

# ASPECTOS QUÍMICOS DEL ÁRIDO RECICLADO RELACIONADOS CON LA DURABILIDAD DEL HORMIGÓN

(1) **Sánchez de Juan, M.** ; **Alaejos Gutiérrez, P.** (2)

Laboratorio Central de Estructuras y Materiales. CEDEX. C/Alfonso XII, 3 y 5. [msanchez@cedex.es](mailto:msanchez@cedex.es)  
Laboratorio Central de Estructuras y Materiales. CEDEX. C/Alfonso XII, 3 y 5. [palaejos@cedex.es](mailto:palaejos@cedex.es)

## **Abstract:**

The objective of the experimental study has been to evaluate chemical properties of recycled concrete aggregates to assess their influence on concrete durability.

A study has been undertaken in the *Laboratorio Central de Estructuras y Materiales (CEDEX)* carrying out a periodical control of recycled aggregate coming from a waste recycling plant in Madrid. The following chemical properties have been studied: chloride content, sulphate content and alkali content.

The results show that recycled concrete aggregates can fulfil the Spanish specifications for structural concrete related to chlorides and sulphate content, although alkali content are usually very high in these aggregates, so there is risk of expansion by alkali-silica reaction.

**Palabras clave:** Recycled aggregate, recycled concrete, durability, chemical properties

## **Resumen:**

El presente estudio tiene como objetivo evaluar las propiedades químicas de los áridos reciclados procedentes de hormigón con el fin de estudiar su influencia en posibles procesos de degradación del hormigón.

Para ello se ha realizado el control de producción de una planta de reciclado de escombros evaluando las siguientes propiedades químicas: contenido de cloruros, contenido de sulfatos, compuestos totales de azufre y contenido de álcalis.

Los resultados obtenidos demuestran que en general los áridos reciclados pueden satisfacer las especificaciones que establece la EHE relativas a los contenidos de cloruros y sulfatos, aunque suelen presentar elevados contenidos de álcalis.

## **1.- INTRODUCCIÓN**

Se entiende por *árido reciclado* el árido obtenido mediante el procesamiento de residuos de construcción y demolición. 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.

Los destinos posibles que puede tener el árido reciclado son en rellenos y terraplenes, en bases y subbases de carreteras, y finalmente como árido de un nuevo hormigón. El nivel de exigencia que debe cumplir el árido es creciente en las utilidades citadas, siendo la más restrictiva su utilización en hormigón estructural. De esta forma para su empleo en hormigón, el árido reciclado debe proceder únicamente de escombros de hormigón, que son los que presentan una mejor calidad.

Los áridos reciclados procedentes de hormigón se caracterizan por presentar unas propiedades inferiores que los áridos naturales habitualmente utilizados en construcción, ya que están compuestos de dos materiales de distinta naturaleza, árido más mortero (Fotografía 1), además de presentar una gran heterogeneidad producida principalmente por el grado de limpieza que presentan los áridos, las técnicas de procesamiento utilizadas o la calidad del hormigón de origen del escombros.

En general, los áridos pueden contener sustancias que perjudiquen la calidad del hormigón y su durabilidad, y por lo tanto debe limitarse su contenido, como son los sulfatos, los cloruros o los álcalis. Estas tres propiedades, limitadas en la actual Instrucción de Hormigón Estructural, EHE, presentan una serie de particularidades en el árido reciclado, que se expondrán a continuación.



**Fotografía 1.** Composición del árido reciclado

## 2.- METODOLOGÍA

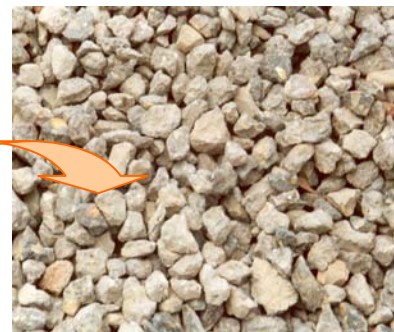
Para evaluar las características químicas de los áridos reciclados se ha realizado el control de producción de una planta de reciclado de residuos ubicada en Madrid (Fotografías 2, 3 y 4). En las muestras tomadas se han analizado tanto sus propiedades físicas como químicas, quedando recogidos en esta ponencia los resultados alcanzados para el segundo grupo.



