

METODOLOGÍA PARA EL ESTUDIO DEL DETERIORO DEL HORMIGÓN OCASIONADO POR LA REACCIÓN ÁLCALI-SÍLICE

Pilar Alaejos¹ Miguel Angel Bermúdez¹

RESUMEN: En el análisis de estructuras afectadas por la reacción álcali-sílice es habitual utilizar un elevado número de técnicas, aunque sólo algunas de ellas proporcionan una información decisiva en la identificación y cuantificación del fenómeno. En la ponencia se expondrá una metodología para determinar las causas y el alcance del deterioro sufrido con un empleo racional de medios. La metodología consta de los siguientes pasos: 1) Observación de indicios de la reacción, 2) Constatación de la presencia de productos expansivos, 3) Valoración cuantitativa del fenómeno, 4) Determinación de la causa, 5) Valoración de la degradación del hormigón. Se señalarán las técnicas y ensayos disponibles que se consideran más adecuados en cada paso, así como la interpretación de los resultados aplicada al estudio de una presa afectada.

1. INTRODUCCIÓN

La reacción álcali-sílice es un fenómeno expansivo que afecta al hormigón y que provoca el deterioro de grandes estructuras al cabo de un periodo de tiempo relativamente elevado. Esta patología se ha manifestado en numerosos países (el banco de datos de la empresa Acres Internacional Ltd.(1), que se refiere a expansiones en presas y construcciones hidroeléctricas originadas por reacciones árido-álcali, recoge 104 fichas que corresponden a otros tantos casos registrados en todo el mundo), estando los casos de mayor gravedad ligados a obras hidráulicas.

¹ Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Laboratorio Central de Estructuras y Materiales del CEDEX (Ministerio de Fomento). C/Alfonso XII 3 y 5, 28014 Madrid (España). E-mail: palaejos@cedex.es.

En el Laboratorio Central de Estructuras y Materiales del CEDEX (Ministerio de Fomento) se ha realizado recientemente un extenso Estado del Arte sobre los procesos de degradación del hormigón de obras hidráulicas(2), siendo la causa más importante y más documentada la de fenómenos de reactividad álcali-sílice. Dichapublicación ha permitido constatar que en los últimos años se han logrado importantes avances en el estudio de la reacción y en su prevención (ensayos de los áridos, utilización de cementos con bajo contenido en alcalinos o empleo de adiciones minerales). Sin embargo, la revisión bibliográfica realizada también detecta que, en el análisis de estructuras supuestamente afectadas, se observan en ocasiones imprecisiones al identificar el origen de la patología, ya que la simple presencia de geles no siempre es suficiente para demostrar que la reacción sea la patología desencadenante del deterioro del hormigón, pudiendo existir éstos en cantidad insuficiente para el daño o estar superpuestos a otros fenómenos como es la aparición conjunta de etringita. Adicionalmente, el número de técnicas aplicadas para el estudio de la patología que se recogen en el informe es muy amplio, y sin embargo sólo algunas de ellas proporcionan una información que se considera verdaderamente decisiva en la identificación y cuantificación del fenómeno.

A partir del análisis del Estado del Arte, así como del estudio real de varias estructuras hidráulicas afectadas, se ha puesto a punto una metodología, que permita determinar las causas y el alcance del deterioro sufrido por la reacción álcali-sílice, con un empleo racional de medios. Esta metodología consta de los siguientes pasos: 1) Observación de indicios de la reacción, 2) Constatación de la presencia de productos expansivos, 3) Valoración cuantitativa del fenómeno,

4) Determinación de la causa, 5) Valoración de la degradación del hormigón. En la descripción detallada de la misma, se señalarán las técnicas y ensayos disponibles que se consideran más adecuados en cada paso, así como la interpretación de los resultados, aplicada a un caso real de una obra hidráulica afectada por la reacción álcali-sílice.

La obra objeto del estudio forma parte de una extensa explotación hidráulica con aproximadamente 35 años de antigüedad. El hormigón utilizado en su construcción tenía una dosificación de 250 kg/m³ de cemento, siendo los áridos utilizados procedentes de una gravera de río próxima.

