumplimientos puntuales.

Las nuevas especificaciones establecidas para los áridos gruesos reciclados se han establecido fijando dos puntos de partida. La calidad del árido reciclado no debe diferir sustancialmente de la calidad exigida a los áridos convencionales en la EHE, pero también hay que tener en cuenta, que esta calidad debe ser compatible con la tecnología actualmente empleada en nuestro país para producir áridos reciclados.

Como punto de partida se considera que el límite establecido para el coeficiente de Los Ángeles debe ser el mismo que para el árido natural, ya que aproximadamente el 75% de las partidas controladas han satisfecho el límite que establece la EHE del 40%.

Según se observa en la gráfica 1, las partidas de árido reciclado que satisfacen esta propiedad presentan una absorción inferior al 7%. Estas dos propiedades están estrechamente relacionadas pues ambas dependen del contenido de mortero adherido, causante de la mayor absorción

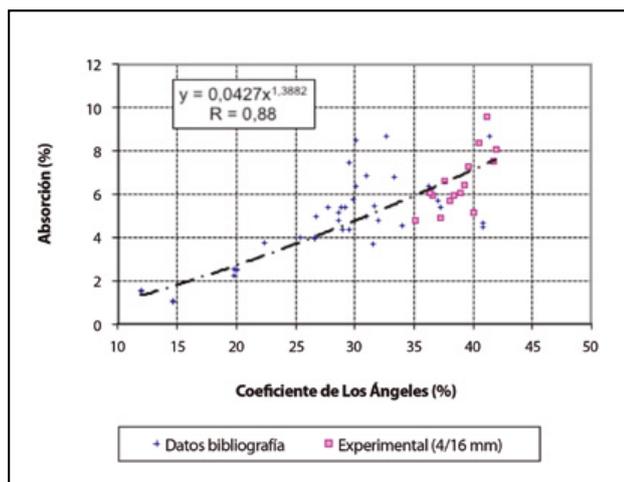


Figura 5. Composición del árido reciclado.

Tabla 1. Propiedades globales del árido reciclado (15 muestras tomadas a lo largo de un año)

Propiedad	Norma de ensayo	Rango	Especificaciones EHE árido natural
Módulo granulométrico	UNE-EN 933-2	[6,7-7,2]	-
Contenido de finos (%)	UNE-EN 933-2	[0,28-1,14]	≤1
Densidad real (kg/dm ³)	UNE-EN 1097-6	[2,09-2,40]	≥2
Densidad saturada con superficie seca (kg/dm ³)	UNE-EN 1097-6	[2,30-2,45]	-
Absorción (%)	UNE-EN 1097-6	[4,91-9,74]	≤5
Coefficiente de Los Ángeles (%)	UNE-EN 1097-2	[35,1-41,7]	≤40
Cl ⁻ solubles en agua (%)	UNE-EN 1744-1	[0,0006-0,005]	≤0,05
Cl ⁻ totales (%)	UNE-EN 196-2	[0,0008-0,005]	≤0,05
SO ₃ solubles en ácido (%)	UNE-EN 1744-1	[0,10-0,42]	≤0,8
SO ₃ totales (%)	UNE-EN 1744-1	[0,15-0,58]	≤1
Partículas ligeras (%)	UNE-EN 1744-1	[0,06-5,85]	≤1
Terrones de arcilla (%)	UNE 7133	[0,04-0,62]	≤0,25
Contenido de arena (%)	UNE 933-2	[0,5-7,5]	≤10
Absorción a los 10 minutos (%)	UNE-EN 1097-6	[9,0-3,0]	-
Impurezas (%)	UNE-EN 933-7	[0,4-11,5]	-
Contenido de mortero adherido (%)	-	[27,0-54,0]	-
R _c de los testigos extraídos(N/mm ²)	UNE-EN 12390-3	[10,2-53,3]	-

de los áridos reciclados y del mayor coeficiente de Los Ángeles, ya que el mortero se pulveriza totalmente en la realización de este ensayo. A partir de esta relación, se ha fijado en el 7% el límite a la absorción del árido grueso reciclado.

