

Estudio del hormigón de una presa afectada por una reacción álcali-árido

SORIANO, J. (*), ALAEJOS, P. (*), BERMÚDEZ, M. A. (*), GARCÍA CALLEJA, M. A. (*) y LANZA, V. (*)

RESUMEN Se ha realizado el estudio del hormigón de una presa. La degradación de dicho hormigón se produce como consecuencia de la reacción entre la pasta de cemento y los áridos. La reacción álcali-árido provoca la neoformación de etringita, ceolitas y geles expansivos..

DETERIORATION OF CONCRETE DAM DUE TO ALKALI-AGGREGATE REACTION

ABSTRACT *At a dam in Spain the concrete shows a widespread reaction that has caused surface cracking. The cement-aggregate reaction has produced crystallization of zeolite A- like material in the addition to the precipitation of alkali-silicate gel and ettringite.*

Palabras clave: Reacción álcali-árido, Ataque por sulfatos, Pirita.

1. INTRODUCCIÓN

Se ha realizado el estudio del hormigón de una presa que se terminó de construir en 1955. Se trata de una presa de contrafuertes con estribos de gravedad, alineados en planta según una línea recta. La presa está situada sobre rocas graníticas hercínicas. Son granodioritas, de grano medio a grueso con megacristales de feldespato potásico dispersos y frecuentes agregados microgranulares. Sus minerales principales son cuarzo, feldespato potásico, plagioclasa y biotita. Como accesorios, anfíbol, apatito, circón y opacos. Entre los minerales secundarios se encuentran, entre otros, sericita, clorita, esfena, opacos y rutilo.

El cemento utilizado en la construcción de la presa fue un cemento pórtland, del que no se tiene ningún dato sobre su composición química y mineralógica.

Con respecto a los áridos, la grava y la gravilla se obtuvieron por machaqueo de la piedra "granítica" de una cantera situada un kilómetro aguas arriba de la presa. La arena utilizada procedía en parte del río y en parte de la obtenida por machaqueo de la grava.

Con respecto a la inspección visual de la presa, hay que señalar que en coronación no se observan fisuras ni patologías significativas. La barandilla no se encuentra desalineada en planta ni alzado.

En el paramento aguas abajo, dos contrafuertes se encuentran más fisurados, aunque casi todos presentan cierta fisuración en mapa, normalmente asociada a tongadas diferentes. En estos dos contrafuertes, esta fisuración viene acompañada de abundantes filtraciones y eflorescencias, y se prolonga hasta la pantalla de hormigón. Todas las fisuras son de anchura pequeña.

Este trabajo pretende contribuir al conocimiento de las reacciones de interacción entre los áridos y los componentes de la fase intersticial del hormigón.

2. MÉTODOS EXPERIMENTALES

El examen visual de los testigos se ha realizado tanto para seleccionar las muestras que debían ser estudiadas mediante microscopía electrónica de barrido, como para determinar posibles indicios de reacción álcali-árido. Las muestras fueron humedecidas antes de su examen visual con objeto de detectar la presencia de geles, ya que estos se manifiestan por manchas de humedad durante el periodo de secado.

Para determinar las características mecánicas del hormigón se han empleado los siguientes ensayos: determinación del módulo de elasticidad en compresión (norma UNE 83316:1996); rotura por compresión (norma UNE 83-304-84); rotura por tracción indirecta (Ensayo Brasileño, norma UNE 83-306-85).

Con objeto de poder realizar el estudio petrográfico y los ensayos químicos de los áridos presentes en el hormigón, se hizo necesario realizar una separación del mortero adherido de los áridos. Esta separación se ha llevado a cabo de acuerdo con el método propuesto por Barra (1.996).

La clasificación petrográfica de los áridos estudiados se ha realizado de acuerdo con lo establecido en el anexo A en la norma UNE-EN 932-3 (Ensayos para determinar las propiedades generales de los áridos. Parte 3: Procedimiento y terminología para la descripción petrográfica simplificada). El microscopio utilizado ha sido un microscopio de la firma Leica modelo DMRX, equipado con un sistema automático de fotografía.

