

# Utilización segura de áridos potencialmente reactivos en el hormigón

*Safe use of reactive aggregates in concrete.*

Víctor D. Lanza Fernández<sup>\*,a</sup>, Pilar Alaejos Gutiérrez<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Dr. Ingeniero Químico. Coordinador de Programa Durabilidad del Hormigón. CEDEX.

<sup>b</sup> Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Jefe de Área de Ciencia de Materiales. CEDEX.

## RESUMEN

Esta comunicación expone dos casos reales en que los áridos a utilizar en dos obras hidráulicas son potencialmente reactivos y su sustitución por otros inocuos es muy dificultosa y cara.

Para valorar si la dosificación propuesta en ambos casos podrá dar en el futuro problemas expansivos, se analiza experimentalmente si el aporte de alcalinos y la puzolanidad de los cementos propuestos serán suficientes para garantizar el uso seguro de los dos áridos reactivos.

## ABSTRACT

This document exposes the real case of two potentially reactive aggregates that are going to be used in concrete and the substitution for innocuous aggregates is difficult and expensive.

The potential expansion of the proportion of concrete materials proposed is evaluated measuring the alkali content of concrete and the pozzolanicity of each cement, and analyzing if these parameters in the cements proposed are enough to avoid the expansion of the reactive aggregates in concrete.

**PALABRAS CLAVE:** reacción álcali árido, áridos reactivos, hormigón, adición puzolánica.

**KEYWORDS:** alkali-aggregate reaction, reactive aggregate, concrete, pozzolanic admixture.

## 1. Introducción

La reacción álcali sílice (RAS) se produce cuando los álcalis presentes en la disolución intersticial del hormigón reaccionan con algunas formas de sílice reactiva presentes en los áridos para formar geles que, al embeber agua, expanden produciendo el deterioro del hormigón [1].



Para que se produzca esta reacción y genere daños en el hormigón es necesario que se den de

forma simultánea [2,3]: la presencia en cantidad suficiente de componentes silíceos reactivos en los áridos, concentración de álcalis suficientes en la disolución de los poros y presencia de agua.

Por tanto, eliminar uno de estos factores en el hormigón evitaría que se produzcan procesos expansivos. Este hecho queda recogido en la normativa española. Así, la Instrucción EHE-08

[4] indica que cuando el ambiente es diferente de I y IIb (presencia de agua) se debe adoptar una de estas dos medidas:

- Empleo de áridos no reactivos
- Empleo de cementos de bajo contenido en alcalinos ( $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}} < 0,60\%$  p.cem.)

La Instrucción también indica que, si no es posible cumplir con una de las limitaciones a las materias primas, se deberá realizar **un estudio experimental específico** sobre la conveniencia de adoptar una de las siguientes medidas:

- Empleo de cemento con adiciones puzolánicas
- Empleo de adiciones al hormigón

Finalmente, puede estudiarse también la conveniencia de adoptar un método de protección adicional por impermeabilización superficial, lo que eliminaría el acceso al agua del hormigón.

Por tanto, aunque las adiciones puzolánicas son una opción cuando el árido es reactivo, no está normalizado el procedimiento experimental para validar estos casos.

La presente comunicación muestra el estudio experimental específico realizado en el CEDEX para validar dos dosificaciones diferentes, que se van a utilizar en obras hidráulicas, y en las que no ha sido posible evitar el uso de áridos reactivos en el hormigón.

Para justificar la metodología seguida en el CEDEX, es necesario evaluar cómo intervienen las adiciones puzolánicas en la RAS, qué ensayos recoge la normativa para valorar el funcionamiento de la combinación material cementante- árido, y qué limitaciones y ventajas presenta cada tipo de ensayo.

### **2.1. Adiciones puzolánicas para el uso seguro de áridos reactivos.**

Las adiciones puzolánicas permiten el uso de áridos reactivos debido a que modifican las siguientes propiedades del hormigón [2,5]:

- Disminución de la porosidad y, por tanto, menor movilidad iónica.
- Mayor contenido en alcalinos fijados por los compuestos hidratados. Las adiciones puzolánicas dan menores relaciones  $\text{CaO}:\text{SiO}_2$  en el gel CSH que el cemento portland, lo que permite que más alcalinos sean retenidos en el silicato cálcico hidratado.
- Disminución del contenido en portlandita, necesaria para dar continuidad a la expansión por RAS.

- Los dos factores anteriores conllevan también la disminución del pH de la disolución de los poros.

### **2.2 Ensayos para validar la utilización de áridos reactivos**

Las adiciones puzolánicas son una herramienta para poder utilizar con seguridad áridos reactivos, pero los tipos de adiciones y su concentración en los cementos son muy variables. También es diferente el comportamiento en el hormigón de los diferentes componentes reactivos. Por tanto, como ya indica la Instrucción, en cada caso será necesaria la valoración de la combinación cemento árido utilizada.

**El ensayo acelerado de barras de mortero ASTM C1567** [6] (UNE 83969:2017) es una modificación del ensayo original ASTM C1260, diseñado para medir la capacidad de puzolanas y escorias de controlar la expansión debida a la RAS.

El ensayo modifica al ensayo acelerado de barras de mortero sólo en que es llevado a cabo con el cemento y la adición puzolánica (ceniza volante, puzolana clase N o escoria) en el porcentaje de sustitución que se quiera emplear en el hormigón. Se aplica el límite de 0,10% de expansión a 14 días.