2. INDICIOS DE REACCIÓN ÁLCALI-SÍLICE: EXAMEN VISUAL

Inspección de la estructura: La inspección visual de una estructura afectada por la reacción álcali-sílice suele presentar, en estadios avanzados, una intensa fisuración en mapa (Figs. 1 y 2), que aunque supone un significativo indicio no debe considerarse determinante ya que otros fenómenos expansivos también desarrollan una fisuración similar. Es habitual que los bordes de las fisuras aparezcan decolorados o con deposiciones salinas tal como se muestra en las Figs. 3 y 4.

Inspección de los testigos: Suele detectarse la presencia, alrededor de ciertos áridos, de unos halos o contornos de aspecto gelatinoso (transparentes o marrones y con textura resinosa) cuando están húmedos, que al secarse se convierten en masas de color blanquecino o pardo-rojizo, que se pueden arrancar con relativa facilidad de la interfase árido-pasta (Fig. 5). Si las muestras están secas, es conveniente humedecerlas ya que la presencia de gel puede manifestarse por manchas de humedad en la superficie del hormigón durante el período de secado. También suelen aparecer áridos fisurados, así como depósitos en los huecos y fisuras de la pasta (Fig. 3 y Fig. 6), aunque tampoco son determinantes ya que pueden confundirse con depósitos de carbonato cálcico, si se encuentran cerca o en la superficie, o bien de etringita si están en el interior.



Fig. 1: Fisuración mapeada.



Fig. 2: Detalle de la foto anterior.



Fig. 3: Bordes con deposiciones salinas



Fig. 4: Bordes decolorados



Fig.5: Halo gelatinoso alrededor de árido



Fig.6: Depósito y áridos fisurados

En esta fase, es preciso extraer muestra de los depósitos encontrados para su posterior análisis en el microscopio electrónico. Asimismo, deben seleccionarse áridos próximos al depósito o con halos, para el estudio petrográfico.

3. PRESENCIA DE PRODUCTOS DE LA REACCIÓN ÁLCALI-SÍLICE: MICROSCOPÍA ELECTRÓNICA DE BARRIDO

Esta técnica se emplea para estudiar las morfologías de los compuestos presentes, en el hormigón, incluso de los geles o compuestos amorfos no detectables por difracción de rayos X. La identificación de los compuestos es más precisa si se complementa con el análisis micropuntual mediante la técnica de energía de dispersión de rayos X (EDX). Con las técnicas EDX y SEM se observan

diversas morfologías típicas⁽³⁾ de productos de reacción álcali-sílice, como las detectados en las muestras de los testigos de la estructura objeto de estudio.

Productos amorfos o geles: Los geles de la reacción álcali-sílice son silicatos alcalinos muy ricos en agua, presentando al microscopio un aspecto agrietado debido a la desecación (Fig.7).