**Gráfica 1.** Relación entre el coeficiente de Los Ángeles y la absorción del árido reciclado.

La elevada absorción del árido reciclado (tabla 1) hace necesaria su utilización conjuntamente con árido natural. Se considera adecuada una combinación del 20% de árido grueso reciclado y un 80% de árido grueso natural, de forma que el árido conjunto cumpla el límite del 5% de la EHE. Este requisito permite homogeneizar las propiedades de los áridos naturales (que deberían tener una absorción menor del 4,5%) y reciclados (con absorción menor del 7%), manteniendo el límite EHE.

Además, al establecer este nuevo criterio, se consigue limitar otra de las propiedades que puede estar relacionada con el contenido de mortero, como es el contenido de partículas ligeras. Cuando el árido reciclado procede de hormigones de muy baja calidad, algunas partículas de mortero poroso pueden flotar en el líquido de densidad 2 utilizado en el ensayo, causando

un elevado porcentaje de partículas ligeras. Los áridos reciclados con absorción inferior al 7% no presentan este problema.

Otra característica importante es la presencia de terrones de arcilla en estos áridos, también por encima de lo admisible en un número elevado de partidas. En este caso, será necesario establecer requisitos más estrictos al árido natural, de forma que al utilizarse mezclado en un 20% con árido reciclado se cumpla el límite del 0,25% de la EHE.

**Figura 6.** Impurezas del árido reciclado.

Igualmente, para el contenido de arena del árido grueso reciclado (desclasificados inferiores) y su contenido de impurezas (figura 6) se deberán establecer limitaciones debido al efecto perjudicial que ocasiona en las propiedades del hormigón, según se recogen en la tabla 2.

En dicha tabla aparecen indicadas las especificaciones recomendadas que deben exigirse al árido reciclado y las que debe cumplir el árido natural al utilizarse en una combinación 20%-80% respectivamente. Los requisitos que establece la EHE y que no aparecen en esta tabla, serán los mismos para su aplicación al árido reciclado.

Tabla 2 .Especificaciones recomendadas del árido natural y el árido reciclado

	Árido reciclado	Árido natural	Límite EHE árido mezcla (20% AR+80%AN)
Absorción	≤7%	≤4,5%	≤5%
Terrones de arcilla	≤0,6%	≤0,16%	≤0,25%
Impurezas			
Ladrillo			
Asfalto	≤5%	-	≤1%
Otras impurezas (plástico, vidrio, papel, etc)	≤1%	-	≤0,2%
Porcentaje de arena (<4 mm)	≤7,5%	≤4,4%	5%

El control de calidad del árido reciclado se podría llevar a cabo mediante otros parámetros o propiedades, que según el estudio realizado, se relacionan con las que recoge la EHE-08, incluidas en la tabla 3.

De cara a la planta productora, los resultados de caracterización del hormigón de los acopios, a lo largo de todo el programa experimental desarrollado, indican que el machaqueo de hormigones de resistencia media inferior a 25 N/mm² produce un árido reciclado con un coeficiente de absorción mayor del 7%, que no cumpliría la especificación. Por tanto, sólo se recomienda procesar hormigones con resistencia superior a este valor.

Tabla 3. Requisitos recomendados adicionales para el árido reciclado

	Árido reciclado
Absorción a los 10 minutos	≤5,3%
Densidad saturada con superficie seca	≥2,38 kg/dm ³
Densidad real	≥2,25 kg/dm ³
Mortero adherido	≤44%
Resistencia del hormigón original	≥25 N/mm ²

4. HORMIGÓN RECICLADO

Se entiende por **hormigón reciclado** el hormigón fabricado con árido reciclado o una mezcla de árido reciclado y árido natural. Los principales aspectos que influyen en la calidad del hormigón fabricado con árido reciclado son los siguientes:

- En general, el árido reciclado afecta tanto a las propiedades mecánicas del hormigón, como a aquellas relacionadas con la deformación elástica (módulo de elasticidad) y diferida (retracción y fluencia).
- Cuanto mayor es el contenido de árido reciclado utilizado, mayor es la diferencia de calidad del hormigón en relación a un hormigón convencional. En general, utilizando reducidos porcentajes de árido reciclado, del 20-30%, la mayor parte de las propiedades no se ven afectadas, mientras que con porcentajes mayores se pueden producir importantes disminuciones de la calidad del hormigón.
- El tamaño máximo del árido reciclado influye en la calidad del hormigón, ya que las fracciones más finas son las que presentan peores propiedades.
- La calidad del hormigón de origen del que proceden los áridos reciclados influye en las propiedades

del hormigón reciclado, aunque lo hace en mayor medida cuando el hormigón reciclado es de elevada resistencia. De esta forma, utilizando áridos procedentes de hormigones de baja resistencia, la calidad del hormigón reciclado fabricado con ellos puede disminuir.

- La calidad del árido reciclado (que está muy relacionada con su contenido de mortero adherido), el contenido de impurezas o la incorporación incluso de pequeños porcentajes de arena reciclada influye también en la calidad del hormigón reciclado.
- También influye la categoría resistente del hormigón reciclado, obteniéndose los mayores descensos en los hormigones con mayor nivel de resistencia.

Considerando todos estos factores, se puede entender que el efecto que puede provocar la utilización de árido reciclado en las propiedades del hormigón puede ser muy variado.

En el estudio realizado en el CEDEX, se ha seleccionado un árido reciclado de calidad límite admisible según las especificaciones establecidas en la tabla 2, para evaluar las propiedades del hormigón reciclado, por lo que los resultados de la caracterización de sus propiedades pueden considerarse conservadores, y ser utilizados con fines normativos.

Los resultados del estudio experimental realizado están avalados hasta hormigones reciclados de 50 N/mm², aunque los datos de la bibliografía analizados han permitido extrapolaciones hasta los 110 N/mm². El análisis conjunto de todos indica que la pérdida de capacidad mecánica del hormigón reciclado hasta 50 N/mm² es limitada, debiéndose excluir su utilización en los hormigones de alta resistencia.

4.1. Dosificación y hormigón fresco

Si bien los métodos de dosificación utilizados para los hormigones convencionales pueden emplearse igualmente para los hormigones reciclados, en el resultado final se obtendrá una cierta reducción de la resistencia a compresión del hormigón.

Por ello, para mantener el mismo nivel de resistencia con un hormigón reciclado, es habitual tener que incorporar más cemento en la dosificación, de forma creciente con el porcentaje de árido sustituido y el nivel de resistencia deseado. Este incremento puede variar entre un 5% para una sustitución del 20% en hormigones de 25 N/mm², a 18% para una sustitución del 100% en hormigones de categoría resistente 50 N/mm².

Además, debido a la mayor absorción que presenta el árido reciclado, la demanda de agua es mayor en el hormigón reciclado. Las alternativas que se pueden adoptar para paliar este inconveniente son incorporar más agua en la dosificación, presaturar el árido, o utilizar un superplastificante.

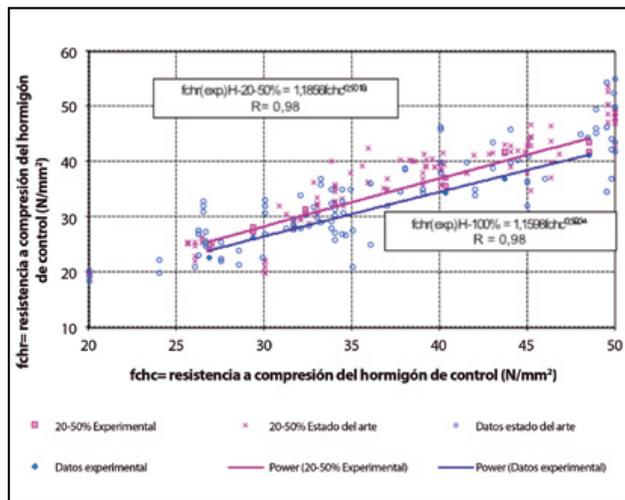
Los métodos de dosificación utilizados para los hormigones convencionales pueden emplearse para los hormigones reciclados, debiéndose emplear los coeficientes de corrección para la resistencia a compresión, que dependen del porcentaje de árido reciclado utilizado y de la categoría resistente del hormigón. A las fórmulas establecidas por