El estudio de la superficie de fractura de los testigos del hormigón se ha realizado mediante el empleo de un microscopio electrónico de barrido ZEISS, modelo DSM 942, equipado con un espectrómetro de dispersión de energía de rayos X LINK, modelo Pentafet y un detector de electrones retrodispersados Oxford, modelo Tetra Link.

(*) Sector de Ciencia de Materiales. Laboratorio Central de Estructuras y Materiales (CEDEX-Ministerio de Fomento).

ESTUDIO DEL HORMIGÓN DE UNA PRESA AFECTADA POR UNA REACCIÓN ÁLCALI-ÁRIDO



FIGURA 1. Contorno de diferente color alrededor del árido.



FIGURA 2. Depósitos blancos.

El estudio de la reactividad potencial de los áridos se ha efectuado mediante los métodos de valoración por proporciones mineralógicas (Soriano, 1987) y de reactividad en superficie (Soriano y García Calleja, 1989).

El primero de los métodos utilizados, permite observar las variaciones que experimenta la mineralogía del árido después de ser sometido a la acción de las disoluciones de ataque (disolución saturada de hidróxido cálcico) a temperatura ambiente. El estudio de la citada variación mineralógica se realiza mediante el empleo de difracción de rayos X. Para el estudio de las muestras por difracción de rayos X se ha utilizado un difractómetro Siemens D-5000, radiación $Cu K\alpha$ y monocromador de grafito.

El segundo de estos métodos, complementario del anterior, y denominado método por valoración de la reactividad en superficie, está basado en el estudio de fragmentos de áridos que fueron atacados en superficie, observando, mediante microscopía electrónica de barrido la misma superficie antes y después del ataque.

Después de determinar la reactividad potencial de los áridos, se han estudiado los "líquidos de ataque" mediante espectrofotometría de absorción atómica. El equipo utilizado ha sido un Perkin Elmer, modelo AANALYST 100, utilizándose la técnica de llama.

Los métodos anteriormente citados permiten, por otra parte, examinar tanto la variación en la composición química de los líquidos de ataque, como el residuo sólido obtenido por evaporación hasta sequedad de los citados líquidos de ataque.

La determinación de los compuestos totales de azufre se realizó de acuerdo con la norma UNE EN 1744-1:1999. El contenido de sulfatos solubles en ácido se determinó de acuerdo con la norma UNE EN 1744-1:1999. El contenido de sílice soluble se ha determinado siguiendo la norma ASTM C 289.

Los ensayos químicos se han realizado en áridos extraídos del hormigón y en muestras de hormigón.

3. RESULTADOS EXPERIMENTALES

3.1. INSPECCIÓN VISUAL

El árido grueso era granítico de machaqueo; su tamaño era bastante grande (mayor de 40 mm), aunque apenas se observaban síntomas externos de alteración. Sólo en unos pocos se detectaba un contorno de diferente color a su alrededor (figura 1). En la pasta de cemento sí se observaban con más frecuencia depósitos blanquecinos (figura 2). Una vez humedecidos, en algunos puntos de los testigos permanecían más tiempo manchas de humedad.

3.2. ENSAYOS MECÁNICOS

Los resultados de los ensayos mecánicos se adjuntan en la tabla 1.

3.3. ESTUDIO PETROGRÁFICO

El árido procedente de la cantera es una granodiorita. Más del 50% de los cristales de cuarzo presentan extinción ondulante, con un ángulo medio de extinción de 30° . Igualmente, los áridos procedentes de los testigos de hormigón estudiados son granodioritas en las que más del 50% de los cristales de cuarzo presentan extinción ondulante, con un ángulo medio de extinción de 33° . En todas las muestras estudiadas se observó la presencia de opacos.

