

Consideraciones prácticas sobre el frecuente comportamiento expansivo del hormigón de presas

Por **MARCIANO GUERREIRO**

Ingeniero Consultor. Director Técnico de MEDYT, S. A.

La posibilidad de fenómenos expansivos en el hormigón de presas puede prevenirse y controlarse. A su estudio y a los sistemas de auscultación y análisis se dedica el siguiente artículo, que asimismo incluye recomendaciones de utilidad práctica ante este tipo de problemas.

1. INTRODUCCION

Hace casi treinta años, en uno de los primeros informes de estudio del comportamiento de presas de hormigón realizados por el autor, se denunciaba la existencia de expansión en el hormigón de una presa. Por aquel entonces, la información dada por el no muy completo sistema de auscultación existente en la presa no presentaba todavía señales de efectos resultantes de fenómenos expansivos. La denuncia se formuló simplemente con base en la información dada por los prismas correctores de los que estaban bajo carga constante, todos ellos pertenecientes al conjunto de prismas expresamente preparados para conocer los parámetros característicos de la fluencia del hormigón y de la variación de su módulo de elasticidad con el tiempo. Algunos años más tarde (ya en la década de los sesenta), cuando el autor ya no tenía a su cargo el estudio del comportamiento de la presa, es cuando a través del sistema de auscultación se detectan en ella las primeras manifestaciones de ciertos efectos del fenómeno expansivo. Estos efectos aumentan año tras año. A partir de cierto momento son acompañados de fisuración superficial, inicialmente subhorizontal, pero que posteriormente, a medida que se adensa, va tomando la forma de la llamada fisuración tipo «mapa».

La denuncia de la existencia de una expansión en el hormigón de la presa se hace en la segunda mitad de la década de los cincuenta, es decir, en unos años en que la bibliografía que presentaba resultados de variaciones de volu-

men del hormigón en grandes masas, no debidas a tensiones ni a variaciones de temperatura, más bien hacía referencia a la existencia de pequeñas retracciones. Empezaban a quedar lejos los años de los problemas surgidos en Estados Unidos a causa de la reacción de los álcalis del cemento con ciertos tipos de áridos, muy especialmente los que contenían sílice químicamente activa. La aplicación de normas resultantes del estudio de aquellos problemas salvaguarda las presas futuras de problemas similares. Quizás por ello no se haya dado la suficiente atención que hubiese sido conveniente dar al caso antes referido, para conocer las causas del fenómeno expansivo y poder actuar en el sentido de frenar o impedir su desarrollo.

En los últimos diez años el autor ha venido denunciado la existencia en el hormigón de diversas presas, de fenómenos expansivos con repercusiones similares a las del caso referido. Las denuncias se han podido formular, en ciertos casos exclusivamente en base a la información dada por los correspondientes sistemas de auscultación. En otros casos, en que ya existía fisuración cuando se solicitó la intervención del autor, las denuncias se han hecho, además de principalmente con base en información del tipo de la que acaba de referirse, también en base a la existencia de fisuración y al estudio de su evolución, estableciéndose claramente la relación de causa-efecto existente entre el fenómeno expansivo y la fisuración.

En alguno de los primeros casos antes referidos la entidad propietaria pasó a realizar ella misma el estudio del comportamiento de la pre-

sa, lo que ha impedido al autor el poder acompañar la evolución del fenómeno. En cambio, en los casos en que ya existía fisuración, el espíritu realista y la actitud receptiva a la colaboración de las entidades propietarias han hecho posible el avanzar bastante en el estudio de estos fenómenos, de sus causas y sus consecuencias, así como de las medidas a tomar para evitar su progresión y para reparar sus efectos dañinos.

2. OBJETIVO DEL TRABAJO

El objetivo del presente trabajo es dar a conocer algunos de los más importantes e interesantes aspectos de los varios estudios ya realizados, así como de las principales conclusiones a que se ha podido llegar. La extensión, multiplicidad y complejidad de estos estudios no permite que el presente trabajo pueda ir mucho más lejos de la simple y resumida exposición de ciertos aspectos y conclusiones. En efecto, el conjunto de los informes internos elaborados sobre aquellos estudios rebasa ya largamente el millar y medio de páginas y el medio millar de figuras. Son numerosos los aspectos y conclusiones cuya exposición detallada daría lugar, sólo por sí y para cada uno de ellos, a un trabajo mucho más extenso que el presente.

En los apartados siguientes de este trabajo se hará referencia, en primer lugar, a aspectos y conclusiones relacionados con el estudio de las causas primarias, el cual se ha realizado en algunos casos. A continuación se tratará resumidamente el mecanismo más importante de las expansiones del hormigón, y se hará mención de algunas reacciones correspondientes a fenómenos ya detectados, los cuales están en el origen de las expansiones. La existencia de fenómenos similares en la roca de cimentación será tratada en otro apartado. Después se expondrán las repercusiones más frecuentes sobre varios de los aspectos del comportamiento de las presas, así como el camino que se considera conveniente seguir cuando surgen aquellas manifestaciones patológicas. Algunas de las repercusiones que la existencia de estos fenómenos debe tener sobre la concepción de los futuros sistemas de auscultación son expuestas en el penúltimo apartado. Finalmente, en el último

apartado se presentan algunas consideraciones genéricas relativas al trabajo de auscultación.

3. CAUSAS PRIMARIAS DE LAS EXPANSIONES OBSERVADAS EN EL HORMIGON DE ALGUNAS PRESAS

Por lo expuesto en la Introducción queda ya bien claro que los fenómenos expansivos tratados en este trabajo nada tienen que ver con otros detectados en el hormigón de algunas obras, cuyo inicio se da inmediatamente a continuación del fraguado del cemento y que no se manifiestan más allá de los seis meses a un año de edad del hormigón. De las características de estos últimos fenómenos expansivos (orden de magnitud de la expansión, ley de su variación con la edad del hormigón, etc.) ya se dio cuenta en trabajos publicados (1) y (2), indicando todo que se debían a cal (OCa) y magnesia (OMg) libres en el cemento y cuya hidratación se daba después del fraguado. Tampoco los fenómenos expansivos que son objeto del presente trabajo tienen algo que ver con la llamada expansión higrométrica, igualmente tratada en los trabajos antes referidos (1) y (2) y que no es más que la expansión acusada por todo hormigón curado en masa cuando se somete a imbibición (en el hormigón de la presa la imbibición se inicia con el primer llenado del embalse).

Tanto la expansión debida a la cal y magnesia libres, como la expansión higrométrica, presentan desarrollos característicos y conocidos, completamente distintos del desarrollo de las expansiones tratadas en el presente trabajo. Mientras aquéllas se manifiestan con una evolución claramente asintótica, con magnitudes entre algunas decenas y pocas centenas de micras por metro, estas revelan una evolución casi lineal a lo largo de los años, con valores que pueden alcanzar los miles de micras por metro en no muchos años y cuyo final, si no se impide la continuación de su desarrollo, se cree que es la destrucción del hormigón. En la fig. 1 se presenta el diagrama de las expansiones medidas en un bloque de una presa de gravedad durante un período de tres años. El diagrama presentado está corregido de las dilataciones y contracciones de carácter térmico, es decir, tradu-