**Fotografía 2.** Acopio de escombros de hormigón



**Fotografía 3.** Detalle residuos de hormigón



**Fotografía 4.** Árido reciclado

Los áridos utilizados procedían del machaqueo de escombros de hormigón, aunque algunas muestras contenían pequeñas proporciones de impurezas como material cerámico o asfáltico.

Todos los ensayos se han realizado sobre la fracción gruesa del árido reciclado (dividida en dos fracciones 4/8 mm y 8/16 mm), ya que para su utilización en hormigón, la fracción fina suele descartarse por presentar peor calidad. Esta peor calidad es debida al mayor contenido de mortero que presentan las partículas de menor tamaño.

### 3.- CONTENIDO DE CLORUROS

Los áridos reciclados pueden presentar un contenido apreciable de cloruros, en función de la procedencia del hormigón usado como materia prima.

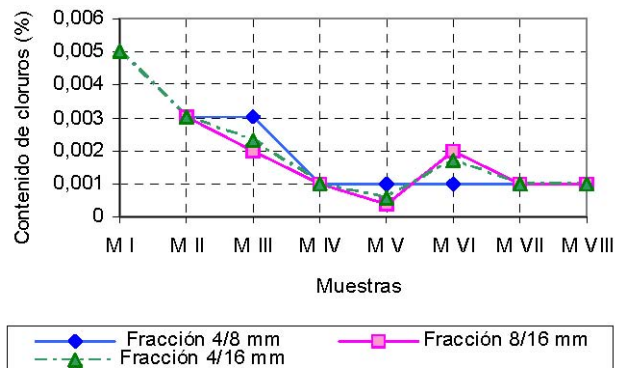
La concentración de cloruros puede ser especialmente elevada en áridos reciclados obtenidos a partir de hormigones procedentes de obras marítimas, puentes o pavimentos expuestos a las sales para el deshielo. Así mismo, los hormigones en los que se haya utilizado aditivos acelerantes, pueden también contener una elevada cantidad de cloruros. Esta cantidad puede disminuir notablemente si sólo se contabilizan los cloruros libres solubles en agua, tal y como se exige para los áridos naturales, al ser estos los que inician el proceso de corrosión de las armaduras.

En el caso de los áridos reciclados, puede resultar poco segura la determinación de los cloruros solubles, ya que el aluminato cálcico del cemento que contiene el árido reciclado, puede haber formado cloro aluminato cálcico hidratado, reduciendo así el contenido de cloruro libre detectado en el ensayo. Sin embargo, la presencia de iones sulfatos procedentes, por ejemplo, de ambientes marinos, puede llegar a liberar estos iones cloruros para formar aluminato cálcico hidratado<sup>(1)</sup>. Otros factores como la temperatura, la cristalografía del aluminato tricálcico y la descomposición del cloro aluminato cálcico hidratado debida a la carbonatación, pueden ser también importantes en la liberación de cloruros solubles, susceptibles de originar la corrosión de las armaduras. Por este motivo, algunos autores establecen que aunque los cloruros libres son los que pueden atacar las armaduras, en el caso de áridos reciclados sería conveniente cuantificar y limitar los cloruros totales.

#### *Procedimiento*

La determinación del contenido de cloruros solubles en agua, se ha realizado por potenciometría, según el procedimiento descrito en la norma **UNE-EN 1744-1:99** “*Ensayos para determinar las propiedades químicas de los áridos: Parte 1: Análisis químico*”.