Aunque son pocos los trabajos referentes a la aparición de sulfuros primarios en rocas "graníticas" (Pantó 1975; Speer, 1987; Whalen y Chapell, 1988), se procedió a realizar un estudio en lámina pulida con objeto de detectar, entre los opacos, la posible presencia de piritita, pirrotina y calcopiritita.

Muestra	Resistencia a compresión (N/mm ²)	Resistencia a tracción (N/mm ²)	Módulo de elasticidad (N/mm ²)
Testigo 1	25,7	5,2	-
Testigo 2	-	4,0	30.889

TABLA 1. Ensayos mecánicos.

ESTUDIO DEL HORMIGÓN DE UNA PRESA AFECTADA POR UNA REACCIÓN ÁLCALI-ÁRIDO

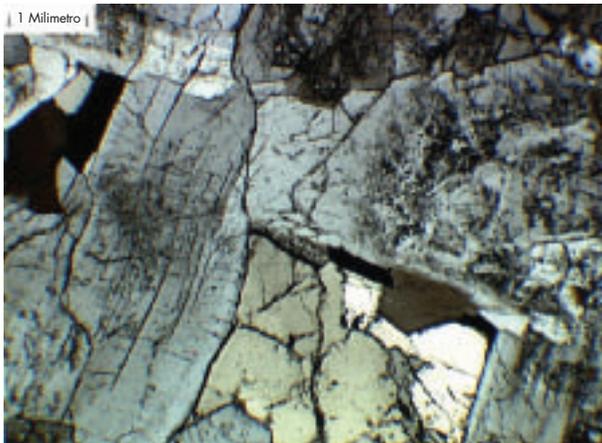


FIGURA 3. Opacos en granodiorita. LP

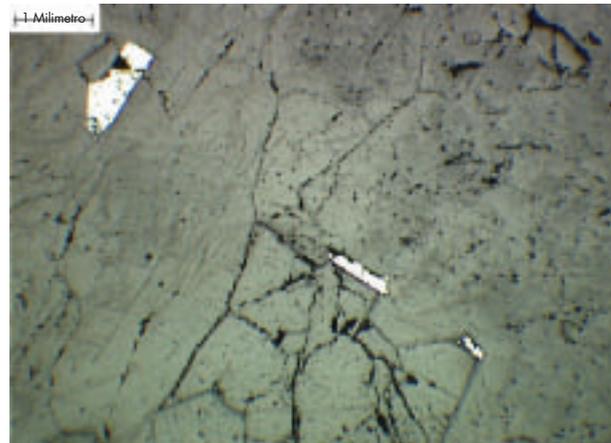


FIGURA 4. Pirrotina. LRP.



FIGURA 5. Lámina pulida observada por MEB.



FIGURA 6. Mapa de rayos X de la distribución de S.

En la figura 3 pueden observarse los opacos con luz transmitida polarizada (LP). El estudio mediante luz reflejada polarizada (LRP) muestra que los opacos son cristales de pirrotina (figura 4).

La figura 5 muestra el aspecto de los cristales de pirrotina anteriores al ser observados mediante microscopía electrónica de barrido. En la figura 6 se muestra el mapa de rayos X de la distribución de S.

3.4. ESTUDIO DE LA SUPERFICIE DE FRACTURA DE LOS TESTIGOS DE HORMIGÓN

En los testigos de hormigón estudiados se han detectado fases minerales que son el resultado de reacciones de interacción entre los áridos y los componentes de la fase intersticial del hormigón. Así, se han observado ceolitas cálcicas (figura 7), geles de la reacción álcali-árido y la presencia de etringita.

Las fases minerales producidas como consecuencia de la reacción álcali-árido, aparecen como geles lisos (figura 8), geles rugosos (figura 9), como agregados botroidales (figura 10), con disposición en "panal de abeja" (figura 11), y como cristales en forma de pétalos (figura 12).