CONSIDERACIONES SOBRE EL COMPORTAMIENTO EXPANSIVO DEL HORMIGON DE PRESAS

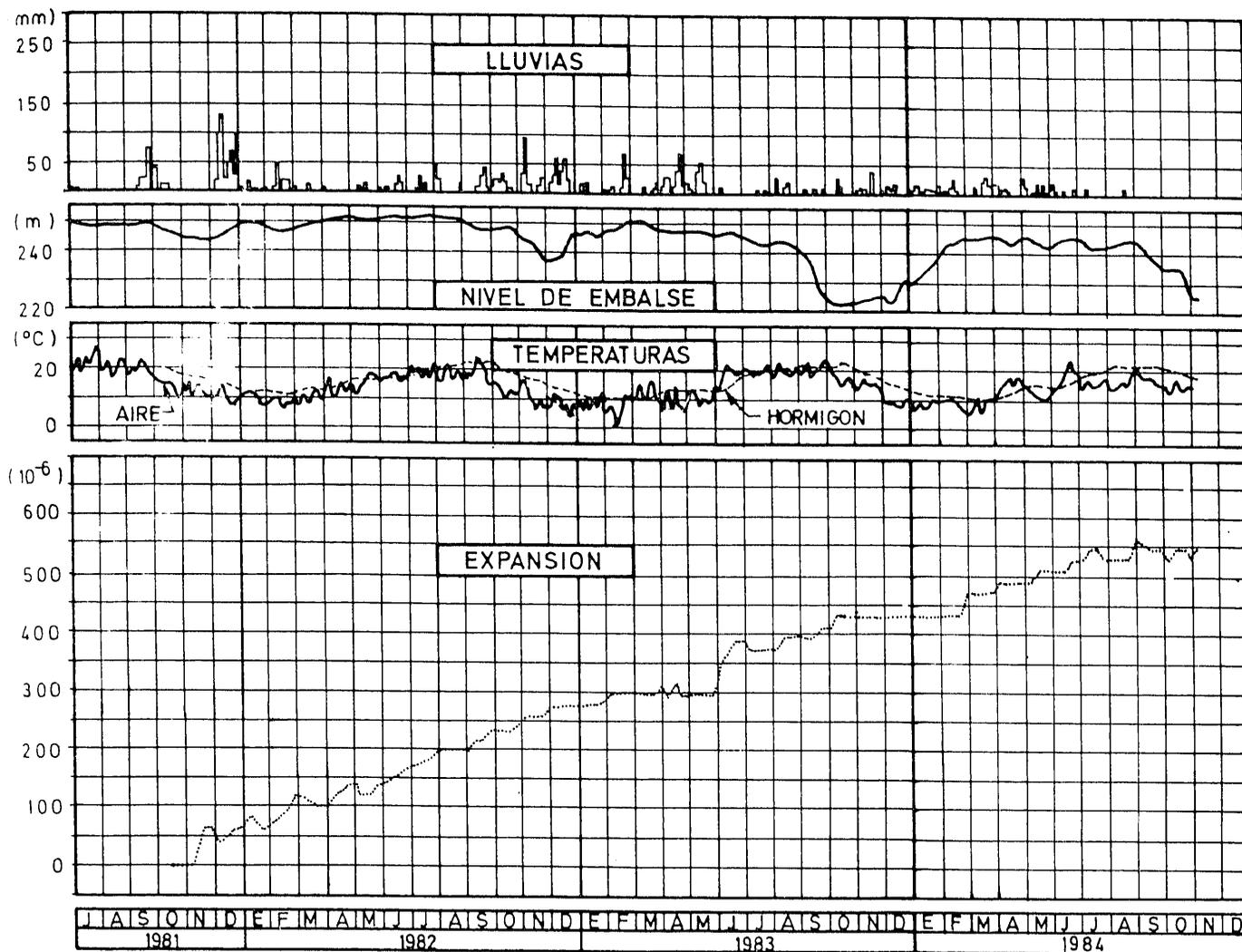


Figura 1.—Expansión del hormigón de un bloque de una presa de gravedad, medida con un extensómetro de 2 m de base de medida.

ce simplemente el fenómeno expansivo. Se puede observar que en tres años la expansión detectada alcanza casi $+ 600 \times 10^{-6}$.

Los estudios de diversa índole emprendidos con vistas al conocimiento de las causas primarias de estas expansiones muestran que dichas causas son fenómenos naturales que se desarrollan a un ritmo más o menos rápido, pero casi siempre de forma aproximadamente continua. En los casos estudiados aquellos fenómenos corresponden siempre al uso de materiales con minerales que dejan de ser termodinámicamente estables en ciertas condiciones. Como ejemplos comprobados pueden referirse:

- Los feldespatos (tan abundantes en la mayor parte de las rocas eruptivas y tan fre-

cuentas en numerosas rocas metamórficas y sedimentarias) cuya alteración se da al entrar en contacto con medios exógenos con fase líquida, muy particularmente si ésta es ácida ($\text{pH} < 7$).

- Algunos sulfuros (tan comunes en ciertas rocas metamórficas) se oxidan con facilidad cuando dejan de estar en el medio reducido en que se formaron y pasan a contactar con medios oxidados o menos reducidos.
- Los mismos silicatos hidratados del cemento, cuya estabilidad se pierde cuanto el pH de la fase líquida de la pasta de cemento hidratada desciende por debajo de 11.

Los ejemplos referidos son conocidos en la ingeniería civil. Sin embargo, se sabe muy poco sobre la velocidad a que se desarrollan los fenómenos de inestabilidad referidos en las obras integradas en la naturaleza, es decir, parcial o totalmente expuestas a los agentes atmosféricos y en contacto con los medios naturales. En las presas, por tratarse de obras completamente inmersas en la naturaleza, es grande la probabilidad de que sean sede de aquellos fenómenos. Las manifestaciones expansivas detectadas en el hormigón de muchas de ellas lo confirma plenamente. La virulencia, observada en frecuentes casos, de aquellas manifestaciones y de sus consecuencias, indica que la velocidad de desarrollo de las inestabilidades antes referidas, puede ser muy importante.

En los casos estudiados de fenómenos de inestabilidad de los feldespatos y de los silicatos hidratados del cemento, se ha comprobado la capital importancia de la percolación del agua a través de los poros del hormigón, muy especialmente si el agua percolada era ácida antes de penetrar en el hormigón. En lo concerniente a aguas ácidas es importante referir los siguientes hechos:

- El casi centenar de medidas de pH realizadas durante 1984 en aguas de lluvias caídas en algunos sitios donde se ubican presas corresponden siempre a valores inferiores a 7 (lluvias ácidas) y comprendidos entre 6,7 y 4,8.
- Las medidas de pH, realizadas también a lo largo de 1984, en el agua superficial del embalse de una presa cuyo hormigón acusa expansiones han sido igualmente inferiores a 7, con valores comprendidos entre 6,7 y 6,2.
- Medidas simultáneas de pH realizadas en períodos de importantes aportaciones en aguas superficiales y profundas de un embalse, indican que estas últimas son bastante más ácidas que las superficiales, registrándose con frecuencia en ellas valores comprendidos entre 5,7 y 5,9.

Estos hechos indican que la mayor parte de las lluvias actuales son ácidas, ocurriendo lo mismo con las aguas de los ríos cuando las precipitaciones son importantes. Si estos ríos apor-

tan sus aguas a un embalse, la en general más baja temperatura de las aportaciones, con respecto al agua del embalse, conduce a que aquellas discurren por el cauce, apenas se mezclen con el agua del embalse, y se vayan acumulando en la parte baja de éste. La acidez de las lluvias se debe a las pequeñísimas cantidades de ácido carbónico, ácido sulfúrico y ácido nítrico que en ella se forman cuando disuelve y arrastra el dióxido de carbono, los óxidos de azufre y de nitrógeno, existentes en la atmósfera y generados fundamentalmente por combustiones.

La simple hidrólisis de los feldespatos existentes en los áridos de los hormigones origina ya expansiones. Estas se incrementan cuando la meteorización avanza, es decir, cuando se originan geles de silicatos de sodio y/o potasio y se libera cal que carbonata. Puesto que la velocidad a que se desarrolla el proceso de meteorización de los feldespatos es una función de la concentración de iones hidrógeno en las aguas que percolan a través de sus poros, es evidente el papel fundamental desempeñado en todo este proceso por las aguas ácidas de las lluvias y, en su caso, de los embalses.

Una parte muy significativa de las expansiones tiene un origen puramente químico, relacionado con el hecho de que los volúmenes molares de los productos de las reacciones son mayores que los volúmenes molares de los reactivos. Sin embargo, el factor más importante de las expansiones medidas y estudiadas no tiene aquel origen, sino más bien un origen puramente físico como se expone en el apartado siguiente.

4. MECANISMO FUNDAMENTAL DE LAS EXPANSIONES ESTUDIADAS Y DE LA FISURACION

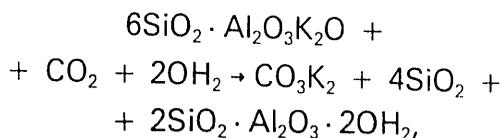
En los casos más estudiados de expansiones importantes ha estado presente la alteración de los feldespatos de las áridos, aunque en algún caso hay razones para pensar que dicha alteración fue precedida o acompañada, y asimismo potenciada, por un fenómeno distinto de inestabilidad de otro componente de los áridos.

Es sabido (3) y (4) que los feldespatos se alteran principalmente por hidrólisis, pero también por oxidación y carbonatación simultánea, for-

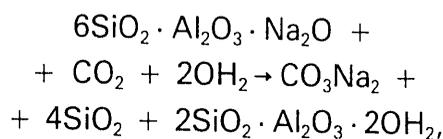
mándose silicatos hidratados, hidróxidos, óxidos y carbonatos. En nuestros climas, durante la hidrólisis, se da la separación entre el silicato de aluminio y el de metal alcalino (o alcalino-terroso). Por un lado se tiene el silicato de aluminio que se hidrata y constituye la caolinita. Por otro lado se tiene el segundo silicato, cuya descomposición es rápida sobre todo cuando es alcalino.