Debido a la falta de norma para la determinación de los cloruros totales en áridos, se ha utilizado el procedimiento de la Norma **UNE 80-217:91** “*Método de ensayo de cementos. Determinación del contenido de*



**Gráfica 1.** Contenido de cloruros solubles en agua

**cloruros, dióxido de carbono y alcalinos en los cementos”**. Siguiendo esta norma, la muestra pulverizada se ataca con ácido nítrico diluido a ebullición. En la disolución resultante se determina potenciométricamente el contenido de iones cloruro con nitrato de plata, utilizando un electrodo selectivo.

### Resultados

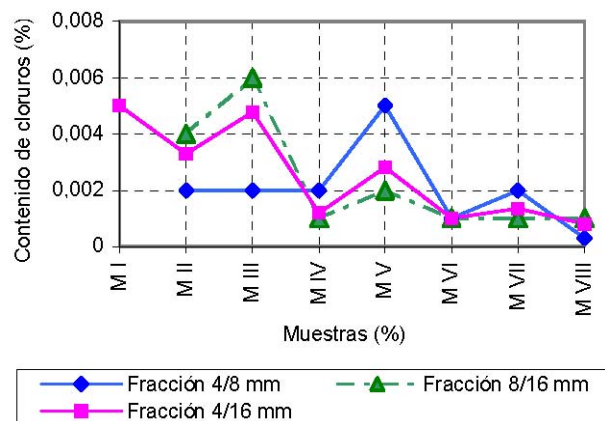
En los casos estudiados, el árido reciclado ha presentado unos porcentajes de cloruros solubles en agua reducidos, en todos los casos por debajo del límite que establece la Instrucción de Hormigón Estructural al respecto (0,05% para hormigón armado).

El rango de valores se encuentra entre 0,001 % y 0,003 % en la fracción del árido 4/8 mm, y entre 0,0004% y 0,003% en la fracción 8/16 mm. La fracción conjunta presenta un porcentaje entre 0,0006-0,005%.

Esto demuestra que los tamaños menores presentan un mayor contenido de cloruros, consecuencia directa de que contienen más mortero adherido, pero siempre dentro de valores muy reducidos.

Según los ensayos realizados, el contenido total de cloruros es ligeramente superior al contenido de cloruros solubles en agua, pero aún así, presentan un porcentaje reducido (Gráfica 2) con valores en el intervalo [0,001-0,005%] en la fracción 4/16 mm.

La Instrucción de Hormigón Estructural establece una limitación a la cantidad de cloruros solubles en agua del 0,05% para hormigón armado, y del 0,03% en el caso de hormigón pretensado. Suponiendo que para el árido reciclado se considere el contenido de cloruros totales en vez del contenido de cloruros solubles en agua, como caso más desfavorable, las muestras ensayadas cumplen las especificaciones de la EHE al respecto, para cualquiera de sus aplicaciones.



**Gráfica 2.** Contenido de cloruros totales

## 4.- CONTENIDO DE SULFATOS

El árido reciclado puede contener un elevado contenido de sulfatos, ya que al contenido propio del árido natural, se le añade los sulfatos que contiene el mortero adherido y la presencia de contaminantes como el yeso cuando el hormigón procede de edificación.

En principio, los sulfatos presentes en la pasta de cemento, ya combinados durante la hidratación, no van a producir problemas en el hormigón nuevo, pero sí será necesario evitar la presencia de impurezas como el yeso, que podría producir expansiones en el hormigón. En cualquier caso, establecer una limitación al contenido de compuestos totales de azufre en vez de los sulfatos solubles en ácido, queda del lado de la seguridad, y en este sentido se orientan las recomendaciones

sobre árido reciclado<sup>(2)(3)(4)(5)</sup>.

Siempre que se prevea que el árido reciclado pueda contener yeso, será aconsejable el empleo de cementos resistentes a los sulfatos en la producción de hormigón reciclado.

