

Aridos reactivos^(*)

Por JESUS SORIANO CARRILLO
y LUIS RIESGO PEREZ

Laboratorio Central de Estructuras y Materiales
M.O.P.U.

Se describen los diferentes mecanismos de reacción entre determinados tipos de áridos con los álcalis, el hidróxido cálcico y el agua considerados como componentes de la fase intersticial del hormigón.

Se discuten algunos de los métodos utilizados para establecer la reactividad potencial de un árido.

I. INTRODUCCION

Como es sabido, fue STANTON (1) el primer autor que atribuyó los desperfectos aparecidos en una prensa de California a la interacción entre los áridos y los álcalis del cemento denominándose a este fenómeno como reacción álcali-árido.

Posteriormente, AARDT y VISSER (2) han puesto de manifiesto que muchos de los deterioros aparecidos en estructuras de hormigón podrían deberse a la neoformación de hidrogranates como consecuencia de una reacción entre los feldespatos y las arcillas presentes en algunos áridos y soluciones de hidróxido cálcico en el seno del hormigón.

Por otra parte, SORIANO (3) ha puesto de manifiesto importantes variaciones en la cinética de texturación del cemento cuando se le adicionan como «finos» minerales de arcilla.

De todo lo anterior puede deducirse que en realidad no debe de hablarse de un solo tipo de reacción entre los áridos y el cemento, sino que parece más correcto referirse a la existencia de áridos potencialmente reactivos frente a cualquiera de los componentes de la fase intersticial del hormigón.

En el presente trabajo, tratamos de contribuir a un mejor conocimiento de las interacciones existentes entre los diferentes tipos de áridos y el hormigón endurecido.

(*) Se admiten comentarios sobre el presente artículo, que podrán remitirse a la Redacción de esta Revista hasta el 28 de febrero de 1985.

II. REACCION ALCALI-ARIDO

Como ya hemos indicado, fue STANTON (1) el primer autor que se refirió a la existencia de una reacción entre los álcalis del cemento y áridos de naturaleza silícea.

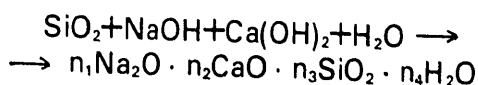
Posteriormente HADLEY (4) observó una reacción de características expansivas, similar a la descrita por STANTON (1), entre los álcalis del cemento y áridos de naturaleza dolomítica.

De acuerdo con lo anterior, y para una mejor comprensión del problema, nos referimos por separado a cada una de las reacciones anteriores.

Con respecto a la primera de estas reacciones, ciertas rocas de naturaleza silícea reaccionan con los álcalis del cemento dando lugar a la formación de geles de sílice que, generalmente, tienen una acción osmótica, en presencia de agua, y que por absorción de ésta aumentan de volumen y provocan importantes presiones disruptivas.

Los minerales y rocas susceptibles de provocar este fenómeno son los minerales opalinos, ciertas rocas volcánicas con un contenido medio o alto de sílice (andesitas y riolitas), algunas pizarras y filitas, con elevado contenido en hidromicas y zeolitas del tipo heulandita.

El esquema general del proceso ha sido establecido por PLUM y cols. (5) de acuerdo con la siguiente reacción:



Con respecto a la reacción anterior, hay que indicar que el NaOH representa, según la práctica general, al Na_2O equivalente ($\text{Na}_2\text{O} + 0,66 \text{ K}_2\text{O}$) y que el gel formado será o no de carácter expansivo según sea el contenido en CaO .

De acuerdo con DENT GLASSER y KATAOKA (6), la sílice de las rocas y minerales susceptibles de ser áridos reactivos, interacciona con la sosa, produciendo, en primer lugar, una reacción ácido-base entre los grupos silanol