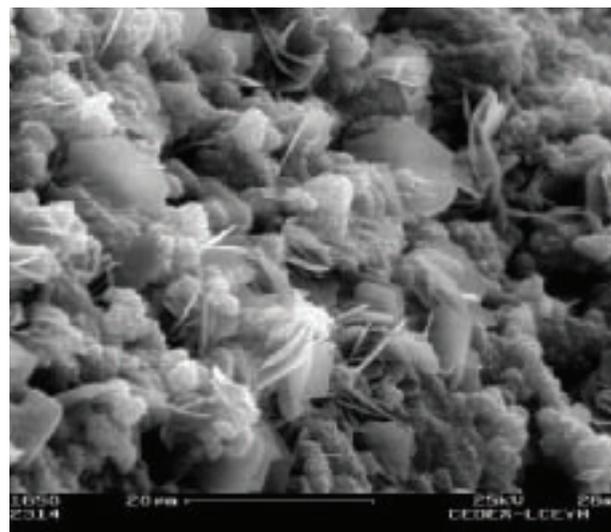


FIGURA 7. Ceolitas cálcicas de tipo A.

ESTUDIO DEL HORMIGÓN DE UNA PRESA AFECTADA POR UNA REACCIÓN ÁLCALI-ÁRIDO

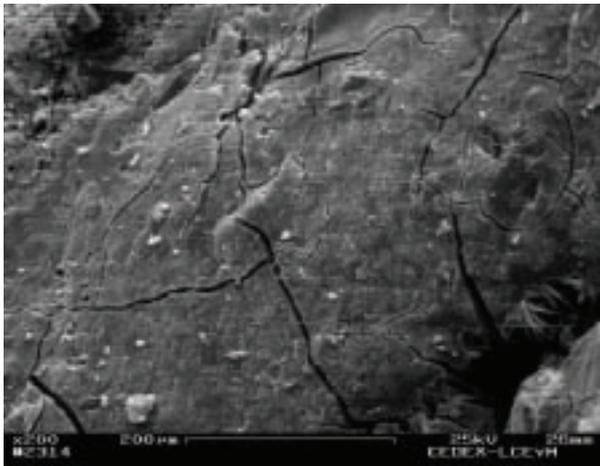


FIGURA 8. Geles lisos.

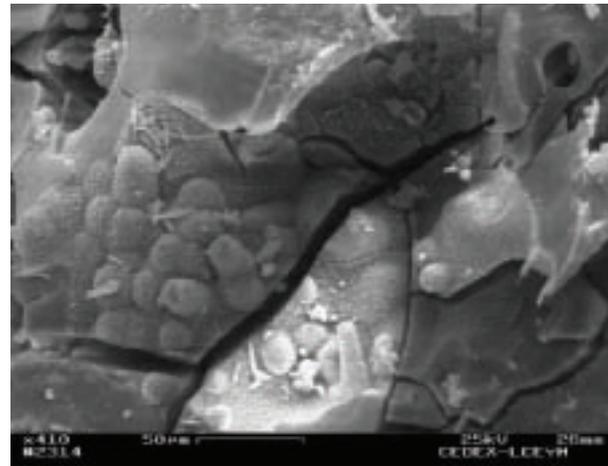


FIGURA 9. Geles rugosos.

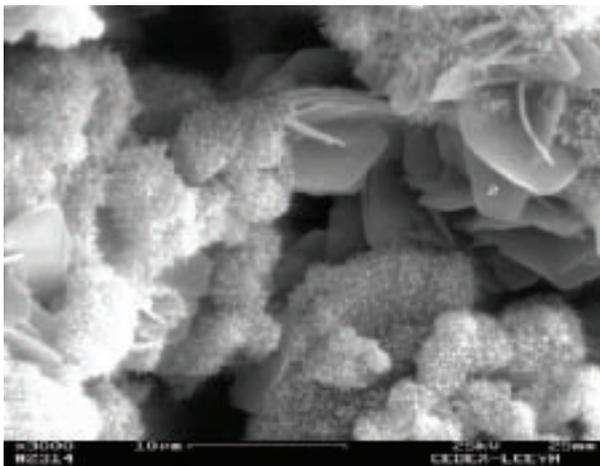


FIGURA 10. Agregados botroidales y ceolitas (2).