La incorporación de iones hidrógeno (H^+) aumenta la velocidad de reacción. Por ello el ácido carbónico, formado cuando el dióxido de carbono se disuelve en el agua, al producir iones hidrógeno acelera la reacción. El silicato alcalino precipita en contacto con el gas carbónico disuelto en el agua, bajo la forma de sílice gelatinosa, y los iones alcalinos son fijados por el gas carbónico bajo la forma de carbonatos.

De forma simplificada, el fenómeno de la alteración de la ortoclasa por aguas con suficiente dióxido de carbono se puede representar por



y el de la albita por



es decir, en la alteración de los dos feldespatos alcalinos se forma caolinita ($2SiO_2 \cdot Al_2O_3 \cdot 2OH_2$) y sílice soluble. Esta sílice, químicamente activa, en presencia de los álcalis del cemento puede dar lugar a que se genere algo similar a la clásica reacción árido-álcalis. Biczok (5) hace referencia a ello cuando dice que feldespatos reactivos presentes en gravas o arenas pueden dar lugar a la aparición de fenómenos de expansión al producirse una reacción árido-álcalis que causaría la descomposición del hormigón. Como se sabe (6), esta reacción origina un gel de silicatos de sodio y potasio, el cual es exudado por los testigos de los sondeos de investigación. En los espacios de reacción, la solución coloidal de silicatos alcalinos origina presiones osmóticas, al funcionar la pasta de cemento como membrana semi-permea-

ble. Estas presiones osmóticas se han llegado a medir (7), habiéndose alcanzado valores superiores a 140 kg. cm^{-2} . A ellas, y a sus efectos, se debe la mayor parte de la expansión.

Ahora bien, en el caso de la alteración de los feldespatos, en los espacios de reacción el silicato alcalino se forma ya durante la separación del silicato doble por hidrólisis, sin cualquier intervención de los álcalis del cemento. La alteración de los feldespatos dentro del hormigón genera pues las condiciones necesarias para que se produzca un conjunto de fenómenos idénticos a los que se dan en la llamada reacción «alcalis-árido con sílice químicamente activa». Incluso en la hipótesis de que los elementos alcalinos pasasen totalmente a la forma de carbonatos, la solución de sílice coloidal contenida en los espacios de reacción provocaría igualmente las presiones osmóticas.

En los casos estudiados las señales de la existencia de presiones osmóticas han sido diversas. Se citan algunas: salidas de gel de silicatos alcalinos desde los espacios de reacción, cuando éstos eran intersectados por la sonda de extracción de testigos; deformación de los testigos posteriormente a su extracción, con frecuente aparición de prominencias en su superficie; muy fuerte ritmo de recuperación de la expansión, en períodos de desecación de probetas sometidas a ensayos de expansión por medio de ciclos secado-saturación con agua rica en CO_2 .

En la fig. 2 se presenta la curva de variación de las deformaciones unitarias, en función del tiempo, de una probeta sometida a uno de aquellos ensayos. La probeta pertenece al hormigón de una obra que ya había sufrido importantes expansiones. Nótese el elevado valor, -840×10^{-6} de expansión recuperada, medido en el último período de secado (realizado entre los 91 y 157 días después del inicio del ensayo). Aquel valor no es debido sólo a retracción, sino que hay en él un importante sumando de expansión reversible debida a las presiones osmóticas. En efecto, éstas desaparecen con el secado, puesto que al actuar la pasta de cemento como membrana semi-permeable, el agua pasa a través de ella en cualquiera de los sentidos, pero no los productos coloidales. La rotura de la probeta se ha dado de forma espontá-

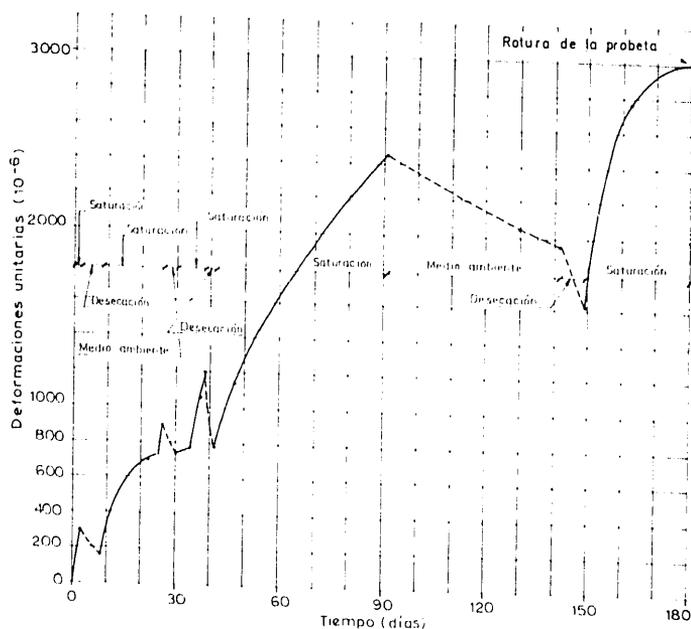


Figura 2. — Ensayo de expansión por ciclos de secado. Saturación con agua rica en CO_2 ($\text{pH} \approx 4,6$), realizado sobre probeta de hormigón con árido rico en feldespatos.

nea, como consecuencia de la fisuración aparecida y desarrollada gradualmente a lo largo del período del ensayo.

En lo concerniente al mecanismo y desarrollo de la fisuración provocada por el fenómeno expansivo hay que tener en cuenta que éste, como proceso natural que es, presenta acusadas características de no-homogeneidad. Por ello, alcanzado un cierto estadio en su evolución, origina: en primer lugar una microfisuración interna; después una fisuración todavía interna, discontinua, pero ya visible en testigos; a continuación una fisuración exterior, continua, con profundidad inicial reducida, pero que va aumentando con la continuación del fenómeno expansivo.

La conjugación del simple fenómeno expansivo con el de la alteración de los feldespatos ha determinado, en los casos estudiados, una importante reducción de la permeabilidad del gel y de la pasta de cemento (por la deposición en sus poros de ciertos productos de la alteración), y por consiguiente una mayor compacidad de aquella. Sin embargo, provocó a la vez un fuerte aumento de la permeabilidad del hormigón (por la más fácil percolación proporcionada por la fisuración producida).

La mayor permeabilidad del hormigón ha abierto el camino para: una aceleración del fenómeno de la alteración de los feldespatos, y por consiguiente del fenómeno expansivo, a través de una más fácil percolación del agua, en particular cuando ésta es ácida; una más fácil penetración del aire, y por consiguiente una aceleración de la carbonatación del hormigón, la cual es también extremadamente potenciada por el CO_2 de las aguas ácidas; la entrada de otros agentes agresivos, por ejemplo el ión $\text{SO}_4^{=}$ vía agua del embalse y de lluvia. El grado de carbonatación encontrado en algunos testigos (incluso de testigos de hormigón situado a varios metros de profundidad respecto a la superficie expuesta más próxima) fue muy elevado. Ello correspondía ya a una situación de total carbonatación de la cal hidratada del cemento, así como de la cal liberada en la alteración del feldespato cálcico, indicando ya por consiguiente la existencia de un ataque del ácido carbónico a los silicatos hidratados de la pasta de cemento.

5. FENOMENOS EXPANSIVOS DE LAS CIMENTACIONES

El estudio de fenómenos expansivos y sus consecuencias en la cimentación de presas no están tan avanzado como el de fenómenos similares en los hormigones. Ello no significa que, en ciertos casos, los primeros no sean mucho más importantes que los segundos.

Las señales de su existencia son numerosas. En particular se pueden citar las señales, muy directas, correspondientes a la medición de las mismas expansiones a través de extensómetros de gran base emplazados en las cimentaciones. Valga como botón de muestra la referencia al caso de las expansiones detectadas en la cimentación de gneiss, de una presa bóveda durante su primera puesta en carga, por todos los 29 extensómetros que integran los varios grupos espaciales y planos de extensómetros que en la cimentación se han emplazado. La expansión media, por grupos de extensómetros, varió entre $+45 \times 10^{-6}$ y $+120 \times 10^{-6}$.