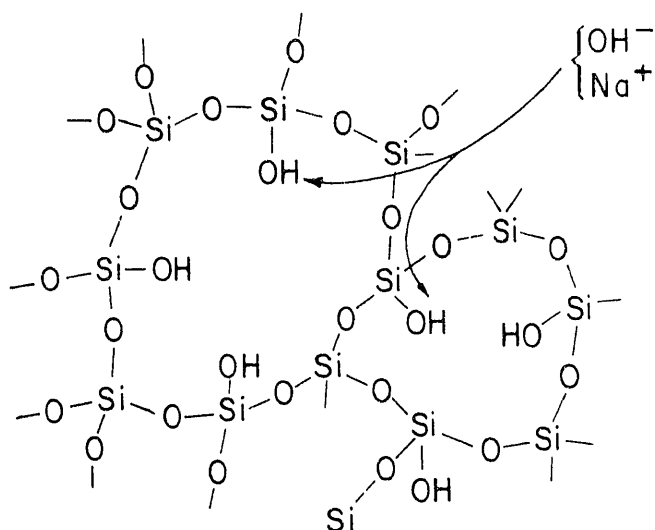


Figura 1.—Neutralización por NaOH de grupos silanol ácidos: $\text{Si}-\text{OH} + \text{OH}^- \rightarrow \text{Si}-\text{O}^- + \text{H}_2\text{O}$ (según Dent Glasser y Kataoka, 1981).

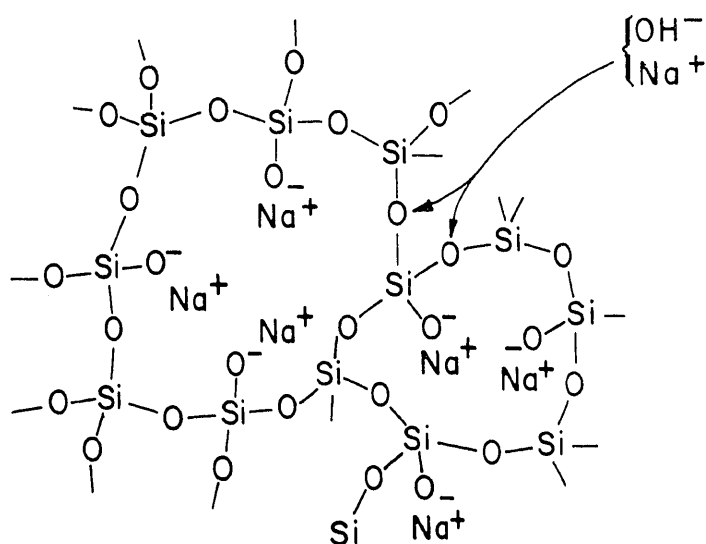
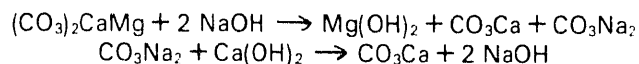


Figura 2.—Ruptura por NaOH de puentes siloxanos: $\text{Si}-\text{O}-\text{Si} + 2\text{OH}^- \rightarrow \text{Si}-\text{O}^- + ^-\text{O}-\text{Si} + \text{H}_2\text{O}$ (según Dent Glasser y Kataoka, 1981).

$\text{Si}-\text{OH}$ y los iones OH^- de la solución alcalina después de la neutralización por un ión Na^+ de la carga negativa formada (fig. 1). Posteriormente se produce una segunda reacción consistente en un ataque de puentes siloxanos por iones OH^- (fig. 2), reacción que entraña una desintegración de la estructura y el paso de la sílice a SiO_4H_2^- .

Hay que señalar que ambas reacciones se producen casi simultáneamente, dando lugar a la formación de un gel de silicato sódico de fuerte carácter expansivo.

En el caso de los áridos de naturaleza dolomítica, la dedolomitización de dichos áridos, por reacción con disoluciones alcalinas, produce la neoformación de brucita, $\text{Mg}(\text{OH})_2$ y una regeneración de hidróxido alcalino, lo que puede dar continuidad al proceso, de acuerdo con las siguiente reacciones (7):



La brucita (fig. 3) puede aparecer bien en la zona de contacto entre el árido y la pasta, bien en el mismo árido, pudiendo reaccionar con la sílice alrededor del árido y formar un silicato de magnesio.

Por otra parte, hay que indicar que la zona porosa que se crea alrededor del árido, por extracción de iones Mg^{2+} debilita la unión árido-pasta, sin que el proceso de dedolomitización provoque, en ningún caso, la aparición de geles expansivos.



Figura 3.—M.E.B. Cristales de brucita en la zona de contacto entre el árido y la pasta.

Ahora bien, la naturaleza mineralógica y/o petrológica de los áridos no es el único factor a considerar en el caso de la degradación de una estructura de hormigón como consecuencia de la reacción álcali-árido. Así, otros factores de gran importancia son el contenido en álcalis de la fase intersticial del hormigón, la presencia de humedad, el tiempo y la temperatura.