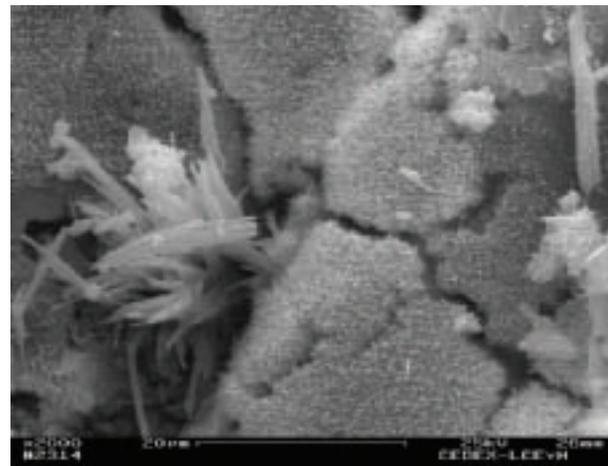


FIGURA 11. Agregados en panal de abeja y etringita (2).



FIGURA 12. Cristales en pétalo de rosa.

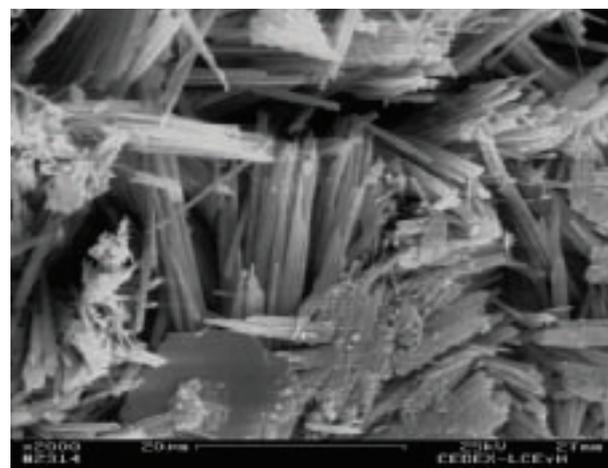


FIGURA 13. Etringita.

La figura 13, muestran, igualmente, cristales de etringita generando presiones disruptivas.

En la figura 14 puede observarse una etringita secundaria generando presiones disruptivas.

ESTUDIO DEL HORMIGÓN DE UNA PRESA AFECTADA POR UNA REACCIÓN ÁLCALI-ÁRIDO

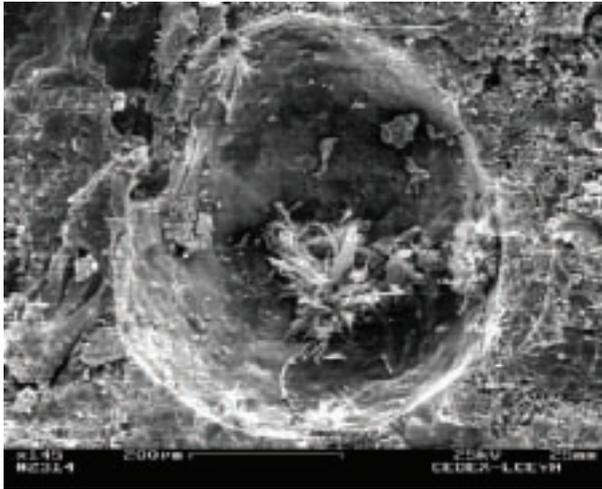


FIGURA 14. Etringita de carácter secundario.

MUESTRA	Cuarzo (%)	Feldespatos (%)
Natural	20	55
Tratada con solución saturada hidróxido cálcico a temperatura ambiente	30	45
Tratada con solución saturada hidróxido cálcico a 60°C	40	35

TABLA 2. Variación de las proporciones mineralógicas.

