

COMITÉ NACIONAL ESPAÑOL DE GRANDES PRESAS

SOLUCIONES TOTALES O PARCIALES A LOS PROBLEMAS DERIVADOS DE REACCIONES TIPO ALCALI-SILICE EN LOS HORMIGONES DE PRESAS EN EXPLOTACIÓN

Rodrigo del Hoyo¹
José Manuel Alonso²
César Mayoral³
Fernando Martínez⁴
Manuel F. Herrador⁵

RESUMEN: Se analizan los resultados obtenidos de la información facilitada por diversos equipos de auscultación de una presa, así como de varios ensayos sobre probetas, para profundizar en el conocimiento de los factores externos que influyen en la expansión provocada por reacciones del tipo alcali-árido.

A partir de los datos facilitados por los extensómetros correctores existentes en la presa de Belesar se ha intentado valorar la influencia de la temperatura en la expansión.

También se realizaron varios ensayos sobre probetas de hormigón extraídas de esta presa para valorar la influencia de la humedad en el desarrollo del fenómeno expansivo.

¹ Dr. Ingeniero de Caminos. Universidad de A Coruña

² Ingeniero de Caminos. Socoin

³ Ingeniero de Caminos. Socoin

⁴ Dr. Ingeniero de Caminos. Universidad de A Coruña

⁵ Dr. Ingeniero de Caminos. Universidad de A Coruña

1. INTRODUCCIÓN

Las reacciones álcali-sílice se suelen clasificar en dos grupos:

- Reacción álcali-sílice, en la que se produce una reacción que de forma simplificada se puede considerar ácido-base entre la solución alcalina de los poros y la sílice amorfa o reactiva de los áridos.
- Reacción álcali-silicato en la que se produce una reacción entre los silicatos alterados que constituyen los áridos y la solución alcalina. En este tipo de reacciones, el hidróxido cálcico juega un papel importante.

Urhan, en 1987, describe esta reacción como una competición entre la disolución de sílice y la formación de silicato cálcico hidratado (CSH). Si la cinética de la disolución es más lenta que la formación de CSH, que es estable, éste forma una capa sobre el árido y bloquea la reacción. Si la disolución de sílice es más rápida, la reacción no llega a bloquearse, la disolución de sílice continúa y los iones K y Na pueden penetrar en la estructura de la sílice disuelta para neutralizar las cargas negativas. Los iones OH, Ca, Na y K son absorbidos en la superficie hasta alcanzar el equilibrio. La reducción del pH al consumirse los iones hidróxido conduce a la polimerización de la sílice disuelta, lo que produce los geles expansivos.

Chatterji y otros han puesto de manifiesto la gran influencia que tiene en la reacción la presencia de iones Ca. De estudios realizados sobre los productos de la reacción (Laing 1992) se deduce que el calcio se incorpora al gel como Ca(OH)_2 y libera álcalis, los cuales están disponibles para continuar la reacción que se retroalimenta, lo que recalca la importancia de la presencia de Ca(OH)_2 .

2. FACTORES EXTERNOS QUE INFLUYEN EN LA REACCIÓN

En primer lugar está la humedad, ya que se necesita la presencia de agua para que se desarrolle la reacción expansiva y al mismo tiempo el agua es el producto que alimenta la expansión al incorporarse sus moléculas en la estructura del gel ya formado. Se considera que con una humedad relativa por debajo del 80% no se desarrolla la reacción expansiva.

En relación con la temperatura se admite que existe una cierta temperatura que produce la velocidad máxima de la expansión. Al aumentar la temperatura se acelera la velocidad de las reacciones químicas, con lo que se acelera la disolución de sílice y también la formación de CSH (Silicato cálcico hidratado). Como se ha dicho, si la cinética de esta reacción es superior a la de disolución de sílice, se bloquea el fenómeno expansivo. Parece ser que a temperaturas elevadas predomina este segundo efecto por lo que al superar la temperatura un determinado valor se reduce la tasa de expansión. Por otra parte, aún antes de provocarse el bloqueo por el CSH, al aumentar la temperatura se reduce la viscosidad del gel y éste puede extenderse por los poros sin provocar incrementos de presión.