Con respecto al primero de estos factores, contenido en álcalis de la fase intersticial del hormigón, hay que señalar que deben de ser estos los álcalis considerados y no únicamente, como se suele hacer con bastante frecuencia, los álcalis del cemento, ya que los álcalis presentes en la fase intersticial del hormigón, que son los que pueden reaccionar con los áridos, no provienen exclusivamente del cemento sino también de los áridos, de las adiciones, en el caso de cementos de adición, e incluso del agua de amasado, por lo que el límite máximo de álcalis en el cemento, establecido por las diferentes normas internacionales, que, en general, oscila alrededor del 0,6 por 100 de Na_2O equivalente no debe considerarse como excluyente de la posible reacción álcali-árido, por lo que siempre habrá que tener en cuenta otros factores, siendo, a nuestro entender el más importante de los mismos la composición mineralógica de los áridos.

Los valores críticos de humedad relativa que favorecen la reacción álcali-árido se sitúan, para la gran mayoría de los autores, entre el 80 y el 85 por 100. Hay que señalar igualmente que la relación agua/cemento del hormigón puede jugar un papel nada despreciable en el desarrollo de la citada reacción, ya que si la cantidad de agua en el seno del hormigón es suficiente puede producirse la formación de productos expansivos sin necesidad de aporte exterior de humedad.

Como es sabido, la fisuración de un hormigón, por efecto de la reacción álcali-árido, puede aparecer en pocos meses o en varias decenas de años. En realidad, la reacción álcali-árido puede llegar a considerarse como un fenómeno muy lento y prácticamente inofensivo si no existe imbibición de agua por las zonas de contacto entre el árido y la pasta de cemento. Ahora bien, si por cualquier causa, ataque por sulfatos, retracción, etc., se produce la degra-

dación del hormigón y el agua penetra en el seno del mismo, la reacción puede desencadenarse hasta llevar a la total destrucción de la estructura.

Por otra parte, y como es sabido, la temperatura acelera las reacciones químicas, por lo que, en algunos casos, el empleo de cementos de fraguado rápido, de elevado calor de hidratación, puede favorecer la reacción entre los áridos y el cemento.

Considerando los dos factores anteriores, tiempo y temperatura, se han intentado poner a punto una serie de ensayos con el objeto de predecir la reactividad potencial de cualquier tipo de árido. No obstante, hay que señalar que ninguno de estos ensayos satisface plenamente pues es un hecho comprobado por la experiencia que áridos que de acuerdo con dichos ensayos no deberían ser reactivos, en la práctica sí lo han sido, dándose también el caso contrario. Entre todos los métodos propuestos, los más aceptados, por su porcentaje de éxitos, son el método de las barras de mortero, C-227, de ASTM (8), y el método químico, MELC 4.1.1-a (9) o su equivalente C-289, de ASTM (10).

Recientemente, BUSTILLO y cols. (11) han puesto a punto dos nuevos métodos para establecer la reactividad potencial de aquellos áridos en los que uno de sus componentes mineralógicos sean minerales opalinos.

El primero de estos métodos, llamado método por valoración de proporciones mineralógicas, está basado en las variaciones que puede experimentar la mineralogía de la roca después de ser atacada con soluciones de hidróxidos alcalinos a temperatura ambiente. El estudio de la citada variación mineralógica se realiza mediante el empleo de difracción de rayos X.

El segundo de estos métodos, complementario del anterior, denominado método por valoración de la reactividad en superficie, está basado en el estudio de fragmentos de áridos que fueron atacados en superficie con soluciones alcalinas, observando, mediante microscopía electrónica de barrido, la misma superficie, antes y después del ataque (figs. 4 y 5).



Figura 4.—M.E.B. Arido constituido por ópalo C-T.



Figura 5.—M.E.B. Aspecto del árido de la figura número 4 después de ser atacado por soluciones de hidróxidos alcalinos.

III. REACCION HIDROXIDO CALCICO-ARIDO

AARDT y VISSER (2), a partir de los trabajos de ROY y ROY (12), han comprobado que la reacción entre el hidróxido cálcico y determinados tipos de rocas, con arcillas y feldespatos en su composición mineralógica, da lugar a la formación de hidrogranates, silicato de calcio hidratado y álcalis libres.

Posteriormente, estos mismos autores (13) han comprobado que el ataque de feldespatos y arcillas por hidróxido cálcico puede considerarse como una reacción cemento-árido que puede dar lugar a la total destrucción de una estructura de hormigón.