### Procedimiento

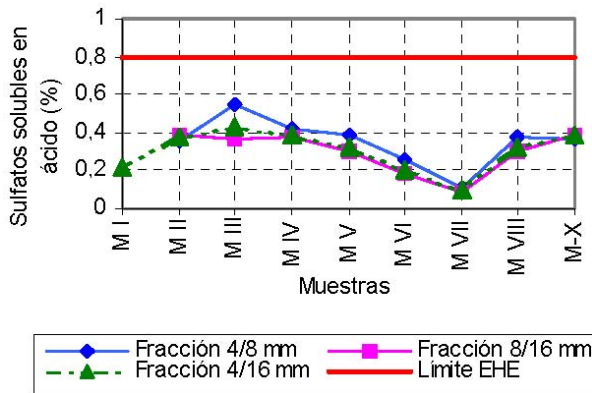
La determinación tanto de los compuestos totales de azufre como de los sulfatos solubles en ácido se ha realizado según los métodos recogidos en la norma **UNE-EN 1744-1:99** “*Ensayos para determinar las propiedades químicas de los áridos: Parte 1: Análisis químico*”.

### Resultados

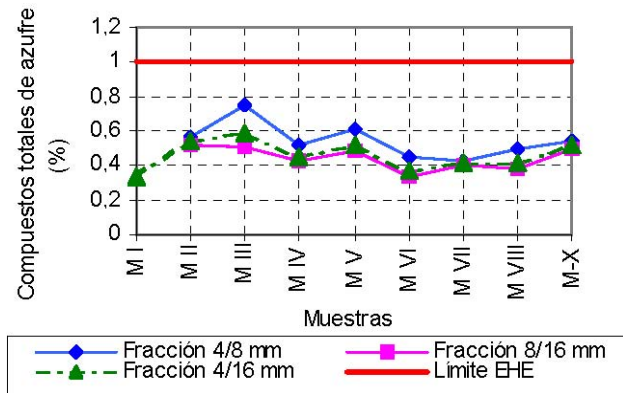
La Gráfica 3 contiene los resultados de sulfatos solubles en ácido, expresados en  $\text{SO}_3^-$ , para todas las muestras ensayadas. En ella se observa una disminución del contenido de sulfatos cuanto mayor es el tamaño de la fracción ensayada, ya que su contenido de mortero es inferior.

Según se observa en la Gráfica 3, en la fracción 4/8 mm el porcentaje de sulfatos varía entre 0,1% y 0,55%, mientras que en la fracción 8/16 mm, el intervalo se reduce a 0,1-0,4%. La fracción conjunta presenta un contenido de sulfatos solubles en ácido entre 0,1-0,42%.

Si se evalúa el contenido de compuestos totales de azufre expresados en  $\text{SO}_3^-$ , se comprueba un ligero aumento, situándose los resultados de las distintas fracciones (4/8 mm y 8/16 mm) en el rango 0,43-0,75% y 0,34-0,52% respectivamente (Gráfica 4). El intervalo de la fracción 4/16 mm es 0,33-0,58%.



**Gráfica 3.** Contenido de sulfatos solubles en ácido



**Gráfica 4.** Contenido de compuestos totales de azufre

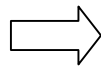
Las recomendaciones sobre utilización de árido reciclado<sup>(2)(5)(6)(7)</sup> establecen el mismo límite que para el árido natural, que según la normativa española, corresponde a un 1% de compuestos totales de azufre expresados en  $\text{SO}_3^-$ , y un 0,8% de sulfatos solubles en ácido. El árido reciclado ensayado cumple estas dos limitaciones, presentando un valor máximo de 0,75% de compuestos totales de azufre y un 0,55% de sulfatos solubles en ácido.

Como se indicó anteriormente, una de las causas del mayor contenido de sulfatos en el árido reciclado se debe a la presencia de compuestos de azufre procedentes del cemento del mortero adherido.

Para una dosificación media de hormigón, y considerando que la Instrucción para la Recepción de Cementos española no permite cementos con un contenido total de sulfatos mayor de 4%, el contenido máximo de sulfatos procedentes del cemento que se podría obtener se situaría entorno al 0,5% en peso de hormigón, y en el caso más desfavorable considerando que todo el árido reciclado fuera mortero, entorno al 1% de su peso. Para estimar el peso del hormigón y del mortero, se ha considerado que el agua combinada es el 23% del peso de cemento, tal y como se muestra a continuación.