El ensayo presenta las siguientes limitaciones:

- Al ensayar mortero sumergido en hidróxido sódico, el efecto de las adiciones puzolánicas de disminuir los alcalinos y pH en la disolución intersticial no queda bien representado en este ensayo. Aun así, se ha demostrado que incluso en las condiciones tan agresivas de ensayo, las adiciones son capaces de disminuir el pH y la presencia de alcalinos en el interior de las barras de mortero [7, 8].
- No se pueden ensayar áridos con su granulometría real en el hormigón, ni dosificaciones reales que se van a utilizar en obra.
- Se puede subestimar la expansión cuando las adiciones tienen un contenido en óxido de sodio equivalente superior al 4% en peso [9].

A pesar de las limitaciones es un ensayo considerado, principalmente en Estados Unidos [9], como la solución de compromiso óptima entre exactitud y velocidad de ensayo, ya que los resultados experimentales obtenidos son buenos [7,8,10].

**El ensayo de prismas de hormigón ASTM C1293** [11], (UNE 146509, RILEM AAR-3, CSA A23.2-28A) es el mejor ensayo para evaluar la efectividad de adiciones puzolánicas disminuyendo la expansión por RAS [5]. Debido a la menor temperatura de ensayo (38 °C) y a que no se sumergen las probetas en hidróxido sódico 1M, el ensayo reproduce mejor que las barras de mortero aquellos factores que hacen válidas a las adiciones para utilizar áridos reactivos.

Los prismas de hormigón se fabrican con la arena, la grava y la proporción cemento-adición objeto de estudio. Se dosifican 420 kg/m<sup>3</sup> de material cementante y se adicionan álcalis para que el cemento tenga siempre 1,25% Na<sub>2</sub>O<sub>eq</sub>. Las probetas se mantienen en ambiente saturado de agua, de manera que el ensayo proporciona agua y alcalinos en exceso para que sea la combinación de árido reactivo y material cementante lo único que modifique la expansión de los prismas.

La duración del ensayo es su mayor inconveniente. Un año de duración, y recomendaciones de ampliarlo a 2 años [12] cuando se estudian cementos con adiciones hacen al ensayo incompatible con la ingeniería actual [9].

**El ensayo acelerado de prismas de hormigón RILEM-AAR-4.1.** [13] (UNE 83967: 2016EX) es un ensayo que trata de aunar las ventajas de los dos ensayos anteriores. Así, el ensayo se lleva a cabo sobre hormigón a 60°C, disminuyendo la duración hasta 20 semanas, y permitiendo conocer el comportamiento conjunto de la arena, grava y cemento que se van a utilizar en el hormigón. Una de las principales limitaciones es que su uso para cemento con adiciones no está expresamente contemplado en el ámbito de la norma RILEM AAR-4.1 [13], si bien podría utilizarse también con este propósito.

Las probetas se mantienen en ambiente saturado de agua y se adicionan alcalinos al hormigón para que siempre contenga 5,5 kg Na<sub>2</sub>O<sub>eq</sub> por m<sup>3</sup> de hormigón. El exceso de alcalinos y el ambiente saturado de agua permiten asegurar que ningún factor de la reacción camufla la detección de áridos reactivos, y además compensa el posible lixiviado de alcalinos de los prismas, ya que este es el mayor problema que plantea el subir la temperatura de ensayo con prismas en contacto con aire saturado de agua [14,15].

La bibliografía recoge dos límites posibles: 0,03% de expansión a 15 [13] o a 20 semanas [16].

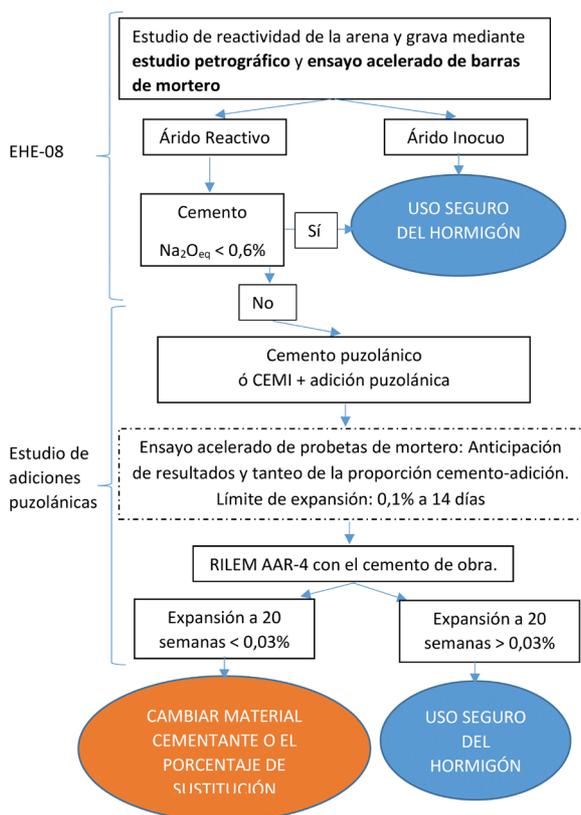
Finalmente, sólo hay en la bibliografía actualmente un **ensayo normalizado para ensayar la dosificación** que se va a poner en obra sin modificaciones. La norma francesa **FN P 18-454** (UNE 83967:2016) se basa en el ensayo acelerado de prismas de hormigón, pero ensaya directamente el hormigón que se va a poner en obra, sin adicionar alcalinos al hormigón. La norma francesa fija el límite de expansión en 0,02% a 20 semanas.

