

COMITÉ NACIONAL ESPAÑOL DE GRANDES PRESAS

REACCIONES EXPANSIVAS EN EL HORMIGÓN DE VARIAS PRESAS. LOCALIZACIÓN Y DIAGNÓSTICO

Rodrigo del Hoyo¹

César Mayoral²

David Pérez³

Fernando Martínez⁴

Manuel F. Herrador⁵

RESUMEN: Los problemas expansivos que se pueden presentar en el hormigón de una presa están originados por determinadas reacciones químicas. Entre estos ataques químicos se incluye una reacción entre los álcalis y la sílice, en presencia de agua, denominada "Reacción álcali-árido" que da origen a la formación de geles expansivos.

Se exponen en esta comunicación las investigaciones y estudios desarrollados para llegar a diagnosticar que las causas de la expansión detectada en las presas de Salas, Belesar y en el aliviadero de Portodemouros son reacciones Alkali-Arido.

¹ Dr. Ingeniero de Caminos. Universidad de A Coruña

² Ingeniero de Caminos. Socoin

³ Ingeniero de Caminos. Unión Fenosa Generación

⁴ Dr. Ingeniero de Caminos. Universidad de A Coruña

⁵ Dr. Ingeniero de Caminos. Universidad de A Coruña

1. INTRODUCCIÓN

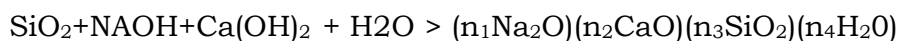
Generalmente, los problemas expansivos persistentes que se pueden presentar en el hormigón de una presa están motivados por determinadas reacciones químicas, no excesivamente frecuentes, que se desarrollan en su interior.

Entre los ataques químicos se incluyen las reacciones con los sulfatos, que se producen cuando iones SO_4^- se ponen en contacto con los aluminatos de calcio hidratados, originando el sufoaluminato de calcio hidratado o ettringita ($3\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - 3\text{CaSO}_4 - 32\text{H}_2\text{O}$), que provoca fuertes expansiones en el hormigón al ser su volumen superior al del aluminato de partida. Los cristales aciculares de ettringita son característicos y fácilmente identificables con el microscopio.

Los sulfatos pueden encontrarse en el terreno y estar en contacto con la cimentación, o bien formarse a partir del SO_2 existente en la atmósfera, y también por la oxidación de sulfuros, especialmente de los sulfuros de hierro (Pirita y Pirrotita).

En los años 1940 y 1942 Stanton publicó en Estados Unidos dos trabajos en los que se hacía referencia al deterioro provocado por un fenómeno expansivo en ciertos hormigones con áridos síliceos a causa de una reacción entre los álcalis del cemento y la sílice, en presencia de agua. Por este motivo, a esta reacción la denominó "Reacción álcali-árido".

El esquema del proceso de la reacción álcali-áridos síliceos, lo estableció Plum a finales de los años cincuenta de acuerdo con la siguiente reacción.



En esta época se consideraba que la sílice reactiva tenía que ser una sílice amorfa o mal cristalizada que se encontraba en los áridos. El aporte de los álcalis se achacaba fundamentalmente al cemento. De esta forma se intentaron establecer unos ensayos para determinar la reactividad potencial de los áridos y se limitó la cantidad de álcalis del cemento.

En los años 1978 y 1982 Aardt y Visser en Sud Africa; Cole y otros en Australia y Katroka y Glasser en Escocia publicaron las investigaciones realizadas sobre la influencia del hidróxido cálcico de la pasta de cemento sobre los áridos con feldespatos alcalinos más o menos alterados.

Como resultado de todas estas investigaciones se deduce que el hidróxido cálcico juega un papel muy importante en la formación de geles expansivos y, como consecuencia de su presencia en la pasta de cemento y de su libertad de moverse y reaccionar con determinados áridos, da origen a la formación de álcalis a partir de los áridos. Esto quiere decir que aunque el contenido en álcalis del cemento sea bajo también puede producirse una reacción tipo álcali-árido.

Generalmente las reacciones álcali-sílice se clasifican en dos grupos:

- Reacción álcali-sílice amorfa, 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 (por ejemplo los feldespatos) y la solución alcalina. En este tipo de reacciones, que pueden tener lugar con los feldespatos y con los minerales de las intercapas de los filosilicatos, el hidróxido cálcico juega un papel importante.