Frente a lo referido en los apartados anteriores, en particular el protagonismo desempeñado por ciertos minerales en los fenómenos ex-

CONSIDERACIONES SOBRE EL COMPORTAMIENTO EXPANSIVO DEL HORMIGON DE PRESAS

pansivos detectados en los hormigones, no es de extrañar que fenómenos similares ocurran en las cimentaciones, puesto que en ellas existen habitualmente esos mismos minerales. Además el otro protagonista, es decir, el agua de lluvia y de los embalses, circula en las cimentaciones proporcionalmente en cantidad mucho más elevada que a través del hormigón. Sin embargo, hay dos factores que determinan diferencias acentuadas entre las manifestaciones de aquellos fenómenos en el hormigón y en el macizo de cimentación: uno es el diaclasado del macizo de cimentación; el otro es la distinta forma de percolación del agua, predominando en el hormigón el fenómeno capilar mientras en la cimentación predomina la circulación bajo la acción de fuerzas gravitatorias.

El primero de aquellos factores da lugar, a la escala del macizo rocoso, a una absorción parcial de las expansiones. El segundo factor determina una importante remoción de los productos de las reacciones en disolución o suspensión en las aguas circulantes. Ello debe limitar bastante las expansiones con origen en fenómenos osmóticos.

La mayor cantidad de agua que circula en la cimentación, respecto a la que pasa a través del cuerpo de la presa, conduce a una mucho más rápida meteorización respecto a la que se da en el hormigón en que se use como árido la roca de cimentación. Lo anterior, unido a otros factores, explica la rápida meteorización de la roca de cimentación de ciertas obras.

En el caso de cimentaciones con sulfuros fácilmente oxidables (pirita amorfa, pirita criptocrystalina y microcrystalina y pirrotita) tienen también una importancia fundamental en la velocidad de deterioración de la roca los siguientes factores: un elevado potencial de oxidación (Eh) de las aguas circulantes; la entrada de aire (por consiguiente oxígeno) a través de las diaclasas del macizo de cimentación; la existencia de bacterias aerobias productoras de sulfatos, las cuales están siempre presentes cuando existen las condiciones necesarias para que puedan vivir. Son particularmente de temer las aguas de lluvia, arrastrando aire, que pueden penetrar, a través de las diaclasas, en las cimentaciones con sulfuros fácilmente oxidables.

Aparte de las repercusiones inmediatas que los fenómenos expansivos de la cimentación tienen en el comportamiento de la misma cimentación, así como en el de la presa, aquellos fenómenos son el preludio de deterioraciones más o menos importantes que acabarán por manifestarse en el futuro. En este sentido se piensa que es bastante significativo uno de los resultados publicados en informe (8) del Comité de Deterioración de Presas y Embalses, de la ICOLD. Se trata del resumen de los casos, comunicados al Comité, de deterioraciones de macizos de cimentación de presas de hormigón, con la asignación de los números de casos habidos por causas consideradas. El resumen es el siguiente:

Causas de deterioración	N.º de presas
Deformaciones y asentos.....	10
Percolación	20
Erosión	15
Alteración (incluyendo expansión)	0

La inexistencia de casos comunicados de deterioración por alteración (incluyendo expansión) indica que deben ser muy reducidos (o inexistentes) los casos de deterioración, en la aceptación considerada, debidos a expansión. En efecto, mientras lo que predomine en la cimentación sea el fenómeno expansivo, es difícil que surjan manifestaciones visibles de deterioraciones, máxime si se tiene en cuenta que hay manifestaciones de las expansiones que contribuyen incluso para el buen comportamiento de las cimentaciones. Pero lo que no cabe duda es que las expansiones acompañan el primer estadio de un fenómeno (la meteorización) que constituye ya, en sí mismo, una deterioración del macizo rocoso. Este aspecto obliga pues, también a tener muy en cuenta las expansiones, ya que el paso o estadios siguientes de aquel fenómeno es lo que conduce a la mayor parte de las situaciones de fuertes e indeseables deformaciones, asentos, intensas percolaciones y erosiones.

6. REPERCUSION DE LOS FENOMENOS EXPANSIVOS SOBRE EL COMPORTAMIENTO DE LAS PRESAS

6.1. Sobre aspectos térmicos

Las reacciones químicas que provocan los fenómenos expansivos tratados en este trabajo se dan a presión que puede considerarse constante. De acuerdo con la termodinámica química, tiende pues a alcanzar el estado de entalpía mínima. Puesto que no generan gases, los procesos químicos pueden considerarse a volumen constante, y, en esta situación, la variación de entalpía es igual al calor de la reacción. Como la variación de la entalpía es negativa, pues tiende para un mínimo, también lo es el calor de reacción, es decir estos procesos químicos ceden calor al exterior (las reacciones son exotérmicas).

Aunque la velocidad a que estas reacciones se desarrollan sea muy inferior a la de la hidratación de los silicatos del cemento anhidro, lo cierto es que, cuando se desarrollan dentro del hormigón en grandes masas, su exotermicidad se manifiesta a través de pequeñas subidas de temperaturas. Estas subidas son perfectamente detectables por los aparatos que miden temperaturas, ya que suelen estar comprendidas entre algunas décimas de grado centígrado y los 3 a 4° C. Varían con la situación del punto de medida dentro del hormigón y con el grado de intensidad en que se esté dando la reacción, grado aquel que, a su vez, depende de muchos factores.

También en la roca de cimentación se observan las subidas de temperaturas debidas a las reacciones que en ellas se dan. En general las subidas son más moderadas que en el hormigón, no excediendo habitualmente los 2,5° C. Las mayores subidas se dan para situaciones de cantidades reducidas de agua percolada, ya que ésta es un excelente vehículo de remoción del calor producido.

Estas subidas de temperatura en el hormigón y en la roca de cimentación constituyen, a priori, una señal excelente para la detección de las reacciones generadoras de expansiones. Sin embargo, como se trata de subidas relativamente a la temperatura que se mediría si la reacción

no existiese, si no se conoce muy bien aquella temperatura, asimismo su ley de variación a lo largo del año, dichas subidas se vuelven muy sutiles y difíciles de detectar. Desde este punto de vista cabe decir que las subidas en la cimentación, no obstante más moderadas, en general se detectan con más facilidad. Ello se debe a que las temperaturas en la cimentación son en general bastante menos variables que en el hormigón, por lo que una pequeña subida llama más la atención.

Hay algún efecto de la expansión, así como algún factor que acelera los fenómenos expansivos, que originan descensos de temperatura. Si se detectan, e interpretan correctamente, también ayudan a la detección de aquellos fenómenos.

La existencia de una fuente de calor dentro del hormigón, más intensa cuando las temperaturas son más elevadas (las reacciones que provocan los fenómenos expansivos en general se aceleran con la subida de temperatura), origina aumentos en las amplitudes de las variaciones térmicas anuales en los puntos del interior del hormigón. Aquellos aumentos son relativamente más elevados en los puntos más interiores. Ello puede ser aprovechado para la detección, o confirmación de la existencia, de fenómenos expansivos.

En un caso concreto se han determinado las relaciones de aquellas amplitudes para tres pares de puntos a distintas profundidades, considerando en el numerador de la fracción relativa a cada relación siempre la amplitud más reducida, es decir, la correspondiente al punto más profundo. Los valores obtenidos se indican a continuación, a la vez que se indican también los valores que se deberían obtener, si actuase sólo la onda térmica anual, para los valores límites del rango de valores habituales del coeficiente de difusibilidad (h^2) del hormigón de presas ($0,085 \text{ m}^2 \text{ día}^{-1}$ a $0,135 \text{ m}^2 \text{ día}^{-1}$):

Valores obtenidos	Valores para $h^2 = 0,085 \text{ m}^2 \text{ día}^{-1}$	Valores para $h^2 = 0,135 \text{ m}^2 \text{ día}^{-1}$
0,84	0,62	0,66
0,89	0,79	0,81
0,95	0,78	0,81

Es fácil ver que la explicación de los valores

obtenidos en términos de coeficiente de difusibilidad del hormigón conduciría a elevadísimos valores de esta característica térmica, además inexistentes en hormigones de presas. El conjunto de valores presentados apunta, por consiguiente, a la existencia de una fuente de calor dentro del mismo hormigón.

6.2. Sobre los desplazamientos

La repercusión de los fenómenos expansivos sobre los desplazamientos es, antes de que se produzca fisuración superficial visible, el aspecto que con más claridad denuncia la existencia de aquellos fenómenos. Sin embargo, ocurre con frecuencia que la detección de aquella repercusión, así como la determinación de la relación causa-efecto con el fenómeno expansivo, se hacen en una fase ya relativamente avanzada de éste.