El mayor inconveniente de este ensayo es que no corrige con exceso de alcalinos la posible lixiviación que se genera a 60°C en un hormigón ubicado en un ambiente saturado de agua, en el que agua sin alcalinos circulará durante 20 semanas por toda la superficie de los prismas, facilitando su extracción. Este ensayo sin exceso de alcalinos asume, por tanto, un mayor riesgo de producir falsos negativos.

## 2. Metodología de trabajo en el CEDEX

Analizadas las distintas posibilidades que aporta la bibliografía actual para validar hormigones fabricados con áridos reactivos, la metodología seguida en el CEDEX para documentar el uso seguro de estos áridos ha sido mostrada en la figura 1. Se realizan los siguientes pasos:

- Evaluar la reactividad de los áridos: valoración conjunta del ensayo acelerado de probetas de mortero y estudio petrográfico.



- Contenido en alcalinos del cemento.
- Confirmada la reactividad del árido y el contenido de alcalinos, el ensayo acelerado de barras de mortero permite de una forma rápida y sencilla tantear la proporción cemento-adición para controlar la expansión.
- Por último, el ensayo acelerado de prismas de hormigón RILEM-AAR-4.1 se utiliza para validar el material cementante obtenido en las barras de mortero.

Finalmente, se puede llegar a ensayar la dosificación que se va a poner en obra (proporción árido – agua – material cementante real de obra) en el ensayo acelerado de prismas de hormigón (100% humedad relativa y 60°C), pero manteniendo siempre el exceso de alcalinos en el hormigón (5,5 kg Na<sub>2</sub>O<sub>eq</sub> por m<sup>3</sup> de hormigón).

A continuación se exponen dos casos reales de áridos reactivos, para los que se solicita un

informe que garantice su uso seguro con el cemento que el responsable de la obra propone.

### 3. Informe para la utilización segura del HORMIGÓN H.

Para la construcción de una obra hidráulica, se propone la utilización del HORMIGÓN H, obtenido usando como árido fino la mezcla de 66% de la arena A y 33% de la arena B, y una grava C, por ser los materiales disponibles en la zona para la fabricación del hormigón. Prevista la posible reactividad del árido se propone utilizar un cemento compuesto (CPC 30 R RS), del que su normativa local sólo garantiza que posee alguna actividad puzolánica.

La dosificación por metro cúbico de hormigón propuesta es de 1780 kg de árido, siendo 55% grava y 45% arena, 400 kg cemento y 200 l de agua.

Al destinarse el hormigón a una obra hidráulica, la presencia de agua está asegurada. Por tanto, para evitar la aparición de expansión por reacción álcali sílice, en primer lugar se analiza la reactividad de los áridos propuestos.

#### 3.1. Reactividad de los áridos A, B y C.

Se lleva a cabo el estudio petrográfico y el ensayo acelerado de probetas de mortero de los 3 áridos que formarán el hormigón H.

La tabla 1 recoge la cuantificación de componentes reactivos obtenida en la petrografía.

**Tabla 1. Petrografía de los áridos A, B y C.**  
% Volumen en el árido de las barras de mortero.

|                               | A    | B    | C    |
|-------------------------------|------|------|------|
| Cuarzo microcrist. (10-60 µm) | 7,2  | 2,8  | 5,0  |
| Cuarzo criptocrist. (<10 µm)  | 3,2  | 1,9  | 1,7  |
| Cuarzo inocuo (>10 µm)        | 89,6 | 95,3 | 93,4 |
| Comp. diferentes del cuarzo   | 0    | 0    | 0    |
| Cuarzo reactivo equivalente   | 5,6  | 2,8  | 3,4  |

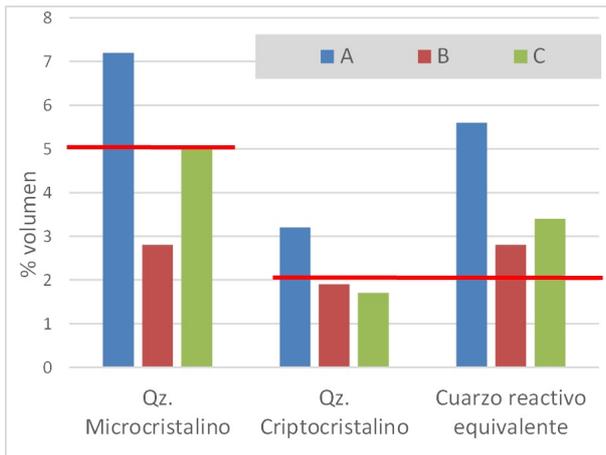


Figura 2. Cuantificación de componentes reactivos y sus límites.