El hormigón endurecido está compuesto por áridos rodeados de una pasta de cemento en la que existen poros rellenos de una solución con pH variable entre 12,5 y 13,9, según el contenido en álcali del cemento. En el agua que llena los poros hay también iones Ca^{2+} , Na^{+} , K^{+} , y SO_4^{2-} .

La reactividad de las partículas de árido depende de cómo esté constituida la estructura cristalina. El cuarzo está formado por tetraedros con el Si en el centro y O en los vértices. El encadenamiento de estos tetraedros por los vértices forma estructuras cristalinas muy estables; no obstante, se encuentra en la naturaleza estructuras de este tipo alteradas, por ejemplo, por esfuerzos tectónicos que rompen la estructura cristalina del cuarzo, cosa que se manifiesta por la “extinción ondulante”, detectada en un estudio óptico con luz polarizada.

La reacción se puede representar como una penetración de iones OH, Na y K en la estructura desordenada de la sílice.

Urhan en 1987 describe esta reacción como una competición entre la disolución de sílice y la formación de silicato cálcico hidratado (CSH). Al comienzo del proceso de hidratación del cemento, los iones calcio, sodio, potasio e hidróxilo son absorbidos por la superficie del árido reactivo. El ataque del ion hidróxilo causa la disolución de la sílice en la superficie del árido.

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 continua 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 hidróxilo conduce a la polimerización de la sílice disuelta, lo que produce los geles expansivos.

El mecanismo de la expansión puede explicarse por la absorción de agua por parte del gel de sílice con álcalis, debido a la similitud geométrica de la molécula del agua “tetraédrica” con la unidad sílice-oxígeno. Si la absorción es rápida y el volumen aumenta a más velocidad que la posible disipación del gel en los poros, se producen tensiones internas y como consecuencia microfisuración y expansión.

Otra teoría es que la pasta de cemento actúa como una membrana semipermeable hacia los iones de silicato. La penetración de la trama de sílice por el fluido de los poros con agua e iones, implica un aumento de presión en la zona reactiva. Esta hipótesis falla, evidentemente, cuando se fisura la pasta y no puede actuar como membrana.

Chatteji y otros han puesto de manifiesto la gran influencia que tiene en la reacción la presencia de iones Ca.

Se ha dicho que se produce una entrada de iones OH, K⁺, Na⁺ y Ca²⁺ en el árido reactivo. La penetración depende del tamaño de los iones y de la formación de CSH (silicato cálcico hidratado) en la superficie del grano, que frena la penetración. Tienen más facilidad de penetrar los iones K y Na que Ca por ser más grande éste último. Los iones K, Na y (OH) se difunden en el grano reactivo, dejando el Ca en la fase líquida. Al mismo tiempo, al romperse la estructura de la sílice por esta penetración de iones, ésta emigra disuelta y el ritmo de esta migración depende de la existencia de Ca(OH)₂. En las investigaciones de Chatterji y Clausson-Kass (1984) se ha visto que si no hay Ca(OH)₂ no hay expansión.

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.

Entre los factores que afectan el desarrollo de la reacción, y por tanto la expansión, se pueden citar los propios del material que constituye el hormigón y las acciones externas, tanto ambientales como estructurales.

Por un lado se tiene, en relación con el cemento, la cantidad de álcalis expresados en Na₂O equivalente siendo (Na₂O) equivalente = Na₂O + 0,658 K₂O, que, en principio se considera debe ser inferior a 0,6% del peso del cemento. De todas formas esta limitación no es suficiente ya que los álcalis pueden proceder de los áridos.

En cuanto a los áridos, los amorfos (ópalo) o criptocristalinos suelen ser más reactivos en cuanto a la sílice que los cristalinos. De todas formas se ha observado que el cuarzo con la estructura cristalina dañada a causa de esfuerzos tectónicos, lo que se mide por su extinción ondulante, es reactivo (el ángulo de extinción con luz polarizada varía de unas zonas a otras en más de 25°).

Los feldespatos alcalinos y calco-alcalinos que se encuentran en áridos graníticos, cuando están alterados por reacciones químicas (en muchas ocasiones por ataque de aguas ácidas que pueden ser en determinados casos las aguas de lluvia) son altamente reactivos. Es de destacar que estos feldespatos, lo mismo que los filosilicatos alterados, son capaces de suministrar, no solamente la sílice reactiva, sino los álcalis necesarios para la reacción. También cuanto menor sea el tamaño de los áridos, más fácil es que se desarrolle la reacción.

Entre los factores externos se puede citar la humedad, ya que por un lado se necesita agua para que se produzca la reacción y se forme un gel, y por otra parte el agua es el producto que alimenta la expansión al ser incorporadas sus moléculas a la estructura del gel ya formado.