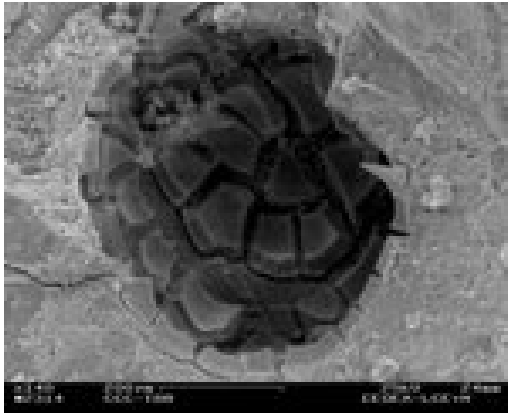


Fig.7: Gel de la reacción

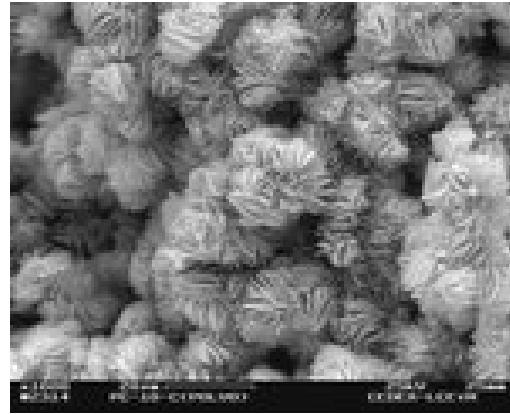


Fig.8: Cristales en rosetas

Productos semiorganizados y productos cristalinos: Los primeros son principalmente amorfos, pero diseminados en su superficie aparecen cristales de pequeño tamaño (inferior a 10 μm) y formas diversas: textura alveolar, nidos de abeja, bolas, pequeños granos precipitados, etc. Los productos cristalinos corresponden a grandes formaciones de cristales de mayor tamaño y formas diferentes: pétalos que pueden agruparse en rosetas (Fig. 8), correspondiente a los depósitos encontrados, aciculares que pueden agruparse en bolas (Fig. 9), etc.



Fig.9: Cristales en agujas

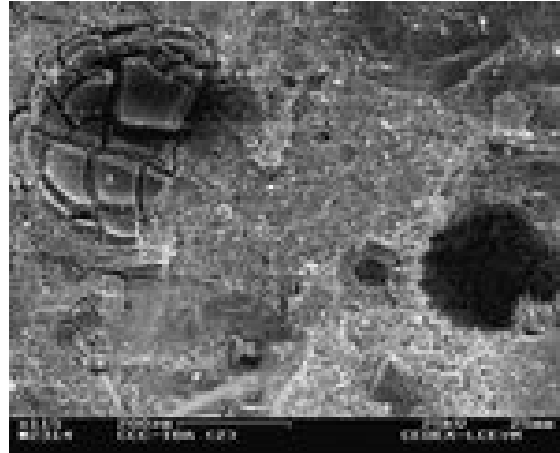


Fig.10: Etringita junto a gel

Presencia de etringita: En estructuras con fenómenos de reactividad álcali-sílice, el estudio de microscopía electrónica suele detectar también la presencia de etringita, rellenando los poros y microfisuras, tal como se muestra en la Fig. 10 de la estructura en estudio. Una primera valoración puede inducir a error asociándola a un ataque por sulfatos simultáneo. Sin embargo, en muchos casos, la etringita se forma simplemente por recristalización de la etringita primaria (no expansiva) del hormigón, favorecida por el efecto reductor del pH que proporciona la reacción

álcali-sílice⁽⁴⁾. La confirmación de un posible ataque por sulfatos, debe realizarse mediante los ensayos químicos pertinentes, tal como se detalla en el apartado siguiente.

4. VALORACIÓN CUANTITATIVA DEL FENÓMENO: ENSAYOS QUÍMICOS

Contenido de álcalis del hormigón: La presencia de un contenido de alcalinos en el hormigón por encima de 3,0 Kg/m³ puede considerarse suficientemente elevada para desencadenar una reacción con los áridos, si éstos presentan el componente reactivo adecuado⁽⁵⁾. Los óxidos de sodio y potasio presentes en el hormigón pueden determinarse mediante ensayos similares a los utilizados en la caracterización de cementos ⁽⁶⁾. En el caso de áridos con minerales ricos en álcalis (feldespatos, etc) es habitual sobrepasar la limitación mencionada, en cuyo caso debe cuantificarse únicamente el contenido de álcalis solubles en agua ⁽⁷⁾ o extraídos en soluciones alcalinas ⁽⁸⁾.

Compuestos de azufre: Asimismo, y con el objetivo de confirmar un posible ataque por sulfatos simultáneo a la reacción álcali-sílice, cuando el estudio de microscopía electrónica detecta etringita, se considera conveniente determinar el contenido de sulfatos solubles en ácido presentes en el hormigón y comprobar que el resultado es compatible con la dosificación de cemento empleada. Finalmente, a partir del árido grueso extraído de los testigos de hormigón, debe comprobarse que cumple los límites habitualmente establecidos por la normativa internacional respecto a compuestos de azufre (<1%).