Una situación que puede dificultar la detección de la repercusión antes referida es la manifestación simultánea de dos fenómenos expansivos en la presa y en la cimentación, cuyos efectos sobre los desplazamientos se contrarresten, dando los desplazamientos medidos una idea errónea de normal comportamiento. Efectos contrarios sobre los desplazamientos que pueden conducir a falsas ideas de normal comportamiento pueden también tener origen en la actuación simultánea de un fenómeno expansivo con fenómenos de otra naturaleza. En casos concretos se han detectado dos de estos fenómenos, que se citan a continuación: un aumento de la deformabilidad del hormigón, que puede incluso ser consecuencia de los efectos de las mismas expansiones; y actuación de fenómenos vibratorios.

Una tardía captación y comprensión del verdadero significado de situaciones como las que

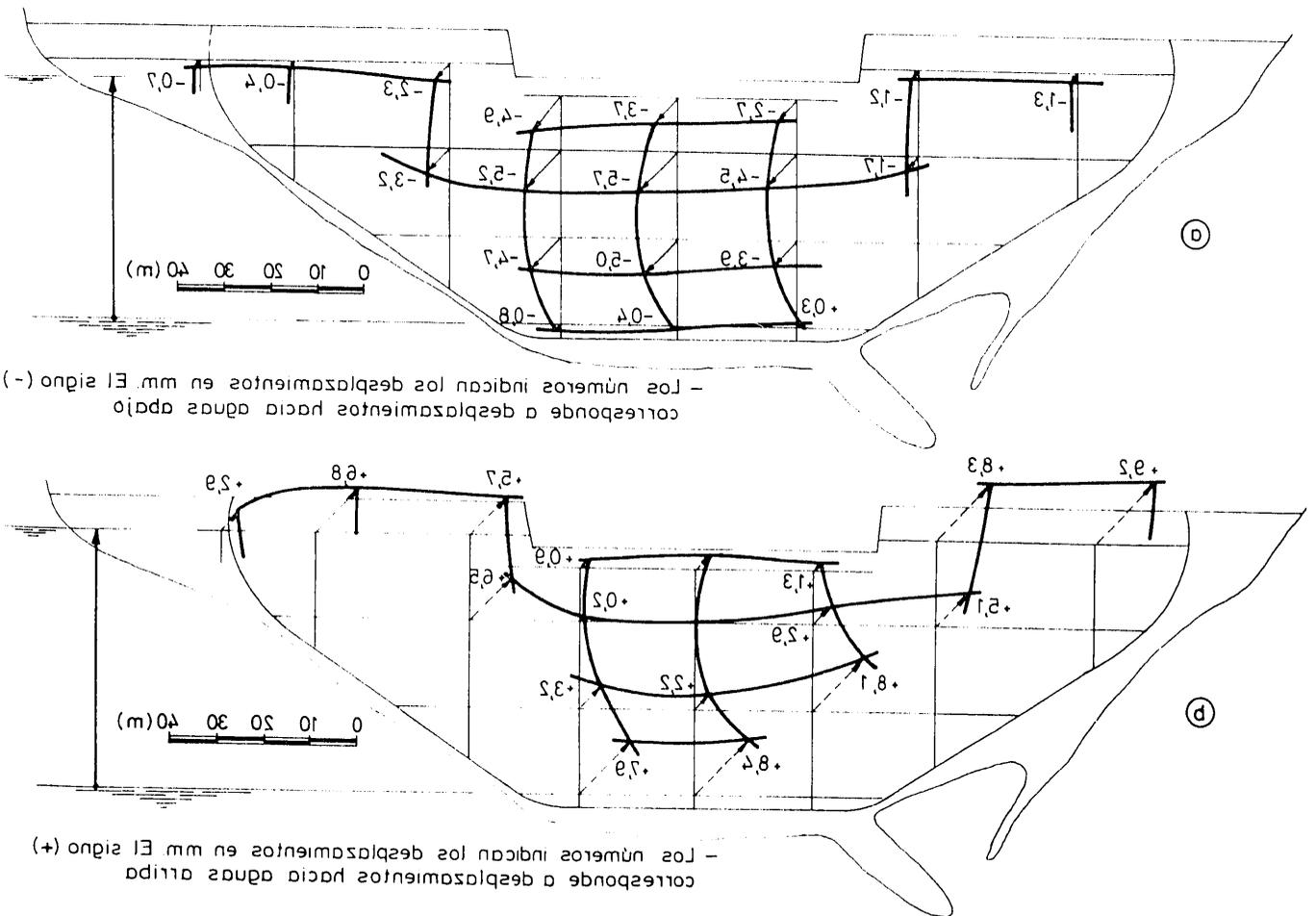


Figura 3.—Desplazamientos radiales de una presa bóveda debidos: En [a], a su rápida carga (1 mes); en [b], al final de 17 años: de permanente mantenimiento de la carga.

CONSIDERACIONES SOBRE EL COMPORTAMIENTO EXPANSIVO DEL HORMIGON DE PRESAS

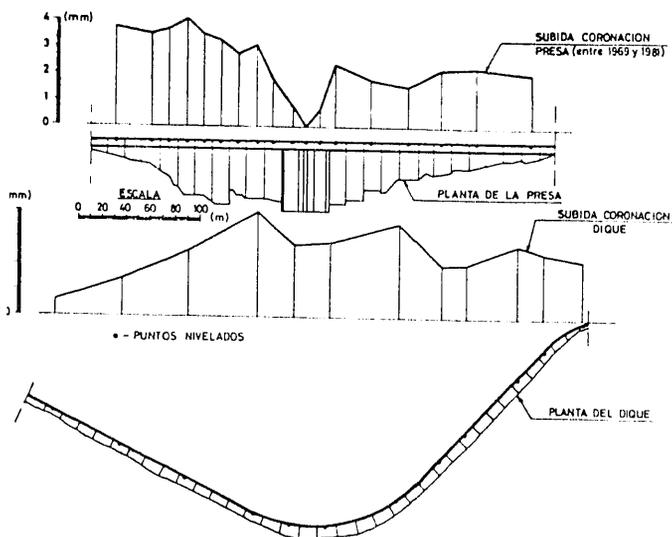


Figura 4. — Subidas de la coronación de los bloques de una presa de gravedad y de un dique lateral, entre 1969 y 1981, como consecuencia de fenómenos expansivos de su hormigón.

mientos hacia aguas arriba de la parte [b] de la figura.

Se hace notar que en el tercio central de la bóveda, en particular en su mitad superior, durante los 17 años de carga, se han desarrollado importantes desplazamientos hacia aguas abajo debidos a fenómenos dinámicos. También estos desplazamientos han sido contrarrestados por los debidos a la expansión, y a ello principalmente se debe el hecho de los pequeños desplazamientos hacia aguas arriba que la zona en cuestión presenta en la parte [b] de la figura.

En la fig. 4 se presentan los desplazamientos verticales medidos en la coronación de bloques de una presa de gravedad y de un dique lateral también de gravedad, en un período de 12 años (entre 1969 y 1981), debidos a fenómenos expansivos de su hormigón. Como en el caso de la fig. 3, las expansiones del hormigón se han venido desarrollando a un ritmo moderado relativamente a los casos de otras obras.

se acaban de referir, explica por qué se puede llegar a significativos daños estructurales en presas cuyos desplazamientos siempre han sido menores que los previstos en los estudios de proyecto y de modelo reducido.

En la fig. 3 se presentan los desplazamientos radiales de una presa bóveda debidos a su primera puesta en carga, la cual fue muy rápida ya que se efectuó en solo un mes. Dichos desplazamientos son los que corresponden a la parte [a] de la figura, pudiendo notarse que todos son hacia aguas abajo. En la parta [b] de la figura se presentan los desplazamientos exhibidos por la misma presa, en situación térmica idéntica a la existente al efectuar la primera carga, pero 17 años después, durante los cuales se mantuvo la carga hidrostática sobre ella. Se puede observar que todos los puntos presentan ahora desplazamientos hacia aguas arriba.