los distintos métodos de dosificación para los áridos convencionales se debe aplicar el factor de corrección r (válido hasta resistencias de 50 N/mm^2), que adopta los valores de la tabla 4. Estos valores están extraídos de los datos experimentales de la gráfica 2. El hormigón reciclado debe dosificarse para una resistencia igual a la que se quiere alcanzar, dividida por el factor r .

Los resultados obtenidos en el análisis de los datos bibliográficos son más favorables que los extraídos del estudio experimental, ya que la calidad del árido reciclado utilizado en este estudio es inferior a la media bibliográfica. Por este motivo, los valores del factor r pueden considerarse conservadores.

Tabla 4. Coeficientes de corrección recomendados para la dosificación del hormigón reciclado

% Árido reciclado	r
0%	1
≤50%	0,90
100%	0,85



Gráfica 1. Relación entre la resistencia a compresión del hormigón de control y del hormigón reciclado H-100-50%-20%, con la misma dosificación.

4.2. Hormigón endurecido

Para una **sustitución del 100%** de la grava, todas las propiedades del hormigón se han visto afectadas negativamente, siendo notable el descenso del módulo de elasticidad y el aumento de la retracción experimentados. El resto de propiedades (resistencia a compresión, módulo dinámico y resistencia a tracción) pueden presentar descensos hasta del 15%.

Los efectos que se producen al disminuir el **contenido de árido grueso reciclado** hasta un **50%** consisten en ligeros aumentos de la retracción respecto al hormigón de control, en un descenso del módulo de elasticidad estático y dinámico, mientras que la resistencia a compresión y tracción apenas se ven afectadas.

Por otra parte, los resultados experimentales indican que cuando se utiliza un porcentaje de **árido grueso reciclado** inferior al **20%**, en hormigones convencionales y reciclados con la misma dosificación, las propiedades del hormigón endurecido apenas cambian, excepto el módulo

de elasticidad estático, y en ocasiones, ligeros incrementos en la retracción del hormigón.

Los coeficientes de corrección que habría que utilizar en la formulación para el cálculo del hormigón reciclado están recogidos en la tabla 5.

Tabla 5. Coeficientes de corrección recomendados para el hormigón reciclado

Propiedad	Coeficiente de corrección $f_{cm} = 25 \text{ N/mm}^2 - 50 \text{ N/mm}^2$		
	20% árido reciclado	50% árido reciclado	100% árido reciclado
Módulo de elasticidad estático	0,90	0,80	0,63
Módulo de elasticidad dinámico	0,96	0,91	0,83
Velocidad de ultrasonidos	0,99	0,96	0,88
Resistencia a tracción		1,0	1,0
Resistencia a flexotracción		1,0	1,0
Retracción		1,0	1,56
Fluencia	1,0	1,25	1,45

A modo de ejemplo se incluyen las Gráficas a partir de las cuales se han determinado los coeficientes de corrección para el módulo de elasticidad (gráfica 3), resistencia a tracción (gráfica 4) y retracción (gráfica 5).

Al igual que sucede en la resistencia a compresión, los resultados obtenidos en el estudio experimental son más conservadores que los resultantes del análisis de los datos bibliográficos, debido a la selección en el primer caso de un árido de calidad límite.

En el caso de la resistencia a tracción, aunque la gráfica 4 refleja descensos en la resistencia a tracción del hormigón reciclado respecto a un hormigón convencional con la misma dosificación, si se comparan hormigones con la misma resistencia a compresión, las resistencias a tracción obtenidas son similares, por lo que la relación que establece la EHE entre la resistencia a compresión y tracción indirecta del hormigón convencional sería válida también para los hormigones reciclados (factor de corrección de valor 1).