3.5. REACTIVIDAD POTENCIAL

Los resultados obtenidos por el ensayo de variación de las proporciones mineralógicas tanto a temperatura ambiente, como a 60°C, aparecen reflejados en las tablas adjuntas.

En la tabla 3 se indican los resultados obtenidos en el estudio, mediante espectrofotometría de absorción atómica, de los líquidos de ataque (solución saturada de hidróxido cálcico), tanto a temperatura ambiente como a 60°C.

En las figuras 15 y 16 se muestra el residuo seco obtenido por evaporación de los líquidos de ataque. En la figura 15 se observan geles silicocalcoalcalinos y en la figura 16 se observa un cristal de yeso.

Concentración	Temperatura ambiente	ΔT 60°C
[Na] ppm	83	182
[K] ppm	243	363

TABLA 3. Composición de los líquidos de ataque

3.6. ENSAYOS QUÍMICOS

En la tabla 4 se muestran los resultados de los ensayos químicos realizados tanto sobre los áridos procedentes de testigos de hormigón, como del propio hormigón:

El contenido de sílice soluble en una muestra de árido 1 es de 19,47 mmol/l y en la de árido 2 es de 18,58 mmol/l.

Muestra	Contenido total de azufre (% S)	Contenido sulfatos solubles en ácido (% SO ₃)
Árido 1	0,121	0,119
Árido 2	0,080	0,097
Hormigón 1	-	0,380
Hormigón 2	-	0,400

TABLA 4. Análisis químicos.

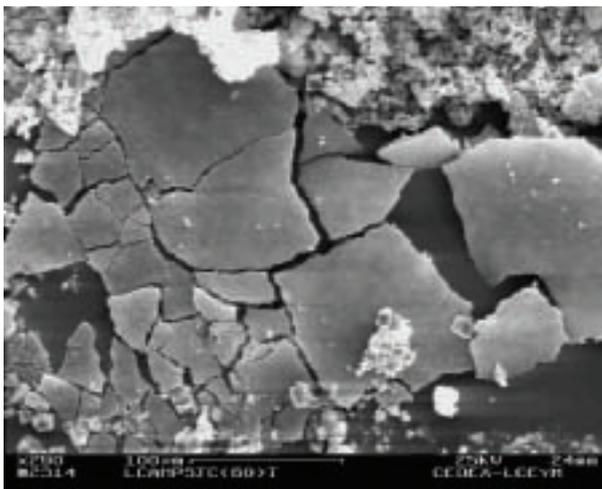


FIGURA 15. Residuo seco por evaporación. Geles silico-alcalinos.

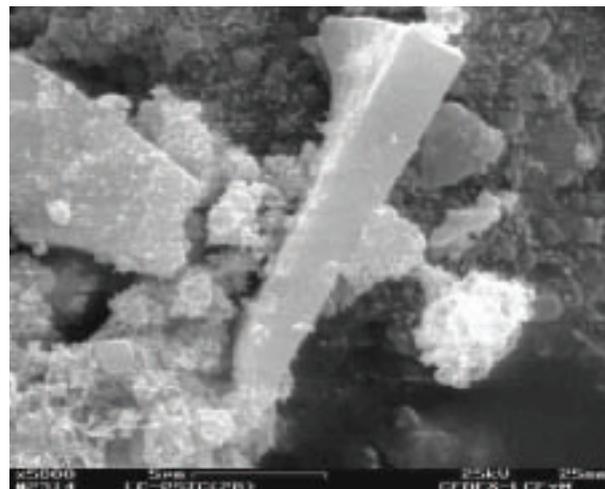


FIGURA 16. Residuo seco por evaporación. Yeso.

4. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Los áridos utilizados en la fabricación del hormigón son granodioritas en las que más del 50 % del cuarzo presenta extinción ondulante, con un ángulo medio de extinción de 30° por lo que puede ser considerado un árido reactivo (U.S. Army Corps of Engineers, 2001).