Aplicación al caso práctico en estudio: La Tabla 1 contiene los resultados de los análisis químicos realizados en la obra estudiada, sobre una muestra de hormigón y árido extraído, representativa y convenientemente pulverizada y homogenizada:

Na ₂ O (%) hormigón	K ₂ O (%) hormigón	Na ₂ O _{eq} (%) hormigón	Sulfatos sol. ácido hormigón (SO ₃ %)	Azufre total Árido (S %)
0,08	0,15	0,18	0,30	0,109

Tabla 1: Análisis químicos de muestras representativas del hormigón

El valor de sodio equivalente implica un contenido total de 4,2 kg/m³ de hormigón (dato obtenido a partir de su densidad según Tabla 2), superior al límite recomendado de 3,0 kg de Na₂O_{eq}/m³ de hormigón. Por tanto, que en el hormigón hay todavía un elevado contenido de álcalis para continuar la reacción, mientras exista suficiente sílice reactiva en el árido y presencia de humedad.

En cuanto a la valoración del ataque por sulfatos, los sulfatos solubles que tiene el hormigón (0,3%) son normales para la dosificación de cemento utilizada, por lo que se podrían suponer procedentes del regulador de fraguado del cemento, lo cual lleva a pensar que no hay un volumen alto de etringita, y no hay ataque por sulfatos coexistiendo con la reacción álcali-sílice. El contenido de azufre en el hormigón cumple los límites establecidos por la Instrucción de Hormigón Española EHE (<1%).

5. VALORACIÓN DE LA DEGRADACIÓN: ENSAYOS MECÁNICOS

Velocidad de ultrasonidos: La medición de ultrasonidos es especialmente útil para detectar los cambios que se producen en el hormigón afectado por la reacción álcali-sílice antes de que se origine la primera fisura, al originarse ésta y durante la posterior evolución del deterioro. La valoración de resultados individuales, sin embargo, resulta de difícil interpretación, aunque pueden utilizarse las recogidas en tratados generales ⁽⁹⁾.

Módulo de elasticidad: Al principio de la reacción, la resistencia a compresión del hormigón apenas se ve afectada, pero sí disminuye mucho el módulo de elasticidad, por lo que puede emplearse para una detección temprana de la reacción álcali-sílice.

Resistencia a compresión: Aunque la resistencia a compresión del hormigón es una propiedad que tarda mucho en verse afectada al desarrollarse fenómenos de reactividad álcali-sílice. Sin embargo, su determinación siempre es recomendable para dar una idea del nivel de seguridad estructural que mantiene la estructura.

Aplicación al caso en estudio: La Tabla 2 muestra los resultados de los ensayos mecánicos realizados sobre testigos de 10,5 cm de diámetro.

PROBETA	DENSIDAD (kg/m ³)	VELOCIDAD (m/s)	RESISTENCIA (N/mm ²)	MÓDULO (N/mm ²)	MÓDULO CALCULADO
3	2.270	3.830	26,1	-	
4	2.340	4.290	42,2	27.124	29.593
5	2.340	4.490	36,2	26.230	28.118

Tabla 2: Resultados de los ensayos mecánicos del hormigón

Los tres testigos presentan una velocidad de ultrasonidos que permitiría calificar al hormigón como bueno. Sin embargo, si se calcula el módulo de elasticidad a partir de las resistencias a compresión obtenidas, siguiendo el modelo recogido en la Instrucción española EHE: $E = 8500 * \sqrt[3]{f_c}$, se obtienen los resultados de la última columna de la tabla anterior. Se observa que los módulos de elasticidad determinados con el ensayo son un 10% inferiores a los valores calculados teóricamente.