Para hormigones de elevada calidad, el efecto negativo que produce el árido reciclado en sus propiedades se acentúa, especialmente en los hormigones con un 100% de árido reciclado. Esto indica que sería aconsejable limitar la resistencia del hormigón reciclado a un máximo de 50 N/mm^2 .

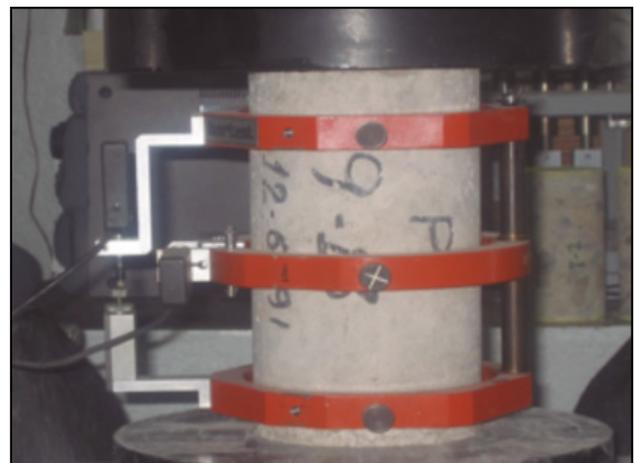
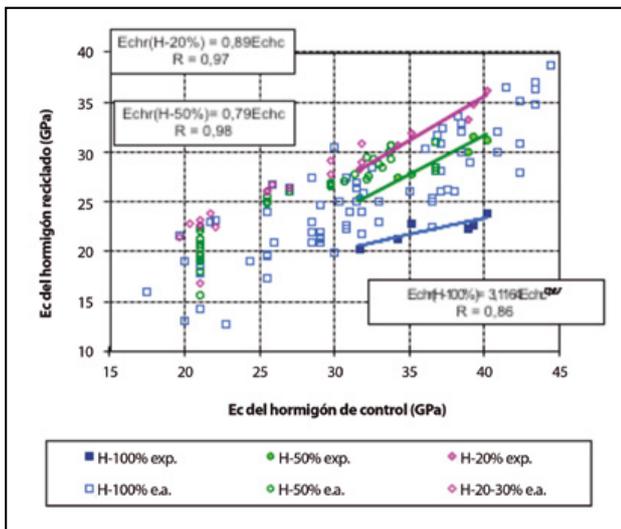


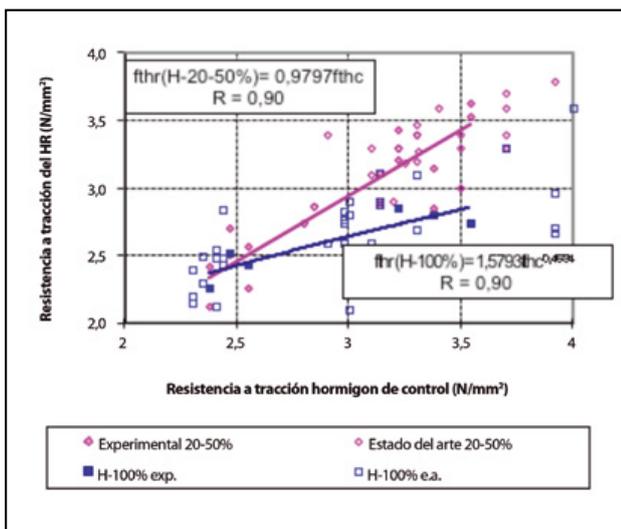
Figura 7. Ensayo del módulo de elasticidad.



Figura 8. Ensayo de retracción.