Los resultados de los ensayos de reactividad potencial ponen de manifiesto que los áridos procedentes de la cantera que se utilizó en la fabricación del hormigón de la presa son susceptibles de reaccionar con los componentes de la fase intersticial del hormigón.

La observación de la textura de los áridos procedentes de la cantera antes y después de ser sometidos a la acción de una solución saturada de hidróxido cálcico, denota la existencia de este tipo de interacción.

Por otra parte, el estudio del residuo sólido obtenido por evaporación de los líquidos de ataque, muestra la formación de las mismas fases minerales (ceolitas y geles de la reacción álcali-sílice) que han sido observadas en el seno del hormigón de la presa en estudio.

El árido grueso podría aportar álcalis a la fase intersticial del hormigón. Así, de los resultados del ensayo de estabilidad de los áridos frente a una disolución de hidróxido cálcico, se deduce que la cantidad de álcalis liberados equivale a 8,77 kg de $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}/\text{m}^3$ de hormigón.

No se dispone de datos sobre el contenido de álcalis del cemento, aditivos ni agua de amasado. Tampoco de la dosificación del hormigón. Sin embargo, incluso aunque el cemento utilizado hubiera sido de bajo contenido de álcalis, la cantidad global dentro del hormigón estaría por encima del límite recomendado de 3 kg/m³.

Los sulfatos solubles que tiene el hormigón (0,38 y 0,40%) son normales para las dosificaciones de cemento habitualmente utilizadas en hormigón de presas, lo cual parece indicar que no hay un volumen alto de etringita. El contenido de azufre de los áridos (0,12 y 0,08%) no es muy elevado (el límite que marca la Instrucción EHE es del 1%, expresado como SO_3), salvo que se encuentre en forma de sulfuro oxidable.

La norma europea establece que, en caso de existir pirrotina, el contenido de azufre en el árido deberá ser inferior al 0,1%. En nuestro caso, el contenido de azufre es del 0,121%, pero si se le resta la parte correspondiente al azufre en forma

de sulfatos solubles (0,048%), nos queda un contenido de azufre del 0,073%, inferior al establecido en la norma europea, pero que justificaría la etringita presente en los testigos.

La presencia de etringita suele estar asociada a la reacción álcali-sílice, ya que ésta reduce el pH, lo que favorece la recristalización de la etringita primaria del hormigón.

A partir de los resultados de la determinación del módulo de elasticidad, de la resistencia a tracción y de la resistencia a compresión, no parece haberse producido aún una degradación significativa de las características del hormigón.

5. REFERENCIAS

- Alaejos, M. P.; Bermúdez, M. A. (2003). *Durabilidad y procesos de degradación del hormigón de presas. Estudio Bibliográfico*. Monografía M-76. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas. Madrid. 168 pp.
- Barra, M. (1996). *Estudio de la durabilidad del hormigón de árido reciclado en su aplicación como hormigón armado*. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona. 223 pp.
- Pantó, G. (1975). *Trace minerals of the granitic rocks of the Velence and Mecsek Mountains*. Acta Geol. Acad. Sci. Hungaricae, 19, 59-93.
- Soriano, J. (1987). *Reactions d'interaction entre certains granulats et la phase interstitielle du beton*. In Pore Structure and Materials Properties. Chapman & Hall Ed., London, 25-32.
- Soriano, J.; García Calleja, M.A. (1989). *Áridos reactivos. Acción del hidróxido cálcico sobre áridos silicatados*. III Congreso Geoquímica España, 1, 9-15.
- Speer, A. (1987). *Evolution of magmatic AFM mineral assemblages in granitoid rocks. The hornblende + melt = biotite reaction in the Liberty Hill plutón. South Carolina*. Amer. Mineral., 87, 863-878.
- U. S. Arms 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.
- Whalen, J.B.; Chapell, B.W. (1988). *Opaque mineralogy and mafic mineral chemistry of I- and S- granites of the Lachlan Fold Belt, southeast Australia*. Amer. Mineral, 73, 281-296.