6. DETERMINACIÓN DE LAS CAUSAS

Difracción de rayos X: Esta técnica es útil para determinar qué compuestos cristalinos potencialmente reactivos están presentes en la muestra: ópalo, calcedonia, tridimita o cristobalita. El inconveniente radica en que los componentes reactivos pueden encontrarse en el árido en cantidades muy reducidas, y por tanto encontrarse por debajo del nivel de detección de la técnica. Así, para el caso práctico estudiado, la difracción realizada no detectó la tridimita en la muestra total del árido, indicando que se trataba de cuarzo puro.

Examen petrográfico de los áridos: La muestra de partida son los testigos de hormigón extraídos, de los cuales puede separarse el árido grueso limpio mediante técnicas adecuadas⁽¹⁰⁾. Debido a la presencia habitualmente minoritaria de los compuestos reactivos, debe seleccionarse una muestra amplia y representativa. Se recomienda seguir el procedimiento descrito por ASTM C 295, complementado con las recomendaciones del RILEM TC 106-1⁽¹¹⁾.

Los tipos de roca se pueden clasificar de acuerdo con la ASTM C 294. Los constituyentes reactivos deben ser descritos cualitativamente y, en la medida de lo posible, cuantitativamente. El informe debe indicar expresamente el tamaño de grano del cuarzo presente. En el caso de que éste presente el fenómeno de extinción ondulante, debe medirse el ángulo de dicha extinción pudiéndose seguir el método de Dolar-Mantuani⁽¹²⁾. Un árido fino o grueso puede ser clasificado como “potencialmente reactivo” utilizando los criterios del U.S. Army Corp of Engineers⁽¹³⁾.

Para el caso de la obra objeto del estudio, el análisis inicial sobre partículas de grava extraídas del hormigón indicó que se trataba de una cuarcita, con un 98% de

cuarzo con tamaño de grano 0,2 mm. Más del 50% del cuarzo presentaba extinción ondulante con un ángulo medio de 20°.

El estudio petrográfico detallado del árido siguiendo la metodología RILEM detectó la presencia de otros componentes reactivos :

Cuarzo microcristalino (21%) (Fig.11)

Cuarzo criptocristalino (2%) (Fig.12)

Estos componentes, altamente reactivos y en cantidad superior a los límites admisibles, se atribuyen como causantes de la patología desarrollada.



Fig.11: Cuarzo microcristalino

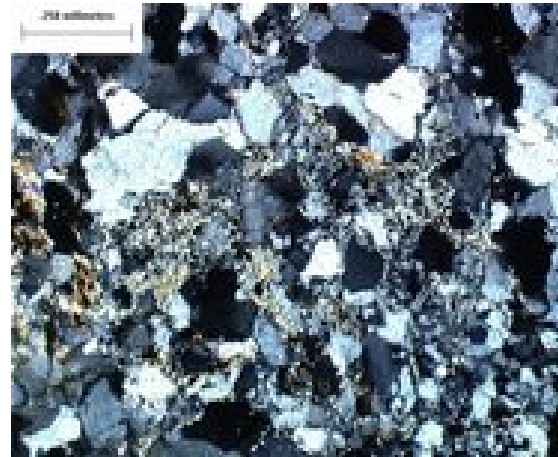


Fig.12: Cuarzo criptocristalino

7. CONCLUSIONES FINALES

La presente ponencia describe una metodología general para la detección y cuantificación de la patología de reacción álcali-sílice, aplicada a un caso real de una estructura hidráulica. Los pasos seguidos han sido los siguientes:

- La inspección visual tanto de la estructura afectada como de los testigos extraídos establece indicios de que el origen de la patología pudiera ser álcali-sílice.
- La microscopía electrónica, complementada con el EDX constata la presencia de productos expansivos de este tipo de reacción. Simultáneamente se detecta la presencia de etringita, que apuntaría un posible ataque por sulfatos simultáneo.
- Los ensayos químicos confirman un elevado contenido de álcalis en el interior del hormigón, aún disponibles para proseguir la reacción.
- Los ensayos químicos concluyen que el contenido de sulfatos solubles presentes en el hormigón son compatibles con el contenido de regulador de fraguado por la dosificación de cemento empleada, lo cual indica que la etringita detectada parece proceder únicamente de esta fuente.
- El examen petrográfico de los áridos extraídos de los testigos señala que el árido mayoritariamente es una cuarcita, aunque presenta el cuarzo con el fenómeno de extinción ondulante. Adicionalmente, existe un porcentaje suficientemente elevado de cuarzo criptocristalino y cuarzo microcristalino, componentes altamente reactivos causantes de la reacción producida con los álcalis del cemento.