Posteriormente, COLE y cols. (14), examinan-

do una presa construida en Australia hace unos treinta años, comprobaron la existencia de grietas superficiales y, en algunas zonas, importantes cambios dimensionales. Igualmente, observaron que en algunos áridos se había formado sobre su periferia anillos oscuros y en el interior del árido un depósito blanco, apareciendo los poros del hormigón rodeados de una capa transparente y rellenos de un material blanco, semejante al que aparecía en los áridos. Estos autores atribuyeron todos estos fenómenos a la reacción entre el hidróxido cálcico y los áridos utilizados (arcillas y areniscas), lo que dio lugar a la neoformación, en el seno del hormigón, de zeolitas de tipo A, lo que provocó importantes procesos disruptivos.

Posteriormente, WAY y COLE (15) estudiaron el ataque producido en diferentes tipos de rocas, todas ellas con feldespatos en su composición mineralógica, por soluciones de Ca(OH)_2 , estableciendo que los anillos de reacción, observados alrededor de los áridos eran, en general, zeolitas de tipo A, similares a las que ya habían observado en la presa anteriormente mencionada.

Recientemente, en una estructura de hormigón seriamente dañada, hemos podido observar fenómenos similares a los descritos por los autores anteriores (figs. 6 y 7), siendo, en este caso, los áridos utilizados esquistos y pizarras, por lo que a la posible reacción hidróxido cálcico-árido tal vez hayan podido sumarse importantes presiones disruptivas como conse-



Figura 6.—Aridos con anillos de reacción como consecuencia de un ataque por Ca(OH)_2 .



Figura 7.—M.E.B. Zeolitas tipo A.

cuencia de las variaciones de volumen que, por efecto de ciclos de humedad-secado, han podido sufrir los áridos, dado que su forma física (estructura hojosa) permite la circulación de fluidos entre sus planos estructurales.

Al igual que en el caso de la reacción álcali-árido, el tiempo, la temperatura y el grado de humedad también favorecen la reacción entre el hidróxido cálcico y los áridos mediante un mecanismo similar al ya descrito para el caso de la reacción álcali-árido.

IV. REACCION AGUA-ARIDO

La Instrucción para el proyecto y ejecución de obras de hormigón en masa o armado (16) establece un porcentaje máximo de algo que, genéricamente, denomina «áridos finos».

Este término de «árido fino» no hace ninguna referencia a la naturaleza mineralógica de los áridos citados, teniendo, únicamente, un significado granulométrico, ya que, de acuerdo con la citada Instrucción, «árido fino» es el árido o fracción del mismo que pasa por un tamiz de 0,080 mm. de luz de malla (tamiz 0,080 UNE 7050).

Los minerales de arcilla, considerados como «finos» por la Instrucción, reaccionan con el agua de la fase intersticial del hormigón, produciendo importantes modificaciones en su comportamiento.

La interacción agua-mineral de arcilla, dentro del seno del hormigón provoca por un lado

importantes presiones disruptivas, como consecuencia de las variaciones de volumen experimentadas por estos minerales, y por otras grandes variaciones de la cinética de texturación del cemento, como consecuencia de la captación por los minerales de arcilla de parte del agua intersticial, lo que impide un desarrollo normal de las diferentes especies mineralógicas presentes en el hormigón (3).

Como es sabido, muchos minerales de arcilla se caracterizan por poseer una estructura abierta que permite la introducción de moléculas polares en su seno, lo que da lugar a importantes variaciones de volumen, lo que, como es lógico, va a dar lugar a la aparición de importantes presiones disruptivas en el seno del hormigón (fig. 8).

Por otra parte, y de acuerdo con lo anterior, es fácil comprender que la presencia de ciertos minerales de arcilla, restara agua del medio, por lo que la aparición de gel de CSH (II) se verá dificultada a lo largo del proceso de hidratación, lo que, evidentemente, altera la cinética de texturación de la pasta de cemento con el consiguiente deterioro de las características mecánicas del hormigón.

La interacción agua-árido, en el caso de los minerales de arcilla, también tiene una importancia notable en el caso de hormigones sometidos a ciclos de hielo-deshielo.