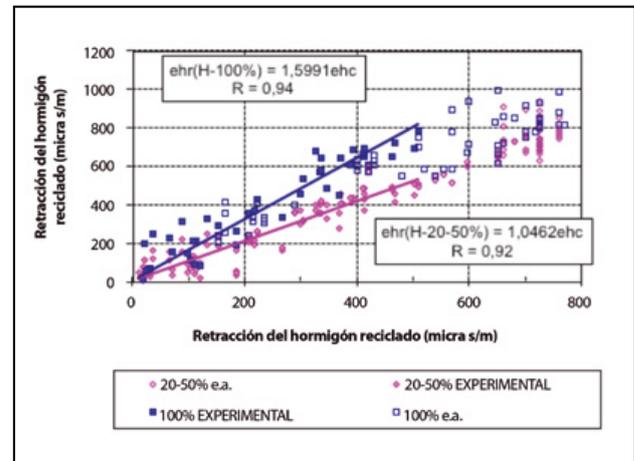
Gráfica 3. Relación entre el módulo de elasticidad del hormigón de control y del hormigón reciclado H-20%-50%-100%.



Gráfica 4. Relación entre la resistencia a tracción del hormigón de control y del hormigón reciclado H-20%-50%-100%.

Para restringir el efecto que produce en el hormigón la incorporación de los áridos reciclados, los resultados del estudio llevado a cabo en el CEDEX, recomiendan limitar el contenido de árido grueso reciclado al 20%, ya que esto permite controlar la calidad del hormigón reciclado,

acotando al 10% las diferencias máximas en sus propiedades mecánicas con respecto a un hormigón convencional de la misma resistencia, en el caso más desfavorable. Este porcentaje coincide con el recomendado para que el árido mezcla cumpla las especificaciones de la EHE-08.



Gráfica 5. Relación entre retracción del hormigón de control y del hormigón reciclado H-20%-50%-100%.

Influencia del árido reciclado en la durabilidad del hormigón estructural

Para hormigones reciclados con un porcentaje de sustitución no superior al 20% de utilizando árido reciclado procedente de hormigón, pueden seguirse las mismas indicaciones de aplicación en ambientes agresivos que se aplican a los hormigones convencionales (mínimos contenidos de cemento y máximas relaciones agua/cemento).

La utilización de altas sustituciones de grava natural por grava reciclada da lugar a hormigones de mayor porosidad, y por tanto se reduce su durabilidad en ambientes agresivos. Este comportamiento deberá tenerse en cuenta en la dosificación de la mezcla, mediante un incremento en el contenido de cemento o una disminución de la relación agua/cemento. Otra posibilidad es aumentar el recubrimiento de las armaduras necesario en determinados ambientes agresivos.

En particular, para hormigón reciclado con más de un 20% de árido reciclado se recomienda que los valores relativos a la máxima relación agua/cemento especificados para los hormigones convencionales pueden ser insuficientes, siendo recomendable en ambientes agresivos disminuir la relación agua/cemento mínima exigida en cada caso en 0,1 puntos. Adicionalmente, de igual manera que para los hormigones convencionales, es conveniente validar la dosificación adoptada con algún ensayo específico de durabilidad, en el caso español se utiliza el ensayo de penetración de agua. Para los ambientes de carbonatación esta reducción de la relación agua/cemento puede reducirse en 0,05 puntos y no sería necesaria la validación de la dosificación con ensayos adicionales.

5. CONCLUSIONES

Es factible técnicamente la utilización de árido reciclado para la fabricación de hormigón estructural, aunque para este uso debe limitarse a la utilización de áridos

reciclados procedentes mayoritariamente de residuos de construcción y demolición constituidos fundamentalmente de hormigón. Su aplicación deberá además restringirse a la utilización únicamente de la fracción gruesa del árido reciclado (tamaño máximo >4 mm).

Asimismo, para el uso de estos áridos en hormigones estructurales se recomienda su combinación con árido natural grueso, con un porcentaje máximo recomendable del 20% de árido reciclado. Con estas limitaciones la peor calidad del árido reciclado apenas se afectará a las propiedades mecánicas del hormigón.

Adicionalmente se recomienda que el árido reciclado que se utilice cumpla con los requisitos que se recogen a continuación.

Requisitos de las propiedades del árido reciclado de hormigón para hormigones estructurales

La mezcla de grava natural y grava reciclada deberá cumplir las especificaciones que se exigen a los áridos naturales para la fabricación de hormigones estructurales, para el caso español las recogidas en la Instrucción de Hormigón Estructural (EHE).