- Los ensayos mecánicos del hormigón indican que la resistencia no se ha visto aún afectada, pero el módulo de elasticidad está un 10% por debajo del que sería esperable.
- Como conclusión final la estructura se encuentra afectada por una reacción álcali-sílice, originada por la presencia de tridimita en el árido utilizado, y un cemento con elevado contenido de álcalis, que aún permanecen en el hormigón por lo que es previsible que la reacción aún prosiga.

8. AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Dirección General del Agua del Ministerio de Medio Ambiente la ayuda prestada para el desarrollo de esta investigación.

Se agradece a Jesús Soriano y Miguel Ángel García Calleja de la División de Mineralogía y Petrología, y a Víctor Lanza de la División de Durabilidad de Hormigones del Laboratorio Central del CEDEX el soporte para la realización de los estudios petrográficos, análisis por MEB y ensayos químicos.

9. REFERENCIAS

- 1.- Acres International (2005). Disponible en <http://www.acres.com/AcresGroup/Services/ServHydroAAR/indcnts.htm> (Consulta en marzo de 2005).
- 2.- Alaejos, P. y Bermúdez, M.A. (2003) "Durabilidad y procesos de degradación del hormigón de presas". *Monografía M-76*. Madrid: Ed. CEDEX.
- 3.- Louarn, N. y Larive, C. (1993). "Alcali-réaction et réaction sulfatique: synthèse des études microscopiques d'expertises de ponts dégradés". *Bull. Liaison Ponts et Chaussées*, 184, mars-avr., 57-69.
- 4.- Jones, T.N. (1988) "A new interpretation of alkali-silica reaction and expansion mechanisms in concrete". *Chemistry and Industry*, 18, jan., 40-44.
- 5.- Concrete Society (1999) "Alkali-silica reaction. Minimising the risk to concrete. Guidance notes and model specification clauses". *Technical Report n° 30*. Berkshire, UK: Ed. The Concrete Society.
- 6.- AENOR (1991). "Métodos de ensayo de cementos. Determinación del contenido de cloruros, dióxido de carbono y alcalinos en los cementos". *NORMA UNE 80-217-91*. Madrid: Ed. AENOR.
- 7.- Berubé, M., Duchesne, J., Dorion, J.F. y Rivest, M. (2002) "Laboratory assessment of alkali contribution by aggregates to concrete and application to concrete structures affected by alkali silica reactivity". *Cement and Concrete Research* (www.sciencedirect.com) (artículo sin corregir).
- 8.- Soriano, J. (1987). "Reactions d'interaction entre certains granulats et la phase interstitielle du beton". *Pore Structure and Materials Properties*. Chapman and Hall, London, 378 pp
- 9.- Fernández Cánovas, M. (1989). "Hormigón". Madrid: *E.T.S. Ingenieros de Caminos*.
- 10.- Barra, M. (1996). "Estudio de la durabilidad del hormigón de árido reciclado en su aplicación como hormigón estructural". *Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña*.

11.- Sims, I. y Nixon, P. (2003) "RILEM Recommended Test Method AAR-1: Detection of potential alkali-reactivity of aggregates – Petrographic method". *Materials and Structures*, Vol. 36, N° 261, August-September, 480-496.

12.- Graham West. (1996) "Alkali-aggregate reaction in concrete roads and bridges". *Ed. Thomas Telford Publications*.

13.- US Army Corps of Engineers. (2001) "Engineering and Design – Standard Practice for Concrete for Civil Works Structures. Appendix D and E". *Publication Number: EM 1110-2-2000*. Ed: US Army Corps of Engineers.