En este sentido, SORIANO (17) ha comprobado que la «protección por migración», pro-

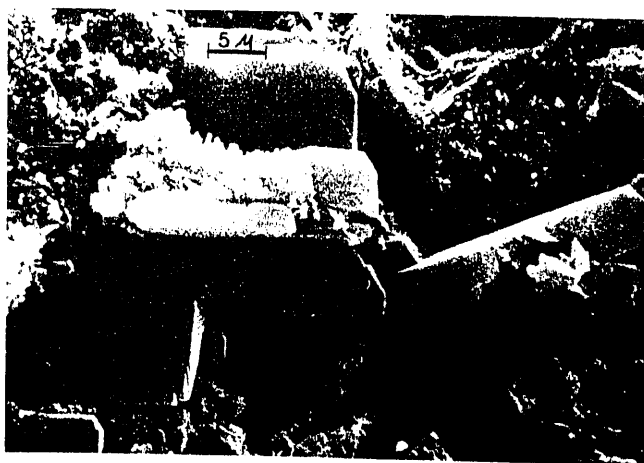


Figura 8.—M.E.B. Acción disruptiva de esmectitas sobre un cristal de portlandita.

puesta por BERTHIER (18) en el caso de un hormigón normal, desaparece cuando se utilizan como «finos» minerales de arcilla, lo que hace peligrar la durabilidad de una estructura de hormigón fabricada con este tipo de «finos».

V. BIBLIOGRAFIA

1. STANTON, T. E.: «Expansion of concrete though reaction between cement and aggregate». Proc. Amer. Soc. Civ. Eng., december 1781-1795. 1940.
2. AARDT, J. H. P., y VISER, S.: «Formation of hydrogarnets: calcium hydroxide attack on clays and feldspars». Cem. Concr. Res., 7, 39-44. 1977.
3. SORIANO, J.: «Influencia de la naturaleza mineralógica de las adiciones en el comportamiento de la pasta endurecida de cemento Portland. II Ensayos de rotura a compresión». Revista de Obras Públicas, agosto 1981.
4. HADLEY, D. W.: «Alkali reactivity of dolomite carbonate rocks». Highway Research Board, 40, 462-469. 1961.
5. PLUM, N. M.; POULSEN, E., e IDORN, G. M.: «Preliminary survey of alkali reaction in concrete». Ingenioren Int. Ed. Danemark, 2, 26-32, 1958.
6. DENT GLASSER, L. S., y KATAOKA, N.: «The Chemistry of alkali aggregate reaction». Cem. Concr. Res., 11, 1-9. 1981.
7. POITEVIN, P., y REGOURD, M.: «Durabilité des betons: cas des granulats reactifs». Annales I.T.B.T.P., 413, 111-143. 1983.
8. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS: «Standard test method for potential alkali reactivity of cement-aggregate combinations (mortar-bar method)». C-227-81. 1981.
9. LABORATORIO CENTRAL DE ENSAYO DE MATERIALES DE CONSTRUCCION: «Ensayo químico para determinar la reactividad de los áridos con los álcalis del cemento». MELC 4.11-a. 1960.
10. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS: «Standard test method for potential reactivity of aggregates (chemical method)». C-289-81. 1981.
11. BUSTILLO, M. A.; SORIANO, J.; BARBA, C., y RIESGO, L.: «Aridos reactivos. Acción de hidróxidos alcalinos sobre minerales opalinos». IV Reunión Científica de la Sociedad Española de Mineralogía. Granada, 1983. En prensa.
12. ROY, D. M., y ROY, R.: «Crystalline solubility and zeolitic behaviour in garnet phases in the system $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$ ». 4th Int. Symp. Chem Cement (Washington), 1, 307-314. 1960.
13. AARDT, J. H. P., y VISSER, S.: «Calcium hydroxide attack on feldspars and clays: possible relevance to cement-aggregate reactions». Cem. Concr. Res., 7, 643-648. 1977.
14. COLE, W. F.; LANCUCKI, C. J., y SANDY, M. J.: «Products formed in an aged concrete». Cem. Concr. Res., 11, 4430454. 1981.
15. WAY, S. J., y COLE, W. F.: «Calcium hydroxide attack on rocks». Cem. Concr. Res., 12, 611-617. 1982.
16. BOLETIN OFICIAL DEL ESTADO: «Instrucción para el proyecto y la ejecución de obras de hormigón en masa o armado». 9, 522-548. 1981.
17. SORIANO, J.: «Influencia de la naturaleza mineralógica de las adiciones en el comportamiento de la pasta endurecida de cemento Portland. I: Acción del hielo». Revista de Obras Públicas. Noviembre 1980.
18. BERTHIER, P.: «Recherches récentes sur le gel des matériaux de construction et leurs conséquences pratiques». Annales I.T.B.T.P., septembre 1960.