La completa modificación de la situación deformacional de la presa se debe a expansiones desarrolladas en su hormigón, expansiones que en este caso se han dado a un ritmo moderado en el transcurso de la vida de la obra. Los desplazamientos radiales debidos a la expansión han eliminado los iniciales hacia aguas abajo debidos a la carga hidrostática, así como los que debido a la fluencia del hormigón se han desarrollado a lo largo del tiempo, también hacia abajo, y todavía han producido los despla-

En la fig. 5 se puede apreciar la evolución de los desplazamientos verticales de dos puntos de la coronación de una presa de contrafuertes cuyo hormigón también fue afectado por expan-

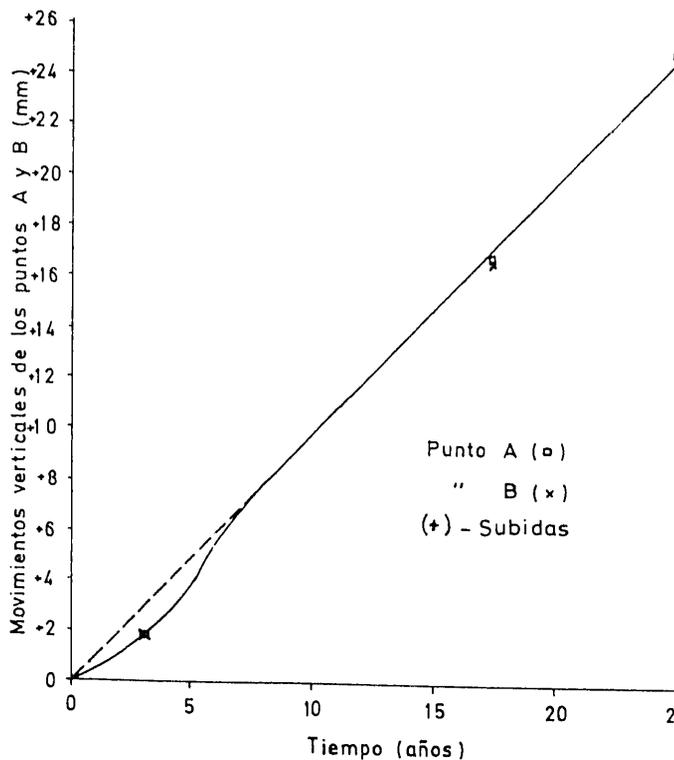


Figura 5. — Subida de dos puntos (A y B) de la coronación de una presa de contrafuertes, a lo largo de un período de 25 años, como consecuencia de fenómenos expansivos en su hormigón.

siones, éstas sí, desarrolladas a un ritmo más fuerte que en los casos anteriores. El período de observación es de 25 años, con inicio un poco después de la construcción de la presa. Nótese que la subida de ambos puntos es prácticamente lineal a lo largo del tiempo, con excepción de los primeros años de vida de la obra.

6.3. Sobre las deformaciones unitarias y tensiones

La fuerte distorsión provocada por las expansiones en la situación deformacional, distorsión que puede llegar a una completa modificación de aquella situación (como en el caso de la presa a que se refiere la fig. 3), es ya una indicación clara de que distorsiones de grado similar afectarán a las situaciones tensionales. En efecto así es, como lo demuestra la coexistencia, en ciertos casos, de muy elevadas compresiones (en ciertas direcciones) con tracciones suficientemente altas para provocar la fisuración del hormigón. Sin embargo, a través de los grupos de extensómetros no se llega a las verdaderas situaciones tensionales, por el motivo que se expone a continuación.

Mientras el hormigón que envuelve un grupo de extensómetros no sea afectado por fisuración, cada extensómetro activo de un grupo detecta con exactitud el sumando de la expansión que, para la dirección en que está emplazado y teniendo en cuenta el correspondiente coeficiente de restricción, se da libremente. Por supuesto, el sumando de la expansión que en esa dirección origina compresiones (y no deformaciones unitarias) no es detectado por el extensómetro. Al extensómetro corrector del grupo, por estar envuelto en hormigón completamente libre, cabe el papel de detectar la totalidad de la expansión. En efecto, así ocurre con las expansiones referidas en el apartado 3 y debidas a la existencia de cal o magnesia libres, así como con la expansión higrométrica. Pero el autor ha comprobado que lo mismo no ocurre con las expansiones que son objeto del presente trabajo.

En efecto, en general los extensómetros correctores detectan una expansión inferior a la de algunos de los extensómetros activos (los emplazados en direcciones con menor coeficien-

te de restricción). Ello se debe básicamente al hecho de que la velocidad de las reacciones que provocan los fenómenos expansivos es una función de la cantidad de agua que circula a través del hormigón. Aquella cantidad es evidentemente mucho mayor para el hormigón que envuelve los extensómetros activos, ya que para el hormigón que envuelve los extensómetros correctores el agua que en él penetra sólo puede circular saliendo por donde entró.

Además de todo lo antes referido, hay que tener en cuenta también que los extensómetros habitualmente usados en la constitución de los grupos tienen un reducido rango de medida de deformaciones unitarias positivas, en comparación con la magnitud de las expansiones que se detectan.

Todo ello conduce a que en la práctica, con la tecnología actualmente usada en la preparación de los grupos de extensómetros, a través de éstos se puede detectar en cierta medida el fenómeno expansivo, y asimismo acompañarlo hasta un cierto grado de su desarrollo. El uso de extensómetros de gran base ha venido permitiendo acompañar en varias obras, con resultados satisfactorios, toda la amplitud del fenómeno expansivo.

6.4. Sobre los movimientos de juntas

La experiencia existente muestra que la repercusión de los fenómenos expansivos sobre el comportamiento de las juntas es muy variada y compleja. En líneas muy generales hay que distinguir entre juntas inyectadas y no inyectadas. Además, hay que tener siempre bien presente que las juntas son elementos estructurales muy especiales y particularmente sensibles a lo que ocurre en la obra.

En el caso de juntas inyectadas, si hay fenómenos expansivos en el hormigón debidos a la percolación de aguas ácidas, antes de las manifestaciones de aquéllos surgen las del ataque de estas aguas a la lechada de relleno de las juntas. Estas últimas manifestaciones son de índole múltiple, y cabe destacar entre ellas algunas repercusiones características sobre el comportamiento de los medidores de juntas.

En el caso de juntas no inyectadas es lógico

CONSIDERACIONES SOBRE EL COMPORTAMIENTO EXPANSIVO DEL HORMIGON DE PRESAS

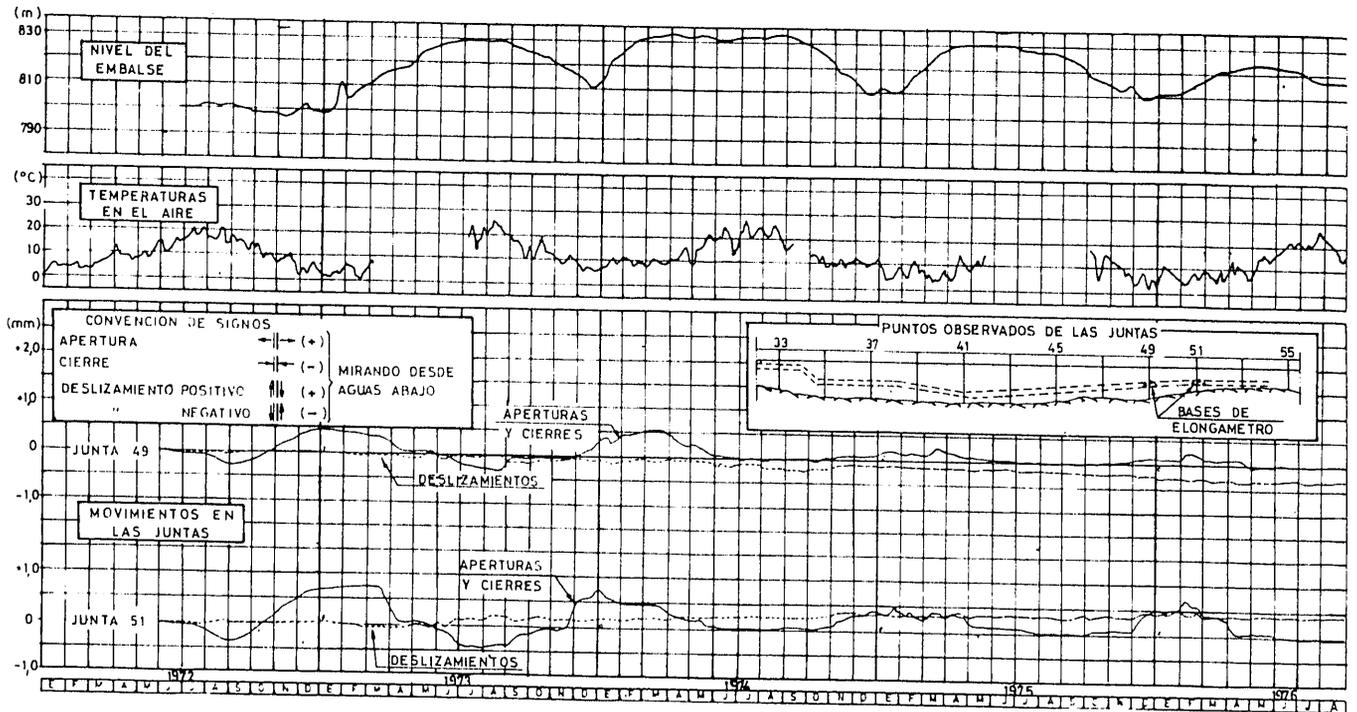


Figura 6. — Diagramas de movimientos de juntas con señales que indican la existencia de fenómenos expansivos en bloques de un dique de gravedad.

pensar que ellas cerrarán con las expansiones del hormigón. En efecto, así ocurre cuando la expansión, en los varios pares de tongadas contiguas que han formado los bloques, es aproximadamente la misma. Cuando la expansión varía mucho entre aquellos pares de tongadas, puede ocurrir que la junta abra en la zona de observación, aunque ésta se sitúe en tongadas que expanden. Ello ocurre cuando la junta ya está cerrada en zona de tongadas que han expandido, y siguen expandiendo, más que las tongadas donde se sitúa la zona de observación. El efecto de gato producido por la expansión de las tongadas que más expanden puede abrir la junta en la zona de observación.