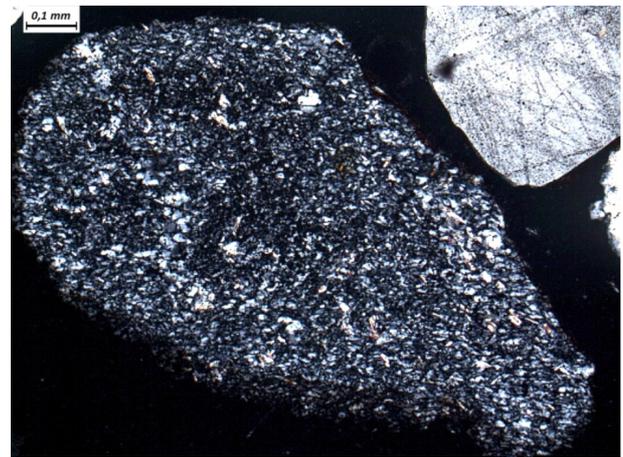
Los tres áridos muestran una composición muy homogénea, de naturaleza cuarcítica. La reactividad de los tres proviene de la presencia en ellos de cuarzo micro y criptocristalino (fotografía 1). El contenido en ambos componentes es superior a lo permitido en la normativa internacional [17-19]. Además se puede evaluar el contenido en cuarzo reactivo equivalente, como la suma ponderada del cuarzo micro y criptocristalino. Un contenido superior al 2% vol. de cuarzo reactivo equivalente clasifica a los 3 áridos como reactivos [20] (figura 2).

Finalmente, la reactividad de los áridos se cuantifica, además, con el ensayo acelerado de probetas de mortero. Se fabrican las probetas con un cemento de referencia CEM-I 42,5 R. La figura 3 muestra como las expansiones medidas clasifican a los 3 áridos como reactivos, con expansiones similares en los 3 casos. Además, la microscopía electrónica de barrido de los morteros ensayados corrobora que la expansión se origina por la reacción álcali sílice.

Por tanto, tanto la grava (C) como las dos arenas (A y B), utilizadas para la fabricación del hormigón H, son potencialmente reactivas con los álcalis del hormigón.

### 3.2. Contenido de álcalis del cemento

Se mide el contenido en sodio y potasio del cemento. La suma de ambos, expresada en  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ , es del 0,66% en peso de cemento, por lo que no se puede clasificar como cemento de bajo contenido en álcalis.



Fotografía 1. Partícula del árido A formada por cuarzo micro y criptocristalino (LPA).

### 3.3. Estudio de la combinación cemento puzolánico-árido reactivo.

El árido es reactivo y el cemento no es de bajo contenido en álcalis.

El cemento (CPC 30 R RS) es puzolánico pero se desconoce el tipo de adición y su contenido. Por tanto, como primera aproximación para saber la eficacia del cemento en disminuir la expansividad del árido, se lleva a cabo el ensayo acelerado de probetas de mortero con el cemento propuesto. Debido a que los 3 áridos que conformarán el hormigón son de la misma naturaleza y la expansión en barras de mortero similar (Figura 3), se ensaya sólo la arena (A), por ser la que mayor expansión en las barras de mortero ha dado a los 14 días.

La tabla 2 recoge los resultados obtenidos, y los compara con el mismo ensayo llevado a cabo en el apartado 3.1 con el cemento de referencia CEM-I 42,5 R.

Tabla 2. Ensayo ASTM C1260 y ASTM C1567 sobre la arena A

|                     | Cemento de referencia CEM-I 42,5 R | Cemento puzolánico propuesto para la obra |
|---------------------|------------------------------------|---|
| Expansión 14 días   | 0,20                               | 0,20                                      |
| Expansión a 28 días | 0,36                               | 0,35                                      |

Los resultados obtenidos son prácticamente iguales con ambos tipos de cemento. Por tanto la puzolanidad del cemento de obra es

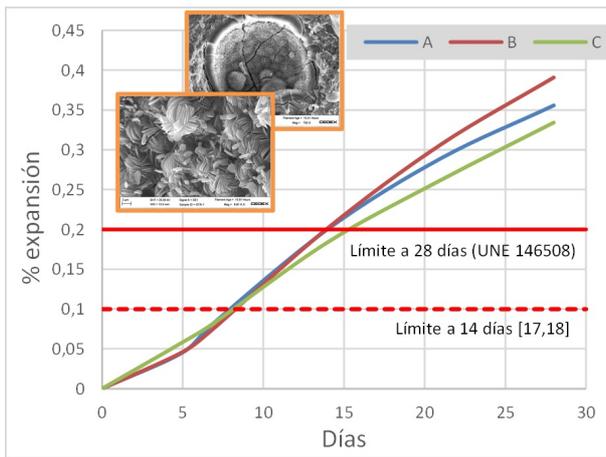


Figura 3. Ensayo acelerado de probetas de mortero. Áridos A, B y C.

prácticamente nula y no permite el uso seguro de los áridos propuestos. Aun así, se lleva a cabo el ensayo acelerado de prismas de hormigón. La dosificación propuesta para el hormigón H es muy similar a la de la norma RILEM AAR-4.1. Por tanto, es posible ensayar directamente la dosificación de obra, sin que se modifique sustancialmente la norma de ensayo. Se emplea el cemento puzolánico y se añade hidróxido sódico al agua de amasado para garantizar que el hormigón contiene  $5,5 \text{ kg/m}^3$  de  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ .

La Figura 4 recoge la expansión en el ensayo acelerado de prismas de hormigón. Se observa como la expansión a las 20 semanas es superior al límite de 0,03%. Además, se han analizado en el microscopio electrónico de barrido los prismas tras 20 semanas de ensayo. Se observa como la expansión medida tiene su origen en la reacción álcali sílice.

### 3.4. Valoración de la reactividad del hormigón H.

El hormigón H, utilizado para la construcción de una estructura hidráulica, se fabrica con dos arenas y una grava silíceas, reactivas por su contenido en cuarzo micro y criptocristalino. El cemento propuesto para su utilización (CPC 30 R RS) no es de bajo contenido en álcalis, y aunque se declara que contiene adiciones puzolánicas, no son efectivas para disminuir la expansión del árido por debajo de los límites que marca la normativa. Por tanto, se desaconseja su

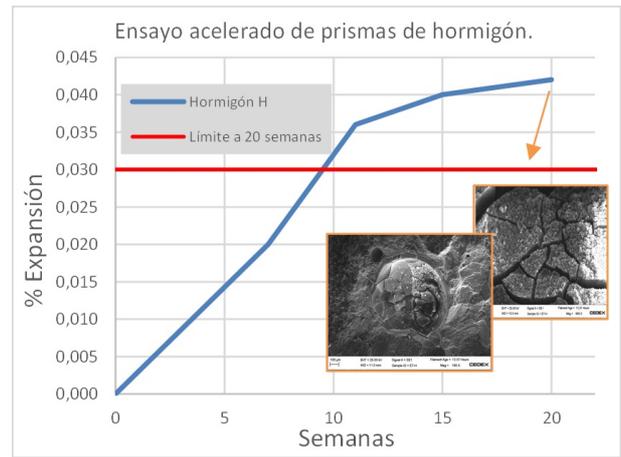


Figura 4. Ensayo acelerado de prismas de hormigón. Hormigón H.

utilización, ya que ocasionaría expansiones en el futuro de la obra.

## 4. Informe para la utilización segura del HORMIGÓN J.

Se propone el hormigón J para la fabricación de un hormigón estructural para una central hidroeléctrica. Debido a lo inaccesible de la estructura, se quiere utilizar el árido disponible en el terreno para la fabricación del hormigón. Para valorar la potencial reactividad álcali sílice del material, se realizan tres catas de terreno diferentes (muestras D, E y F), como muestra la fotografía 2.

### 4.1. Reactividad de los áridos D, E y F.

Las catas extraídas están formadas principalmente por árido grueso. Se homogeniza el tamaño de las muestras y se muele hasta fracción arena para realizar el estudio petrográfico y el ensayo acelerado de probetas de mortero.

La petrografía muestra que las tres catas estudiadas están formadas por áridos de origen aluvial, lo cual explica su heterogeneidad (fotografía 3): están constituidos por fragmentos mezclados de rocas de origen metamórfico, plutónico y volcánico encontrándose en ellos esquistos, metacuarcitas, granitos y pórfidos.



Fotografía 2. Toma de muestras para la viabilidad de los áridos locales. Hormigón J.

Los principales minerales identificados en el estudio petrográfico han sido: diversos tipos de cuarzo con tamaños de grano variable, plagioclasas muy alteradas a sericita, feldespato potásico y biotitas muy alteradas a cloritas.

La tabla 3 recoge la cuantificación de componentes reactivos obtenida en la petrografía, y la figura 5 los límites aplicados. Además, la figura 6 muestra la expansión del ensayo acelerado de probetas de mortero de las 3 catas ensayadas.

**Tabla 3. Petrografía de los áridos D, E y F.**  
% Volumen en el árido de las barras de mortero.

|                                | D    | E    | F    |
|--------------------------------|------|------|------|
| Cuarzo microscrist. (10-60 μm) | 11,0 | 4,0  | 5,3  |
| Cuarzo criptocrist. (<10 μm)   | 2,6  | 3,4  | 3,2  |
| Cuarzo inocuo (>10 μm)         | 19,5 | 20,8 | 19,5 |
| Comp. diferentes del cuarzo    | 66,8 | 71,7 | 72,0 |
| Cuarzo reactivo equivalente    | 6,2  | 4,8  | 5,0  |

Se observa cómo la composición de las tres catas es muy similar. El contenido de cuarzo micro y criptocristalino en las 3 muestras es superior a lo permitido en la normativa internacional [17-19]. Además, el contenido en cuarzo reactivo equivalente [20] es superior al 2% vol., lo que clasifica a los 3 áridos como reactivos.

La homogeneidad de las 3 muestras y su reactividad se corrobora en el ensayo acelerado de

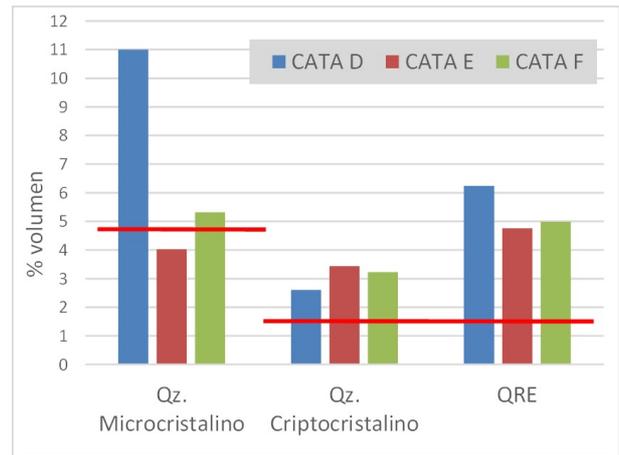


Figura 5. Cuantificación de componentes reactivos y sus límites. Catas D, E y F.

probetas de mortero (figura 6), que clasifica a los áridos D, E y F como potencialmente reactivos. Finalmente, la microscopía electrónica de barrido de los morteros ensayados muestra que la expansión se produce por la reacción álcali sílice.