**Dosificación:**

1300 kg grava  
 600 kg arena  
 275 kg cemento  
 180 l agua



$$\% \text{SO}_3 \text{ (en mortero)} = \frac{0.04 * 275}{600 + 275 + (0.23 * 275)} = 1,2\%$$

$$\% \text{SO}_3 \text{ (en hormigón)} = \frac{0.04 * 275}{1300 + 600 + 275 + (0.23 * 275)} = 0,5\%$$

0,23\*275      agua combinada

Los resultados experimentales obtenidos se sitúan en el intervalo 0,35-0,75%, valores similares a los calculados, por lo que se puede considerar que los sulfatos son prácticamente en su totalidad aportados por el cemento.

Para comprobar esta relación, se ha realizado un ensayo para determinar el contenido de mortero adherido de las muestras. Actualmente no existe norma de ensayo consensuada, eligiéndose en este estudio el tratamiento térmico<sup>(8)</sup>, que consiste en un calentamiento a 500°C del árido semi-saturado, seguido de un enfriamiento brusco, que origina la desagregación del mortero. Los resultados obtenidos con este procedimiento son muy exactos, y puede ser utilizado para cualquier tipo de árido natural.



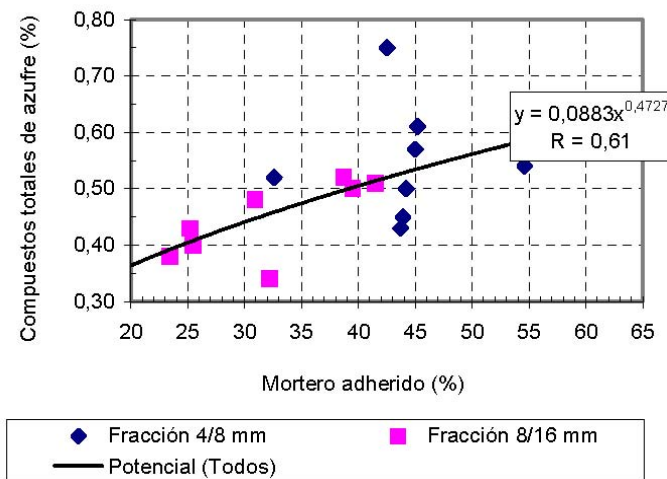
**Fotografía 5.** Mortero resultante del ensayo



**Fotografía 6.** Árido natural resultante del ensayo

La Gráfica 5 confirma esta relación, observándose que en general, las muestras con menores porcentajes de mortero adherido presentan los menores contenidos de compuestos de azufre, y que para un 0% y un 100% de mortero, el contenido de  $\text{SO}_3^-$  alcanzaría 0,0% y 0,8% respectivamente.

Además, el contenido de mortero en un hormigón de dosificación media es:



**Gráfica 5.** Relación entre el contenido de compuestos totales de azufre y el contenido de mortero adherido

$$\% \text{ mortero adherido (en el hormigón)} = \frac{600 + 275 + 0,04 * 275}{1300 + 600 + 275 + (0,63 * 275)} = 42\%$$

Según la Gráfica anterior, el contenido de sulfatos correspondiente a este valor, es 0,52%, próximo al valor de  $\text{SO}_3^-$  calculado teóricamente en el hormigón de 0,50%.

Todas las muestras proceden de la trituración de hormigón reciclado, aunque en las muestras M-I a M-VI, un pequeño porcentaje, entre un 4-7%, lo forma residuos cerámicos procedentes de demoliciones de edificios, material que suele incorporar yeso procedente de revestimientos. A pesar de esto, la selección en origen que se realiza de los escombros es eficaz, y el contenido de yeso que presenta (obtenido mediante el método de ensayo UNE-EN 933-7 que evalúa de forma visual el de contenido de impurezas) es reducido. Se comprueba que si consideramos el porcentaje de yeso detectado en el ensayo de contenido de impurezas, como  $\text{SO}_4\text{Ca}+2\text{H}_2\text{O}$ , y a partir de él calculamos el porcentaje de  $\text{SO}_3^-$ , este valor debe estar siempre por debajo al obtenido mediante el análisis químico del árido, que además de ser más preciso incluye otras fuentes de sulfatos.