Quando las expansiones son muy variables con las tongadas, los deslizamientos verticales suelen acusar esta situación a través de su progresiva evolución a lo largo de los años. La fig. 6 presenta diagramas de movimientos de dos juntas que indican la existencia de una de aquellas situaciones, precisamente a partir de la progresiva evolución de los deslizamientos.

7. ACTUACIONES RECOMENDABLES CUANDO SURGEN FENOMENOS EXPANSIVOS

Se ha visto que los fenómenos expansivos se desenvuelven a un ritmo más o menos rápido, pero en general, a la escala de los años, de forma continua y casi lineal. El tiempo cuenta, por consiguiente, de forma importante. Un año más, sin poder tomar las medidas que dominen aquellos fenómenos, es un paso importante dado en el camino de la producción de más daños. Aquel camino puede conducir a la pérdida de la propia obra, lo que ya ha ocurrido en algunos casos. El dejar pasar mucho tiempo puede conducir a situaciones en las que sea ya muy tarde para actuar con la eficacia que sería deseable. Cuando surgen fenómenos expansivos, el desconocimiento de sus causas obliga a una actitud pasiva en lo concerniente a decisiones y actuaciones que conduzcan a frenar el ímpetu y/o dominar aquellas causas. Se impone pues la apremiante necesidad de, lo más pronto posible, poder cambiar aquella actitud.

Con vistas a que, en cada caso particular, se pueda seguir el camino más conveniente, a continuación se indican, de forma sistematizada, un

conjunto de actuaciones recomendables. Todas las actuaciones que se indican han sido ya seguidas en casos concretos:

- En primer lugar hay que realizar un trabajo de interpretación de la información del sistema de auscultación, expresamente orientado al estudio más profundo de las manifestaciones del fenómeno expansivo.

Entre otros, son aspectos importantes de este trabajo; el inventario de las manifestaciones; la magnitud de las repercusiones; los períodos en que se dan; la correlación de las manifestaciones con la pluviometría y otros datos climáticos, así como con los niveles del embalse y la correlación con la mayor o menor protección, de las superficies expuestas, a la lluvia y a la radiación solar.

- En segundo lugar hay que realizar una serie de trabajos complementarios. Estos pueden ser:

- a) De laboratorio: exámenes en los microscopios óptico y electrónico de testigos y muestras del hormigón, áridos, aguas, roca de cimentación, etc.; análisis químicos; estudios mineralógicos por difracción de rayos X; ensayos de expansión sobre probetas; determinación del diámetro medio de los capilares de la pasta de cemento hidratada y de los poros capilares del gel; etc.
- b) A realizar en la obra: investigación de la situación del hormigón o de la roca, a través de la obtención de testigos por sondeos; refuerzo del sistema de auscultación, con vistas a la obtención de más información sobre las manifestaciones del fenómeno expansivo; medición de ciertos parámetros químicos del agua del embalse, de lluvias y de aguas de los drenes de la cimentación; y medidas ultrasónicas en el hormigón.
- c) A realizar en la oficina; cálculos especiales orientados al estudio de las repercusiones tensionales y deformacionales provocadas por los fenóme-

nos expansivos, así como al estudio de las repercusiones en la estabilidad y seguridad de parte o de la totalidad de la presa.

- El enfoque fundamental de todos estos trabajos debe ser el llegar al conocimiento o definición de: la causa o causas de los fenómenos expansivos; el grado de evolución de éstos; las medidas a tomar para frenar o evitar la continuación de la actuación de las causas que los provocan; y las actuaciones para reparar los desperfectos eventualmente ya existentes.

Para terminar este apartado, y puesto que ello puede influir muchísimo en las actuaciones que efectivamente se pongan en práctica, conviene dejar constancia de que en casos en que el fenómeno expansivo se detecte ya en una fase avanzada, más bien por sus manifestaciones visibles, como por ejemplo, la fisuración, es frecuente y normal la intervención de varios especialistas. Ello origina, con frecuencia, el planteamiento de otras posibles causas de la fisuración, asimismo la realización de los estudios y ensayos pertinentes. Aunque estos estudios y ensayos muchas veces ayuden a poner de manifiesto la existencia de las expansiones, incluso a apuntar la causa o causas primarias de éstas, lo cierto es que retrasan la aceptación unánime de los hechos, a veces durante varios años. No es de extrañar que así ocurra, dada la complejidad del conjunto de fenómenos, causas y consecuencias. Hasta estas últimas, a veces de índole diversa, pueden inducir a pensar en posibles causas distintas de las reales. La perfecta comprensión de los fenómenos en toda su complejidad exige la consideración simultánea, en la mente, de ciertos conocimientos muy especializados de varios campos de la física, de la química, de la geología, de la petrología, del comportamiento de materiales, del comportamiento de las presas, etc. Cuando todos aquellos conocimientos están presentes y se relacionan, muchos aspectos clasificados por algunos a lo sumo simples curiosidades y que a menudo son incluso pasados por alto, se transforman en evidencias de la verdadera naturaleza de los fenómenos y sus causas. El conjunto de anécdotas vividas por el autor alrededor de este tema, así como los pertinentes co-

mentarios, darían lugar, sólo por sí, a un interesante escrito.

8. OTRAS RECOMENDACIONES RELATIVAS AL TRABAJO DE AUSCULTACION

La experiencia adquirida en los estudios más completos realizados sobre los fenómenos expansivos, incluyendo sus causas, sus consecuencias y medidas a tomar, permitiría establecer algunas recomendaciones sobre determinados aspectos del proyecto de las presas, de su construcción e incluso de su explotación. El deseo de limitar lo más posible, el ámbito del presente trabajo al campo de la auscultación y comportamiento de las presas, conduce a que este apartado se ciña a algunas consideraciones, reflexiones y recomendaciones básicamente ligadas al trabajo de auscultación considerado en toda su amplitud.

A lo largo del trabajo se ha hecho referencia a alguna limitación de los actuales sistemas de auscultación en cuanto a la rápida y completa detección de los fenómenos expansivos, así como de la verdadera magnitud de las deformaciones unitarias que originan. En este sentido, cabe pues, recomendar que los futuros planes de auscultación tengan en cuenta la posibilidad de que se desarrollen aquellos fenómenos en la totalidad o parte de cualquier presa y su cimentación. Zonas particularmente sensibles son las de espesor reducido, en particular si un paramento está en contacto con el agua y el otro sufre una acentuada exposición solar, a lo largo de cada año, o está mucho tiempo en contacto con aire seco que circule. Las bóvedas delgadas, las cabezas de los contrafuertes y, en general, las zonas altas de las presas, están más expuestas a que en ellas se generen fenómenos expansivos.

Puesto que las subidas de temperatura habidas en el hormigón, cuando se desarrollan aquellos fenómenos, son una buena señal para su detección, en el estudio de la distribución de aparatos que miden temperaturas es conveniente tener este punto en cuenta. Ello tanto en el hormigón como en la cimentación.

En cuanto a los extensómetros a usar, convenía que dispusieran de un rango de medida

de deformaciones unitarias positivas muchísimo más alto que el usual. Existen ya extensómetros con estas características, aunque con una precisión inferior a la de los habituales usados. Hay que decir que la cuestión de la precisión deja de tener importancia cuando el objetivo es controlar grandes deformaciones unitarias.