Teniendo en cuenta que la propiedad más desfavorable del árido reciclado es su absorción, para garantizar una buena calidad será necesario limitar al 7% esta característica en el árido reciclado.

En la tabla 2 aparecen indicadas las especificaciones que deben exigirse al árido reciclado y las que debe cumplir el árido natural.

Los requisitos que no aparecen en la tabla anterior y que se exigen de forma habitual a los áridos naturales serán los mismos para el árido reciclado que los recogidos en la normativa de aplicación (Instrucción EHE para el caso español). Esto afecta a propiedades como el coeficiente de los Ángulos, coeficiente de forma o los análisis químicos.

Influencia del árido reciclado en las propiedades del hormigón estructural

La calidad del árido reciclado influye en la calidad del hormigón, siendo el módulo de elasticidad, la retracción y la fluencia, las propiedades que se ven más afectadas, tanto más cuanto mayor es la resistencia del hormigón reciclado. Por este motivo, resulta conveniente limitar la resistencia máxima admisible del hormigón reciclado. Los resultados alcanzados indican que la pérdida de capacidad mecánica del hormigón reciclado hasta 50 N/mm² es menor especialmente si se utilizan porcentajes de árido reciclado no

superiores al 20%. Los áridos reciclados no deben por tanto ser utilizados en la fabricación de hormigones de alta resistencia.

Los coeficientes de paso que habría que utilizar para el cálculo de las propiedades mecánicas del hormigón reciclado están recogidos en la tabla 5.

6. BIBLIOGRAFÍA

Secretaría General Técnica, Ministerio de Fomento (2008). Instrucción de Hormigón Estructural. EHE-08. Madrid: Centro de Publicaciones, Ministerio de Fomento.

Asociación Científico-Técnica del Hormigón Estructural. (2006). *Utilización de árido reciclado para la fabricación de hormigón estructural*. Editorial ACHE. Monografías, M-11. pp. 189.

Alaejos Gutiérrez, P., Sánchez de Juan, M., et al. (2011). *Estudio Prenormativo sobre la utilización de los RCD's en hormigón reciclado de aplicación estructural (Proyecto RECÑHOR) y Reciclado de los RCD's como áridos de hormigones estructurales (Proyecto CLEAM)*. Editorial IECA. Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones. Serie Sostenibilidad. pp.132.

Sánchez de Juan, M. y Alaejos Gutiérrez, P. (2006). *Estudio sobre las propiedades del árido reciclado. Utilización en hormigón estructural*. Colección Monografías M-88. CEDEX, Ministerio de Fomento. pp. 217.

Sánchez de Juan, M. y Alaejos Gutiérrez, M^a P. (2011). *Estudio sobre las propiedades del hormigón fabricado con áridos reciclados*. Colección Monografías, M-108. CEDEX, Ministerio de Fomento. pp. 223.

Alaejos Gutiérrez, M^a P., Sánchez de Juan, M., Domingo, A., Lazaro, C., Monleón, S. y Palacios, F.J. (2011). *Puente sobre el río Turia entre Manises y Paterna (Valencia). Primera experiencia internacional de empleo de hormigón reciclado estructural en un puente atirantado (Parte I)*. Revista *Cemento-Hormigón*. N° 945, pp. 82-93.

Alaejos Gutiérrez, M^a P., Sánchez de Juan, M., Domingo, A., Lazaro, C., Monleón, S. y Palacios, F.J. (2011). *Puente sobre el río Turia entre Manises y Paterna (Valencia). Primera experiencia internacional de empleo de hormigón reciclado estructural en un puente atirantado (Parte II)*. Revista *Cemento-Hormigón*. N° 946, pp. 70-87.

7. AGRADECIMIENTOS

Las autoras agradecen al Programa Operativo de Cooperación Transfronteriza España-Fronteras Exteriores, POCTEFEX, de la Comisión Europea (Fondos FEDER) la financiación del proyecto TTIGEM, en cuyos trabajos se enmarca este artículo. Igualmente agradecen la colaboración de SECEGSA, entidad que junto al CEDEX ha desarrollado el proyecto TTIGEM.