Considerando los pesos moleculares del yeso,  $\text{SO}_4\text{Ca}+2\text{H}_2\text{O}$  (172) y del sulfato,  $\text{SO}_3^-$  (80), podemos calcular el porcentaje de sulfatos procedentes del yeso en cada muestra como:

$$\% \text{ de } \text{SO}_3^- \text{ procedente del yeso} = \% \text{ yeso} \times 80 / 172$$

En la tabla 1 se muestran los datos calculados de esta forma.

**Tabla 1:** Contenido de  $\text{SO}_3^-$

Muestras	Análisis químico % de $\text{SO}_3^-$	Determinación de impurezas	
		% yeso $\text{SO}_4\text{Ca}+2\text{H}_2\text{O}$	% de $\text{SO}_3^-$
M-I	0,33	0,1	0,05
M-II	0,54	0,1	0,05
M-III	0,58	0,0	0,0
M-IV	0,45	0,0	0,0
M-V	0,51	0,08	0,023
M-VI	0,37	0,0	0,0
M-VII	0,41	0,0	0,0
M-VIII	0,41	0,0	0,0
M-X	0,51	0,0	0,0

Se observa que los sulfatos procedentes de las impurezas de yeso suponen un porcentaje muy reducido de los totales, incluso en las muestras donde el ladrillo aparecía residualmente como impureza. Por ello, resulta más adecuado la determinación del contenido de sulfatos mediante el ensayo químico que a través del ensayo del contenido de impurezas, ya que los resultados son más exactos en este primero.

## 5.- REACTIVIDAD ÁLCALI-ÁRIDO

La utilización de árido reciclado puede favorecer las reacciones álcali-árido en el hormigón, debido por una parte, al mayor contenido de álcalis que aporta la pasta de cemento adherida en al árido reciclado y, por otra parte, a la mayor dificultad en el control de la reactividad en los áridos, causada por la heterogeneidad y diversa procedencia de este tipo de áridos, por lo que cuando se utilice árido reciclado en ambientes húmedos propicios para la reacción, éstos deberán proceder de fuentes conocidas.

### *Procedimiento*

Al no existir ninguna norma para determinar el contenido de alcalinos en el árido, se ha empleado el método de ensayo para cementos que recoge la norma **UNE 80-217:91** “*Determinación del contenido de cloruros, dióxido de carbono y alcalinos en los cementos*”. La determinación del contenido de  $\text{Na}_2\text{O}$  y  $\text{K}_2\text{O}$  se ha realizado mediante la técnica de absorción atómica.

### *Resultados*

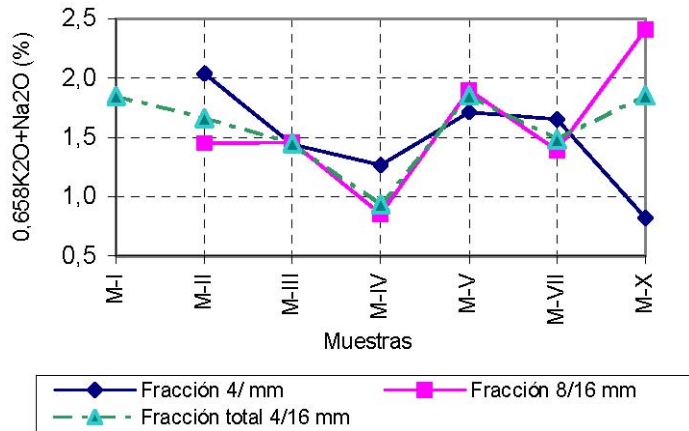
El contenido de  $\text{Na}_2\text{O}$  en la fracción 4/16 mm si sitúa entre 0,3 y 1,1%, mientras que el contenido de  $\text{K}_2\text{O}$  presenta valores superiores que varían entre 1-2% .