El estado tensional, si es de compresión, reduce el ritmo de la expansión. Existe un valor de la compresión denominado tensión de inhibición, por encima del cual no se desarrolla la expansión. Esta reducción de la expansión an-

te el estado tensional parece que está motivada por la reducción de la permeabilidad en dirección normal a la tensión de compresión, cosa que se ha puesto de manifiesto de forma notable en el caso de rocas fisuradas, y menos notable pero también real en el hormigón. Al estar comprimido el hormigón se cierran los caminos de circulación de líquidos y así se dificulta que el gel penetre en caminos situados en planos más o menos perpendiculares a la dirección de esta tensión, con lo cual la expansión según la dirección normal a estas vías de penetración, es decir en dirección de la compresión, se reduce e incluso llega a anularse.

Los campos eléctricos parece que afectan también la velocidad de expansión causada por una reacción álcali-árido.

La protección catódica, cuyo efecto es provocar una diferencia de potencial externa que se opone a la que produce la corrosión de armaduras, trae como consecuencia una concentración de álcalis en la proximidad de las barras de hierro, con lo que se pueden producir reacciones expansivas en estas zonas.

La “desalinización electroquímica”, cuyo objetivo es expulsar los iones Cl del hormigón, puede provocar un incremento en la velocidad de la reacción álcali-árido.

Se han citado algunos de los factores externos que, en el momento actual, se considera que tienen más influencia en el desarrollo de esta reacción, aunque es muy difícil cuantificar el efecto que cada uno de ellos tiene sobre el hormigón de una presa determinada.

En presas más recientes, en las que ya era práctica común el empleo de cemento Portland con un 25 – 30% de cenizas volantes, se reducen estos riesgos. En un ensayo presentado por el profesor Springesschmidt en el Congreso de Grandes Presas de Viena sobre lixiviación del hormigón, en el que se hace circular agua de forma que exista mucha superficie de contacto entre el agua y el hormigón, se ha visto que si el hormigón contenía cenizas volantes, se reducía notablemente la cantidad de iones Na y K arrastrados por el agua. También las cenizas volantes fijan el hidróxido cálcico, impidiendo o dificultando su reacción con las micas y feldespatos alterados.

También se ha comprobado que usando litio como aditivo, en una proporción de Li OH.H₂O de 1% sobre el peso del cemento, se lograban buenos resultados en el control de la expansión.

Estos estudios, válidos para hormigones de nueva fabricación, se intentan aprovechar en hormigones antiguos con problemas expansivos. Hay noticias de algunos ensayos realizados en laboratorio intentando inyectar agua rica en CO₂, con objeto (se supone) de fijar el Ca(OH)₂ libre en la pasta de cemento, así como al tratamiento superficial de hormigones afectados por la reacción álcali-silice con una solución al 30% de Li N O₃.

Por el momento no se conocen resultados favorables de estos ensayos en grandes masas de hormigón, como es el caso de las presas.

3. ESTUDIOS REALIZADOS SOBRE LA INFLUENCIA DE ALGUNOS FACTORES EXTERNOS

3.1 INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA

A partir de los datos facilitados por los extensómetros correctores existentes en la presa de Belesar, (extensómetros eléctricos Carlson, aislados de los estados tensionales de la presa) se ha intentado valorar la influencia de la temperatura en la expansión, llegando a las siguientes conclusiones:

- 1) Extensómetros cuya temperatura no supera los 15° C, o que la supera en pocas ocasiones, y en los que la variación anual de temperatura no alcanza los 5° C. En todos ellos la expansión es nula o mínima (5×10^{-6} al año como máximo).
- 2) Extensómetros cuya temperatura supera casi todos los años los 15° C (suelen alcanzar o superar todos los años los 20° C) y su oscilación anual es del orden de los 10° C. En general estos extensómetros detectan una expansión, igual o mayor de 10×10^{-6} cada año, y en muchos casos igual o mayor a 20×10^{-6} al año.

Resumiendo, parece deducirse que si se consigue mantener la temperatura del hormigón por debajo de los 15° C, no se produciría expansión.