En el subapartado 6.3 se ha visto que la metodología actualmente usada para la obtención de los extensómetros correctores de los grupos no es válida para el tipo de fenómenos expansivos en consideración. Esta metodología se basa en un dispositivo (9) usado por primera vez hace más de treinta años en presas portuguesas, posteriormente modificado por el autor (10). Se impone pues el desarrollo de un nuevo dispositivo que reúna, además de las características que hacían válido el dispositivo hasta ahora usado, las características necesarias para que lo sea también para los fenómenos expansivos. No parece que sea difícil concebir tal nuevo dispositivo, pero hace falta a continuación una importante labor de tipo experimental para comprobar su eficacia. La obtención de este nuevo dispositivo, unido al uso de los extensómetros referidos en el párrafo anterior, permitirían un más correcto acompañamiento de aquellos fenómenos, en términos de deformaciones unitarias, así como disponer de las deformaciones unitarias proporcionales a las tensiones.

Todo futuro plan de auscultación, cuya filosofía contemple la rápida detección y acompañamiento de los efectos de los fenómenos expansivos, debe tener también muy en cuenta los controles que al efecto convenga establecer en las juntas. Ello confiere una nueva dimensión al conjunto de medidas habitualmente tomadas para controlar los movimientos en las juntas.

La medición sistemática del pH de las aguas de lluvia, del embalse (en superficie y profundidad) y de los drenes, debe también ser establecida ya en los planes de auscultación. En algunos casos, además de la medición del pH, convendrá también medir el Eh. Haciéndolo, se obtendrá valiosa información preavisadora del desencadenamiento de posibles fenómenos expansivos.

Por último, es recomendable que el plan de auscultación contemple, desde un principio, la

conveniencia de realizar, en períodos bien definidos, ciertas medidas con una mayor frecuencia que la habitual. La experiencia muestra que, disponiendo de la información obtenible de esta forma, se puede abreviar en años la detección y comprensión de importantes aspectos del comportamiento impuesto por los fenómenos expansivos.

9. CONSIDERACIONES FINALES

Al poseer en general un sistema de auscultación, las presas de hormigón están relativamente bien defendidas de las indeseables sorpresas que pueden resultar de la progresión de los fenómenos expansivos. En efecto, si aquel sistema está capacitado para suministrar la pertinente información, se cumple una de las condiciones necesarias para un aviso a debido tiempo. La otra condición es que se inviertan los esfuerzos necesarios para que se trate e interprete correctamente aquella información. En este último aspecto es muy importante que los informes de interpretación del comportamiento vayan más allá de decir «qué es lo que pasa» (lo que ya no es poco), diciendo también «por qué pasa» (o indicando los caminos para saberlo), asimismo apuntando soluciones «para que no pase», si lo que pasa es, o puede venir a ser, dañino para la obra.

Actuando como antes queda indicado se caminará hacia la prevención respecto a los fenómenos en cuestión, pudiendo actuarse de forma profiláctica a través del impedimento del desarrollo futuro del fenómeno. Aunque cada caso sea distinto de los demás, presentando aspectos propios, todos ellos tienen solución para frenar drásticamente o impedir el desarrollo de futuras expansiones. Aunque así no fuese —idea que ya algún distinguido ingeniero de presas manifestó al autor, como apoyo de una eventual postura de indiferencia frente al fenómeno existente en una presa— la aparición de señales de fenómenos expansivos en una presa obligaría, por sí solo, a incrementar los esfuerzos en todos los campos del control de su comportamiento. Para concluir sobre ello, no hay más que pensar en las distorsiones de todo tipo que las expansiones provocan en el comportamiento de las presas, y que algunas de aquellas distor-

siones actúan en el sentido de reducir el margen de seguridad.

En el análisis e interpretación de la información de un sistema de auscultación, desde un principio es conveniente dar mucha atención a las sutiles señales denunciadoras de la existencia de fenómenos expansivos en el hormigón, o en la roca de cimentación. En este aspecto hay que tener mucha prudencia a la hora de juzgar la situación de un aparato que, a partir de cierta fecha, pasa a dar información distinta de la habitual. Con frecuencia esa información, no fiable en cuanto a la magnitud o magnitudes físicas que el aparato controla, sí es fiable en cuanto a que informa sobre una realidad física que afecta al hormigón del entorno del aparato. Es altamente inconveniente poner de lado tan valiosa información, cuando simplemente se considera el aparato «averiado» y se le olvida. Una avería aparente, incluso una avería parcial o total de uno o varios aparatos, puede estar ligada a manifestaciones de fenómenos expansivos. Es evidente que la experiencia alcanzada, en estos temas, por el especialista de interpretación, juega un papel fundamental en la rapidez con que se detecta aquella situación y se llega al conocimiento de sus causas.

El simple arreglo de los desperfectos, el actuar sólo sobre los efectos de los fenómenos y no sobre sus causas, no resuelven el problema: unos pocos años más, y la situación habrá empeorado sustancialmente, ello no obstante, aquellos arreglos. El no actuar a tiempo en el capítulo del combate a las causas puede conducir a la pérdida de la obra. Hay casos conocidos de presas puestas fuera de servicio con no muchas decenas de años de edad, además de bastantes obras en situaciones de mayor o menor deterioro.

Por último un comentario alrededor de la preocupación que un prestigioso proyectista manifestaba hace tiempo al autor. Después de hacer referencia a la circunstancia de que en los últimos años se hubiesen publicado muchos trabajos sobre fisuración en presas de hormigón, manifestaba la lógica preocupación de que ello pudiese, de forma injustificada y poco razonada, inclinar hacia las presas de materiales sueltos la balanza de la decisión en ciertos casos en que soluciones de hormigón tuviesen una viabilidad

igual, o incluso superior. El comentario es el que sigue:

Se ha visto que, para las expansiones tratadas en este trabajo, es básica la contribución de la meteorización de ciertos minerales de los áridos. Esos mismos minerales también existen en la escollera de muchísimas presas de materiales sueltos, escollera que está mucho más expuesta a las aguas agresivas que el árido del hormigón. Claro que las repercusiones de ambas meteorizaciones son distintas. Es opinión del autor que se deben considerar la expansión, e incluso la fisuración que viene después, como buenos avisos del hormigón que habría que agradecer, por permitir el inicio de actuaciones que conducen a la solución del problema. Cabe preguntar: ¿Cuál es el aviso que da la escollera? Quizás la respuesta sea que este aviso está en sus progresivos asentamientos, frecuentemente bastante acelerados en períodos de fuertes precipitaciones. Pero cabe preguntar todavía: ¿A dónde van los productos de la meteorización? ¿Qué se irá formando con el tiempo por encima de la superficie de cimentación? ¿Qué consecuencias pueden resultar?

Aparte de otros importantes aspectos que actuarán en el mismo sentido, es de suponer que una concienzuda meditación sobre las cuestiones planteadas arrojará algún peso en el plato «hormigón», de la balanza de la decisión, para inclinar ésta hacia aquella solución. Ello siempre que las viabilidades técnico-económicas de ambas soluciones fuesen las antes señaladas.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. SERAFIM, J. L. y GUERREIRO, M.: «Expansions autogène et hygrométrique du béton en grandes masses», Colloque international sur le retrait des bétons hydrauliques, RILEM, marzo 1968, Madrid.
2. SERAFIM, J. L. y GUERREIRO, M.: «Autogeneous and hygrometric expansion of mass concrete», Journal of A.C.I., septiembre 1969.
3. DURIEZ, M. et ARRAMBIDE, J.: «Nouveau traité de matériaux de construction, 2.^a edición, Dunod, Paris, 1961.
4. «Enciclopedia Salvat de la ciencia y de la tecnología», vol. 9, 1.^a edición, Salvat Editores, 1961.
5. RICZOK, I.: «Corrosión y protección del hormigón», Traducción de 6.^a edición, Ediciones Urmo, 1972.
6. MEISSNER, H. S.: «Expansive cracking in concrete dams caused by reactive aggregate and high-alkali cement», 3rd International Congress on Large Dams, Stockholm, junio 1948, O. 11, paper 47.
7. PIKE, R. G.: «Pressures developed in cement pastes and mortars by the alkali-aggregate reaction», Highway Research Board Bulletin, n.º 171, 1958.
8. COMMITTEE ON DETERIORATION OF DAMS AND RESERVOIRS: «Deterioration cases collected and their preliminary assessment», ICOLD, octubre 1979.
9. SERAFIM, J. L.: «Measurement of strains in the Portuguese concrete dams», RILEM Symposium on the observation of structures, 1955, Lisboa.
10. GUERREIRO, M.: «Observation of the behaviour of Cambambe Dam. Experience and some results obtained», 8th International Congress on Large Dams, Edinburgh, 1964, C. 18.