#### 4.2. Contenido de álcalis del cemento

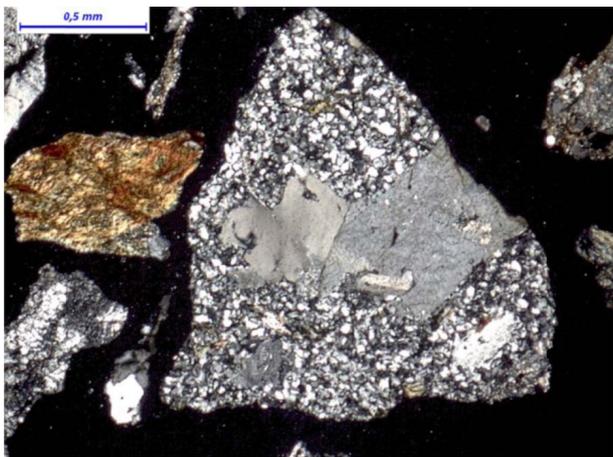
Confirmada la reactividad de los áridos disponibles para la construcción de la central hidroeléctrica, es necesario que el cemento valide su utilización.

Se propone para el hormigón J un cemento con puzolana natural, abundante en la zona de construcción de la central hidroeléctrica.

En primer lugar, se mide el contenido en sodio y potasio del hormigón. La suma de ambos, expresada en  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ , es del 0,55% en peso de cemento. Por tanto, el cemento propuesto es de bajo contenido en álcalis.

La Instrucción EHE-08 permitiría el uso de áridos reactivos con este cemento, independientemente de la dosificación que se utilice.

En cambio, a la obra le aplica la normativa americana AASHTO PP65 [21], que limita el contenido en alcalinos al contenido total de  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$  por metro cúbico de hormigón. Así, para este tipo de obra, la norma americana fija como medida preventiva usar un mínimo de 25% de ceniza volante, o un hormigón cuyo contenido máximo de alcalinos sea de 1,8 kg  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}/\text{m}^3$  de hormigón.



Fotografía 3. Cuarcita microcristalina con feldespato K, y plagioclasas. Biotita alterada a su izquierda. (LPA)

Se conoce que habrá dosificaciones en la central hidroeléctrica con contenidos de cemento de  $350 \text{ kg/m}^3$  y superiores. En estos casos, y aún sin cuantificar alcalinos procedentes del agua de amasado o de los áridos, los alcalinos del hormigón ya superarán el límite normativo de  $1,8 \text{ kg Na}_2\text{O}_{\text{eq}}/\text{m}^3$ .

Por tanto, es necesario evaluar cómo la adición puzolánica participa en la disminución de la expansividad de los áridos propuestos.

#### 4.3. Estudio de la combinación cemento-árido reactivo.

Como anticipo al ensayo acelerado de prismas de hormigón, se realiza el ensayo acelerado de probetas de mortero. Se ensaya la mezcla de las 3 catas realizadas, ya que la petrografía y las barras de mortero han mostrado que son muestras con igual composición y comportamiento expansivo. La figura 7 recoge la expansión con el cemento estándar CEM-I 42,5 R y con el cemento puzolánico propuesto.

Se observa cómo con el cemento puzolánico la expansión disminuye, no superando el límite de  $0,10\%$  de expansión, ni a 14 ni a 28 días. Además, la microscopía electrónica de barrido muestra en los morteros muy pocos productos de la reacción álcali sílice. La puzolanidad del cemento ha minimizado la formación de productos expansivos.

Finalmente, se realiza también el ensayo acelerado de prismas de hormigón con el cemento puzolánico. El hormigón se fabrica con

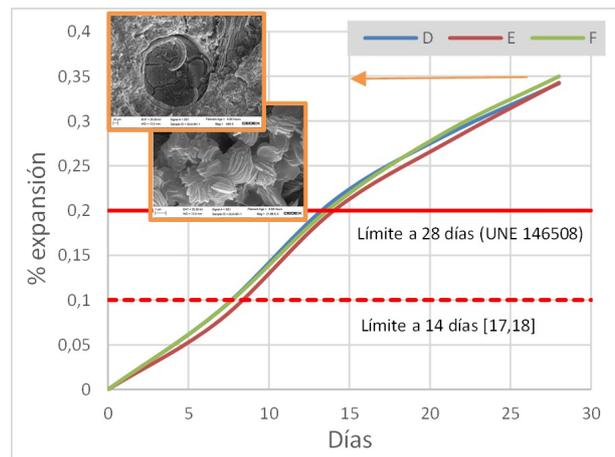


Figura 6. Ensayo acelerado de barras de mortero. Catas D, E, F.

la grava y arena obtenida al machacar el árido de las 3 catas extraídas. La figura 8 recoge los resultados obtenidos.