Si se evalúa el contenido total de alcalinos expresados como óxido de sodio equivalente ( $0,658\text{K}_2\text{O}$



+ Na<sub>2</sub>O) los valores alcanzados en las distintas muestras oscilan entre 0,8-2,0% en la fracción más fina, y entre 0,9-2,4% en la fracción más gruesa (Gráfica 6).

Aunque tradicionalmente para evitar el riesgo de expansión suelen exigirse cementos de bajo contenido de álcalis (Na<sub>2</sub>O<sub>eq</sub><0,6%), algunos estudios recientes<sup>(9)</sup> recomiendan limitar a 3,0 kg/m<sup>3</sup> el contenido total de alcalinos en el hormigón. Suponiendo que los alcalinos del cemento suelen alcanzar un valor máximo del 1% del peso del cemento, con una dosificación normal (275 kg de cemento y 1300 kg de árido grueso) el valor de 3,0 kg/m<sup>3</sup> equivale a limitar a 0,019% el contenido de alcalinos del árido grueso reciclado.



Gráfica 6: Contenido de alcalinos (0,658K<sub>2</sub>O+Na<sub>2</sub>O)

Este valor resulta de la siguiente ecuación:

$$\frac{275 \cdot 1,0}{100} + \frac{1300 \cdot x}{100} = 3 \text{ kg / m}^3$$

siendo x el porcentaje de alcalinos del árido.

En comparación con este límite, los valores obtenidos en los áridos reciclados son extremadamente elevados (1-2%), aunque su principal aportación procede del árido natural. Esto se deduce calculando de forma teórica los álcalis que puede aportar la pasta de cemento del árido reciclado como sigue.

Para la dosificación considerada en el apartado “4. Contenido de sulfatos”, y considerando que el contenido de álcalis en el cemento suele ser inferior al 1% de su peso, referido al peso de hormigón, este valor resulta 0,12% y referido al peso de mortero, 0,29%.

1300 kg	grava	⇒	%0,658K <sub>2</sub> O+Na <sub>2</sub> O(en mortero)=	$\frac{0,01 \cdot 275}{600 + 275 + (0,23 \cdot 275)} = 0,29\%$
600 kg	arena			
275 kg	cemento			
180 l	agua			
0,23*275	agua combinada			

		⇒	%0,658K <sub>2</sub> O+Na <sub>2</sub> O (en hormigón)=	$\frac{0,01 \cdot 275}{1300 + 600 + 275 + (0,23 \cdot 275)} = 0,12\%$

Por tanto, asimilando que los áridos reciclados constituyen en sí un hormigón, los álcalis que pueden aportar en un nuevo hormigón valdrían un 0,12%. Este valor equivaldría a utilizar, en un nuevo hormigón con la misma dosificación (1300 kg de árido grueso reciclado con 0,12% de álcalis), un cemento con un contenido adicional de álcalis de:

$$\left( \frac{0,12 \cdot 1300}{275} \right) = 0,56\%$$

El valor del 0,56% en peso de cemento indica que el árido reciclado en condiciones de humedad, podría aportar un elevado porcentaje de álcalis, y no debería ser mezclado con áridos potencialmente reactivos.

Para prevenir las reacciones álcali-árido, la EHE indica la necesidad de utilizar cementos con un contenido de alcalinos inferior al 0,6% del peso de cemento, teniendo en cuenta los que serán aportados por el árido reciclado, esto obligaría a su utilización con cementos con contenidos de álcalis menores de  $0,6 - 0,56 = 0,04\%$  de álcalis.