De todas formas estos análisis no pueden considerarse concluyentes ya que las zonas de la presa en que la temperatura no supera una temperatura de 15° C con una oscilación anual mínima suelen ser zonas situadas en el interior de la masa de hormigón en las que no puede asegurarse que haya un aporte de agua suficiente. Las zonas en que la temperatura alcanza los 20° C y hay oscilaciones importantes de la temperatura a lo largo del año, son zonas más próximas a la superficie de hormigón que en algunas épocas del año están en contacto con el aire. Por tanto en estas zonas es más fácil el aporte y percolación del agua.

En otros análisis más detallados de la evolución de la deformación facilitada directamente por extensómetros Carlson instalados en la presa de Belesar y Salas, se aprecia que la expansión se manifiesta cuando la temperatura, en este caso registrada por el propio extensómetro, está bajando, es decir, en los meses de octubre a enero.

Como se sabe la medida de la deformación facilitada por el extensómetro Carlson, aceptando que el coeficiente de dilatación del acero y el hormigón son prácticamente iguales, elimina la deformación debida a la variación de temperatura.

Una posible explicación del fenómeno citado sería el hecho de que el gel se desarrolla con la temperatura alta pero la expansión se manifiesta al iniciarse la bajada de temperatura, que abre las fisuras y microfisuras y deja espacio para que el gel penetre. Así, al ir penetrando el gel a medida que encuentra hueco en las fisuras que se abren, impide la retracción o contracción térmica del hormigón al bajar la temperatura lo que se manifiesta en los extensómetros Carlson como una expansión "no térmica"

También puede ocurrir que se forme gel a cualquier temperatura, pero para que el gel aumente de volumen es necesario el aporte de agua, y este aporte se produce en mayor medida al abrirse las fisuras por descenso térmico.

3.2 INFLUENCIA DE LA HUMEDAD

Se realizaron varios ensayos con hormigones de la presa de Belesar, para profundizar en el conocimiento de la influencia de la humedad en el desarrollo del fenómeno expansivo.

En una zona de la presa que ha sufrido expansiones, se tomaron doce (12) probetas de 160 mm de diámetro y 450 mm de longitud y se midieron periódicamente las deformaciones unitarias en las siguientes condiciones:

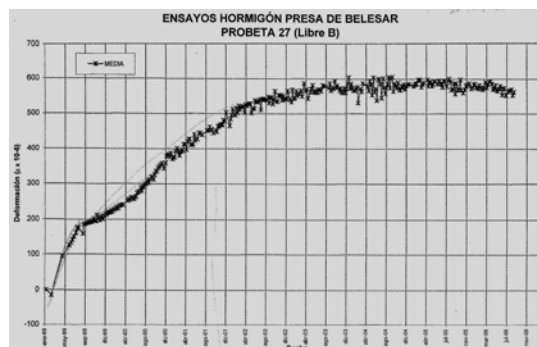
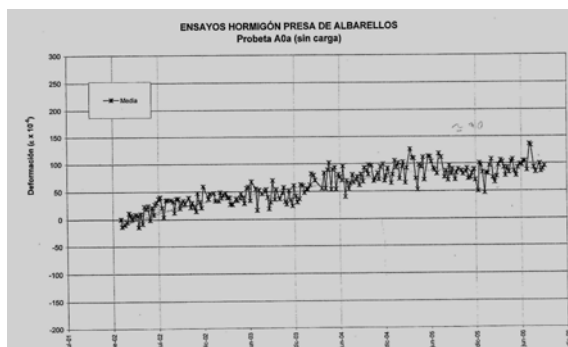
- a) Dos probetas a la intemperie.
- b) Dos probetas sometidas a riego por goteo de agua de lluvia y otras dos de agua del embalse (1 gota cada 10 cm por minuto en cada generatriz)
- c) Dos probetas en ciclos con riego con agua de lluvia durante 2 horas y 54 horas sin riego y otras dos con agua del embalse.
- d) Dos probetas impermeabilizadas totalmente en su superficie, mediante un recubrimiento mínimo de 2 mm con resina sintética y fibra de vidrio.