El ensayo acelerado de prismas de hormigón ha corroborado lo predicho por el ensayo acelerado de barras de mortero. La actividad puzolánica del cemento propuesto es suficiente para anular completamente la expansión del árido seleccionado para el hormigón J (la ligera retracción medida en los prismas se considera debida a la precisión en la medida de expansiones). El hormigón ensayado se observa en el microscopio electrónico de barrido, y tan sólo se constatan los productos normales de la hidratación del cemento.

Finalmente, resaltar que los ensayos acelerados de probetas de mortero y prismas de hormigón para valorar el cemento propuesto mostrarán resultados siempre conservadores, ya que al haber aportado exceso de alcalinos al mortero y hormigón, no valoran que el cemento propuesto es, además de puzolánico, de bajo contenido en álcalis.

#### 4.4. Valoración de la reactividad del hormigón J.

Para la construcción de una central hidroeléctrica se seleccionan los áridos disponibles en la ubicación de la estructura. El árido seleccionado muestra una composición muy heterogénea debido a su origen aluvial, y es reactivo por su contenido en cuarzo micro y criptocristalino. Se selecciona un cemento con

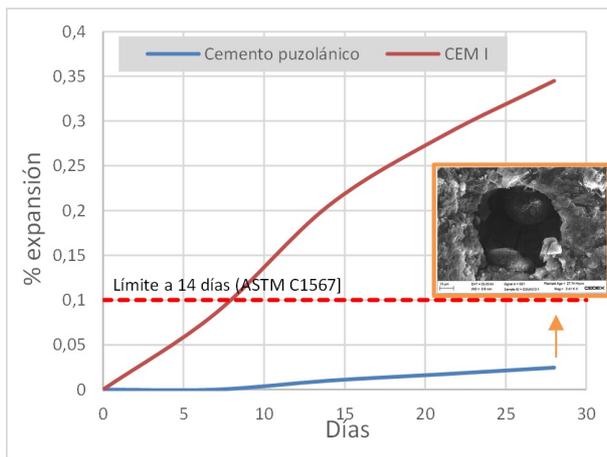


Figura 7. Ensayo acelerado de probetas de mortero. Cemento portland y cemento puzolánico

puzolana natural para la utilización segura del árido reactivo. El cemento es de bajo contenido en álcalis y, además, tanto las barras de mortero como los prismas de hormigón han demostrado que la puzolanicidad del cemento hace que el hormigón J no presente un comportamiento expansivo.

## 5. Conclusiones

La Instrucción española EHE-08 permite la utilización de áridos potencialmente reactivos en presencia de agua si se utiliza un cemento de bajo contenido en álcalis ( $<0,60\%$   $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ ). Si esto no es posible, se pueden emplear los mismos áridos con la utilización de cemento puzolánico, o adiciones puzolánicas en el hormigón. Este último caso requiere de un estudio experimental específico que valide el hormigón.

En los dos casos reales expuestos en esta comunicación, se ha valorado la posible fabricación de hormigón con áridos reactivos utilizando el ensayo acelerado de probetas de mortero, para anticipar resultados a 14 días, y el ensayo acelerado de prismas de hormigón, a  $60^\circ\text{C}$ . Se descarta el ensayo de prismas de hormigón a  $38^\circ\text{C}$  debido a su duración, y el ensayo FN P 18-454, ya que al no añadir alcalinos en exceso al hormigón, corre el riesgo de producir falsos negativos por lixiviación de alcalinos durante el ensayo.

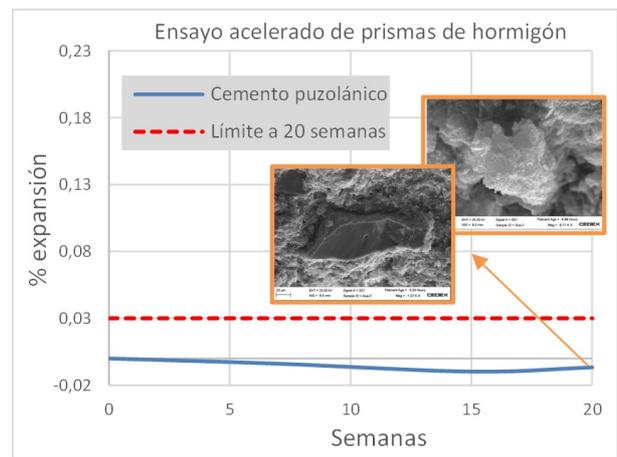


Figura 8. Ensayo acelerado de prismas de hormigón. Hormigón J.