Los resultados expuestos indican que los áridos reciclados aportan elevados contenidos de álcalis en un nuevo hormigón que obligaría a utilizar cementos prácticamente exentos de álcalis para evitar expansiones. Sin embargo, estos requisitos pueden no ser tan exigentes, determinando en vez del contenido total de álcalis del árido reciclado, los álcalis reactivos que verdaderamente pueden intervenir en reacciones álcali-árido. Para ello sería necesario desarrollar un método de ensayo específico.

## **6.- CONCLUSIONES**

Las principales conclusiones obtenidas en el presente estudio experimental son las siguientes:

- El análisis químico de las distintas muestras indica que el árido reciclado ensayado (que representa un año de producción de una planta ubicada en Madrid) no presenta problemas en cuanto al contenido de cloruros y sulfatos.
- En el caso de los áridos reciclados, puede resultar poco segura la determinación de los cloruros solubles, ya que aunque éstos son los que pueden inicialmente atacar las armaduras, determinadas condiciones como la presencia de iones sulfatos, pueden provocar la liberación de cloruros no solubles. Desde un punto de vista más conservador, conviene controlar el contenido de cloruros totales en estos áridos.
- En cuanto al contenido de sulfatos, el árido reciclado ensayado cumple las limitaciones que establece la EHE tanto para el contenido de sulfatos solubles en ácido (0,8%) como para el contenido de compuestos totales de azufre (1,0%), presentando valores máximos de 0,42% y 0,58% respectivamente.
- Los áridos reciclados presentan un elevado contenido de álcalis, con un porcentaje de óxido de sodio equivalente ( $0,658K_2O + Na_2O$ ) que oscila entre el 1-2%. Por ello, para su utilización en ambientes diferentes al I y IIb se recomienda utilizar una única fuente controlada y realizar un estudio complementario de reactividad potencial, tanto del propio árido reciclado como del árido natural que vaya a ser utilizado en la mezcla.

## **7.- BIBLIOGRAFÍA**

- (1) **GULIKERS, J.:** “Reliability of Chloride Analysis in Determining the Corrosivity of Concrete”. Recent Advances in Bridge Engineering. CIMNE. Barcelona, p.p. 325-343, 1996.
- (2) **COLLINS, R.J.:** “BRE Digest 433: Recycled Aggregates”. Noviembre 1998.
- (3) **KARLSEN, J.; PETKOVIC, G.; LAHUS, O.:** “A Norwegian Certification Scheme for Recycled Aggregate (RCA)”. Sustainable Buildings 2002.
- (4) **RILEM (International Union of Testing and Research Laboratories for Materials and Structures):** “Specifications for Concrete with Recycled Aggregates”. Materials and Structures, N°27. p.p. 557-559, 1994.
- (5) **VINCKE, J.; ROUSSEAU, E.:** “Recycling of Construction and Demolition Waste in Belgium: Actual Situation and Future Evolution”. Demolition and Reuse of Concrete and Masonry, Proceedings of the Third International RILEM Symposium, Edited by Lauritzen, E.K., Published by E&FN Spon, 2-6 Boundary Row, London SE 1 8HN, First Edition, 1994. pp. 57-69.
- (6) **KASAI, Y.:** “Guidelines and the Present State of the Reuse of Demolished Concrete in Japan”. Demolition and Reuse of Concrete and Masonry. Proceedings of the Third International RILEM Symposium, Edited by Lauritzen, E.K., Published by E&FN Spon, 2-6 Boundary Row, London SE 1 8HN, First Edition. pp. 93-104, 1994.
- (7) **CUR:** “Report nr. 125: Crushed Concrete Rubble and Masonry Rubble as Aggregate for Concrete”. (Dutch language, summary in English).
- (8) **BARRA, M.:** “Estudio de la Durabilidad del Hormigón de Árido Reciclado en su Aplicación como Hormigón Estructural”. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña. 1996.
- (9) **THE CONCRETE SOCIETY.** Alkali-silica reaction. Minimising the risk to concrete. Guidance notes and model specification clauses. Technical Report n° 30. Slough, Inglaterra: The Concrete Society. 1999.