Estas condiciones de ensayo se mantuvieron desde marzo de 1996 hasta noviembre de 2000 y las probetas estaban situadas en la propia presa, bajo el camino de coronación. En noviembre de 2000, las probetas se trasladan a una galería de la presa, donde las condiciones de temperatura y humedad son prácticamente constantes (15° C y 99%), y a las probetas impermeabilizadas se les retira la lámina impermeabilizante. En esta galería se suprime el riego y el goteo sobre las probetas. En la citada galería se realizaron otros ensayos en carga sobre otras probetas, ensayos que no son objeto de este informe, pero a causa de los cuales se situaron otras cuatro probetas de la presa de Belesar, libres de carga, dos en enero de 1999 y otras dos en noviembre de 2001, y otras dos probetas procedentes de la presa de Albarellos, presa construida con hormigón de árido granítico entre 1970 y 1973, y en la cual no se ha detectado problema alguno de tipo expansivo.

En relación con las probetas situadas a la intemperie en 1996 se puede decir que estas probetas (dos), mientras están a la intemperie, no expanden o más bien se contraen. Cuando se sitúan en la galería en el interior de la presa, en noviembre del 2000, expanden en 3 o 4 años hasta 30×10^{-6} en una y 130×10^{-6} en otra.

Las probetas de Belesar situadas en la galería interior de la presa en 1999 y 2001 desarrollan expansión en unos 4 años: las de 1999 hasta 500 o 600×10^{-6} , con un 60 o 70% en el primer año, y las de 2001 hasta 330 o 400×10^{-6} , con un 60 o 70% en el primer año. En todos los casos las expansiones se mantienen. Las probetas de Albarellos (no hay reacción expansiva según la información facilitada por los extensómetros Carlson y péndulos de la presa), desarrollan una expansión, de 90 y 230×10^{-6} en 3 años. Esto parece indicar que al encontrarse la probeta en un ambiente muy húmedo, se produce una

penetración de agua en la misma lo que provoca una expansión aun sin reacciones químicas nocivas.



Como una posible explicación de estos hechos, y admitiendo, como parece ser la realidad, que las probetas de Albarellos no tienen reacciones expansivas tipo álcali-árido, puede pensarse que en las probetas de Belesar situadas primero a intemperie y después en galería, la expansión desarrollada en esta última se debe al efecto de la penetración de agua sin reacción álcali-árido, y que estas probetas carecen de áridos reactivos, o bien que previamente a su extracción, el hormigón que las constituye había desarrollado ya toda su expansión, agotando los productos expansivos.

En la observación detallada de estas probetas, no se encontraron restos de gel en su superficie en las procedentes de Albarellos ni en las de Belesar que estuvieron a la intemperie desde 1996 hasta 2001. Sin embargo, en las probetas situadas en la galería en 1999 y 2001 si se detectaron restos de gel (solidificado) en su superficie. Recordemos que estas probetas sufrieron en galería expansiones relativamente altas.

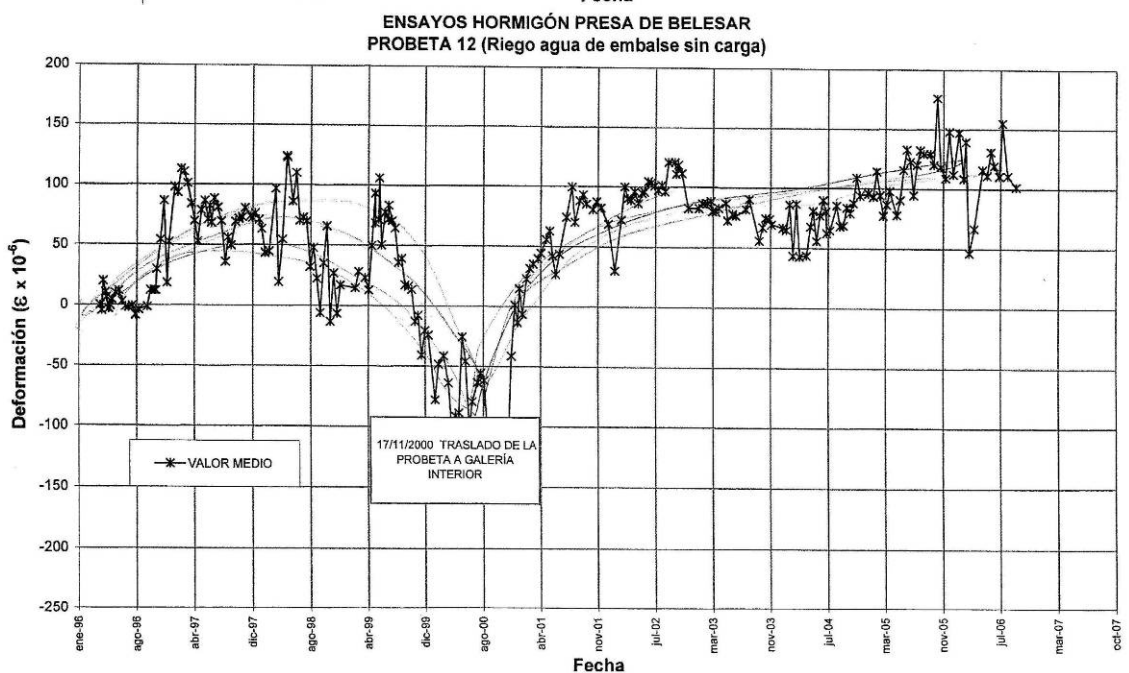
Las probetas sometidas a goteo durante 2 horas y sin goteo durante 54 horas, y posteriormente situadas en la galería con humedad mayor del 90%, durante el periodo (4 años) que estuvieron sometidas a goteo intermitente permitieron observar:

- dos de ellas no manifiestan expansión,
- otra manifestó una expansión en pocos meses (3 o 4) hasta 150 o 200×10^{-6} , que luego se redujo paulatinamente hasta 120 o 130×10^{-6} ,
- y otra desarrolló en unos 2 o 3 años una expansión hasta 150 o 200×10^{-6} , que luego se redujo (contracción hasta cero)

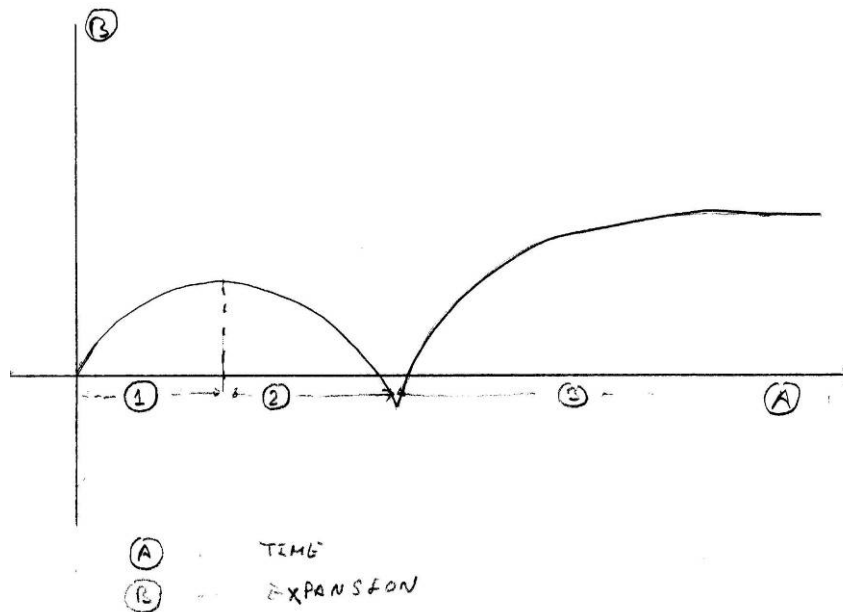


Al introducirlas en la galería no mostraron expansión. En la observación detallada de estas probetas no se localizó resto de gel en ninguna de ellas.

Las cuatro probetas de Belesar con riego permanente y traslado posterior a la galería de la presa, sin riego, tienen un comportamiento similar: En los dos primeros años de estar sometidas a lluvia permanente sufren una expansión del orden de 100×10^{-6} , que en los dos años siguientes desaparece, llegando a detectarse una contracción. Al trasladarlas a la galería en presa, con una humedad superior al 90%, sufren de nuevo una expansión que en 2 o 3 años alcanza valores de 100, 150 y 250×10^{-6} .



Puede aceptarse la siguiente evolución de la expansión en el tiempo



Una posible explicación de esta evolución, podría ser:

- Período 1

Durante este período la probeta está permanentemente mojada, con agua en su superficie que resbala sobre ella y cae. El agua va penetrando en el hormigón lentamente. Durante este período, al circular el agua a través del hormigón, hay movilidad de iones y se produce la reacción álcali-sílice con generación de gel que provoca la expansión.