De la aplicación de esta metodología a dos casos reales se han obtenido las siguientes conclusiones:

- Es necesario realizar un estudio específico para validar el cemento a utilizar con un árido reactivo, tal y como ya exige la Instrucción EHE-08. En el caso del hormigón H, la mera utilización de un cemento puzolánico no ha sido suficiente para evitar que el hormigón sea expansivo.
- En los dos hormigones analizados, el ensayo acelerado de probetas de mortero ha anticipado correctamente en 14 días los resultados que a las 20 semanas ha corroborado el ensayo acelerado de prismas de hormigón.
- La microscopía electrónica de barrido ha corroborado que la expansión producida en morteros y hormigones ha sido por la reacción álcali sílice. Cuando la expansión ha desaparecido es porque los productos expansivos no se han formado, validando así ambas técnicas para estudiar la eficacia de las adiciones en la disminución de la expansión.
- La condición de cemento de bajo contenido en álcalis que fija la Instrucción EHE-08 es menos restrictiva que otras normativas, que fijan su límite en  $\text{kg Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$  por  $\text{m}^3$  de hormigón. En función del contenido de cemento que vaya a tener el hormigón y de si pueden existir otras fuentes de alcalinos diferentes del cemento, puede ser necesario sustituir la exigencia de un cemento con bajo contenido en alcalinos por la utilización de un cemento puzolánico.

## 6. Referencias

- [1] P. ALAEJOS, M.A. BERMÚDEZ (2003) Durabilidad y procesos de degradación del hormigón de presas. Estudio Bibliográfico. Madrid: CEDEX. Ministerio de Fomento.
- [2] ACI (2008) Report on Alkali-Aggregate Reactivity, C. 221.1R-98 (Reapproved 2008), American Concrete Institute.
- [3] R. HÖNNUM, B.J. WIGUM, L.T. ET. AL. (2006) State of the art report: key parameters influencing the alkali aggregate reaction. European Community. Competitive and Sustainable Growth Programme. Editor: SINTEF.
- [4] Comisión Permanente del Hormigón, Instrucción de Hormigón Estructural EHE-2008, Ministerio de Fomento, Madrid, 2008.
- [5] M. THOMAS (2011) The effect of supplementary cementing materials on alkali-silica reaction: A review. Cement and Concrete Research. 41. 209-216.
- [6] ASTM C1567-13, Standard Test Method for Determining the Potential Alkali-Silica Reactivity of Combinations of Cementitious Materials and Aggregate (Accelerated Mortar-Bar Method), ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013, [www.astm.org](http://www.astm.org)
- [7] M.A. BÉRUBÉ, J. DUCHESNE, D. CHOUINARD (1995) Why the accelerated mortar bar method ASTM C1260 is reliable for evaluating the effectiveness of supplementary cementing materials in suppressing expansion due to alkali-silica reactivity. Cement concrete and aggregates. 17, 26-34.
- [8] D.M.A. THOMAS, F.A. INNIS (1999) Use of the accelerated bar test for evaluating the efficacy of mineral admixtures for controlling expansion due to alkali-silica reaction. Cement, concrete and aggregates. 21, 157-164.
- [9] AFCESA (2006) Engineering Technical Letter: Alkali-Aggregate Reaction I Portland Cement Concrete (PCC) Airfield Pavements. ETL 06-2. Department of the Air Force. Department of Defense. USA.
- [10] S. SHAYAN, H. MORRIS (2001) A comparison of RTA T363 and ASTM C1260 accelerated mortar bar test methods for detecting reactive aggregates. Cement and Concrete Research. 31, 655-663.
- [11] ASTM C1293-18a, Standard Test Method for Determination of Length Change of Concrete Due to Alkali-Silica Reaction, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2018, [www.astm.org](http://www.astm.org)
- [12] CSA (2004) Concrete materials and methods of concrete construction/Methods of test and standard practices for concrete. Canadian Standard Association.
- [13] P.J. NIXON, I. SIMS (Eds.) (2016) RILEM Recommendations for prevention of Damage by Alkali-Aggregate Reactions in New Concrete Structures. London: Springer.
- [14] J. LINDGÅRD, Ö. ANDIÇ-ÇAKIR, ET. AL. (2012) Alkali-silica reactions (ASR): Literature review on parameters influencing laboratory performance testing. Cement and Concrete Research. 42, 223-243.
- [15] B. FOURNIER, R. Chevrier, M. Grosbois, ET. AL. (2004) The accelerated concrete prism test (60°C): Variability of the test method and proposed expansion limits. Proceedings of the 12<sup>th</sup> International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete. 314-323.
- [16] P. NIXON, S. LANE (2006) Experience from testing of the alkali reactivity of European aggregates according to several concrete prism test methods. European Community. Competitive and Sustainable Growth Programme. Ed.: SINTEF.
- [17] L.J. MALVAR, G.D. CLINE, ET. AL. (2002) Alkali-silica Reaction Mitigation: State of the Art and Recommendations. ACI Material Journal. 99. 480-489.
- [18] I.E.I. (2003) Alkali-Silica Reaction in Concrete. General Recommendations and Guidance in the Specification of Building and Civil Engineering Works. (DRAFT for comments), J.W. PARTY, Editor. The Institution of engineers of Ireland. The Irish Concrete Society.
- [19] EUROPEAN COMMISSION (1996) Standard Test for Alkali-reactive Rocks. Star-Project. Final Report. European Commission, DG XII, contract no. SMT4-CT96-2128.
- [20] P. ALAEJOS, V. LANZA (2007) Influence of equivalent reactive quartz content on expansion due to alkali silica reaction. Cement and Concrete Research. 42. 99-104.
- [21] ASSTHO PP65 (2011) Standard practice for determining the reactivity of concrete aggregates and selecting appropriate measures for preventing deleterious expansion in new concrete constructions. Washington DC, USA, American Association of State and Highway Transportation Officials.