- Período 2

Con la probeta ya totalmente saturada la circulación de agua se detiene, con lo que se detiene la movilidad de iones y consecuentemente las reacciones que producen la generación de gel. El producido en el período 1 se va trasladando hacia la superficie de la probeta, de la que es arrastrado por el agua, lo que facilita la salida de más gel que llena los poros, con lo que se produce una retracción de la probeta.

- Período 3

Al situar posteriormente las probetas en una galería con una humedad > 90% pero no total, se podría producir un movimiento de agua en la probeta lo que traería como consecuencia un movimiento de iones que reactivan las reacciones expansivas, y por tanto la producción de gel, que al llegar a la superficie y no existir una corriente de agua que lo arrastre, se deposita y posiblemente se solidifica.

En la observación detallada de estas probetas se han encontrado restos de gel en la superficie al menos en las dos que han sufrido mayor expansión a partir de 2001, lo que es conforme con la hipótesis propuesta.

Esta es una hipótesis totalmente discutible que procede de aceptar que al estar la probeta saturada y no permitir la salida de agua, y por tanto su circulación, se podría detener el fenómeno expansivo al negar a los iones la posibilidad de moverse con el agua circulando en el hormigón.

En las probetas impermeabilizadas no se observa expansión irreversible. A partir de su instalación en la galería una vez retirada la impermeabilización, se detecta una expansión creciente hasta un máximo de $150 \cdot 10^{-6}$, en una de ellas, y $400 \cdot 10^{-6}$, en la otra.

4. CONCLUSIÓN Y NUEVOS ENSAYOS

Para que se produzca la reacción álcali-silice es necesaria la presencia de agua, pero ¿es también necesario que el agua se mueva, es decir, que haya circulación de agua como se indica en alguna publicación y que podría estar de acuerdo con las observaciones de los ensayos antes comentados?

En general las impermeabilizaciones realizadas en algunas presas se han situado en el paramento de aguas arriba (San Esteban y Chambon, por ejemplo) dejando sin revestir el de aguas abajo. En la presa de Salas se ha impermeabilizado el contrafuerte, pero en una banda horizontal de 3 o 4 tongadas con lo que, aunque sea por capilaridad, el agua puede acceder y circular por la zona reactiva.

La impermeabilización de todo el paramento de aguas abajo, la coronación y el paramento de aguas arriba hasta la cota mínima de explotación, podría ser una buena solución al problema expansivo si se comprueba que para que se desarrolle la reacción es necesario que el agua circule a través de la masa de hormigón.

Antes de decidir la impermeabilización de una presa, y teniendo en cuenta el alto coste económico que una obra de este tipo representa, es necesario hacer ensayos que permitan justificar lo más posible esta solución. Los ensayos en probetas pueden permitir comprobar si impidiendo la movilidad del agua al sellar todas las posibles salidas, se consigue frenar el fenómeno.

Para esto se proponen una serie de ensayos sobre probetas potencialmente reactivas impermeabilizadas, unas secas, otras saturadas y otras en una situación intermedia entre seca y saturada.

Las probetas, de un diámetro $\approx \phi$ 150 mm extraídas con sonda tendrán una longitud de unos 450 mm. Se les instalarán 4 bases de medida en 4 generatrices situadas en 2 planos ortogonales, que se corten en el eje de la probeta.

Se preparan 4 probetas saturadas, 4 secas y 4 con un cierto grado de humedad (no saturadas) y otras 4 para situar en la galería al 95% de humedad. En total, pues, serán 16 las probetas ensayadas.

Las impermeabilizaciones se realizarán con un producto no rígido que se pueda reponer si se observa algún deterioro del mismo a lo largo del tiempo.

Se debe tener en cuenta los resultados de las probetas impermeabilizadas con lamina de resinas, en las que no se controló la humedad, ya que durante

el período en que estuvieron impermeabilizadas no denotaron expansión, activándose ésta cuando se les retiró la lámina.

Se podría disponer también de probetas tratadas superficialmente con Li_2N O_3 a un 30%, con objeto de conocer la influencia de este producto en el fenómeno expansivo.