2. LOCALIZACIÓN DEL PROBLEMA

En Se exponen a continuación los casos de tres presas en los que se han detectado problemas expansivos.

2.1 PRESA DE SALAS



1. PRESA DE SALAS

La presa de Salas es una presa de contrafuertes, de 50 m de altura, a la que se añade una presa de gravedad de 18 m de altura máxima. La presa se construyó entre 1969 y 1973, con áridos graníticos.

En 1975 se observaron fisuras en algunas tongadas de tres o cuatro contrafuertes en el paramento de aguas abajo. Teniendo en cuenta la situación de las tongadas fisuradas, la disposición de juntas en los contrafuertes y las características de la cimentación, se pensó que las fisuras podrían estar causadas por asentamientos diferenciales entre la parte de aguas arriba y la de aguas abajo de los contrafuertes fisurados. Por este motivo se programó un refuerzo del tratamiento de la cimentación a base de inyecciones de lechada de cemento y una ampliación del drenaje de algunos contrafuertes, lo que obligó a bajar notablemente la cota del embalse.

Aprovechando esta bajada del embalse se localizaron varias tongadas fisuradas en el paramento de aguas arriba, después de una detallada inspección del mismo.

El hecho de que todas las fisuras localizadas en los contrafuertes y en los bloques de la presa de gravedad se situaran en tongadas hormigonadas en la segunda mitad del mes de agosto de 1970, como el que se presentaran tanto en bloques de gravedad de escasa altura como en contrafuertes a distintas cotas, llevó a la conclusión de que su causa no era de la cimentación ni estructural, sino de las características intrínsecas del hormigón fabricado en esos días.

Mediante nueva instrumentación (extensómetros, nivelaciones, etc), se comprobó la existencia de un problema expansivo en esos hormigones y se orientó la investigación a determinar sus causas.

2.2 ALIVIADERO DE LA PRESA DE PORTODEMOUROS

La presa de Portodemouros es una presa de materiales sueltos con núcleo de arcilla de 93 m de altura y 460 m de longitud de coronación.

El aliviadero lateral situado en la margen izquierda y contiguo a la coronación de la presa es de labio fijo con reducida lámina vertiente y 130 m de longitud. Dispone de una cubeta tranquilizante de la que parte el canal de descarga sobre el que se ha construido un puente para restablecer la carretera de coronación de presa.

Este aliviadero constituye realmente una presa de gravedad de unos 20 m de altura máxima que está provista de una galería situada unos 2 m sobre su cimentación.



2. ALIVIADERO PRESA DE PORTODEMOUROS

A finales de 1973 se localizan algunas fisuras en el hormigón de la galería del aliviadero. En 1976 y años sucesivos se instalan bases de elongómetro para medir la evolución de dichas fisuras.

En diciembre de 1976 se observa un incremento importante en los caudales filtrados a través de los drenes de cimentación en esta galería, lo que aconseja realizar un tratamiento de la cimentación del aliviadero. Al mismo tiempo (Junio de 1977) se inyectaron las fisuras del hormigón con resinas.

En años sucesivos continuaron los movimientos de apertura de las fisuras citadas y aparecieron otras nuevas.

En 1979 se realizó un primer estudio estructural del que se deduce que las acciones de empuje hidrostático, de tierras y peso propio, incluso con un fallo de la cimentación, no provocan tensiones suficientes para producir la fisuración existente. Únicamente el gradiente térmico podría tener una cierta influencia en el fenómeno, a pesar de que las tensiones que genera no lo justifi-

can por sí solas. Se decide ampliar el sistema de auscultación para controlar el comportamiento de la cimentación y reforzar los dos primeros bloques cajeros del canal de descarga, sobre los que se apoya la presa, mediante anclajes pasivos (sin tensar). Estos anclajes se terminaron en la primavera de 1980. En esta misma época se inyectaron nuevamente algunas fisuras con resinas.

En el verano de 1981 se instalan varios aparatos de auscultación entre los que se incluye un extensómetro Carlson de 1,5 m de longitud, por sospecharse que la causa de la fisuración podría ser debida a una expansión del hormigón.

En 1983, se realiza un ensayo de liberación de tensiones, del que se deduce que hay unas tensiones de compresión importantes en la dirección del eje de la galería del aliviadero.

En Mayo de 1984 se incrementan nuevamente los dispositivos de auscultación con extensómetros de gran base, extensómetros de varilla, clinómetros, medidores de convergencia en galería y comparadores.

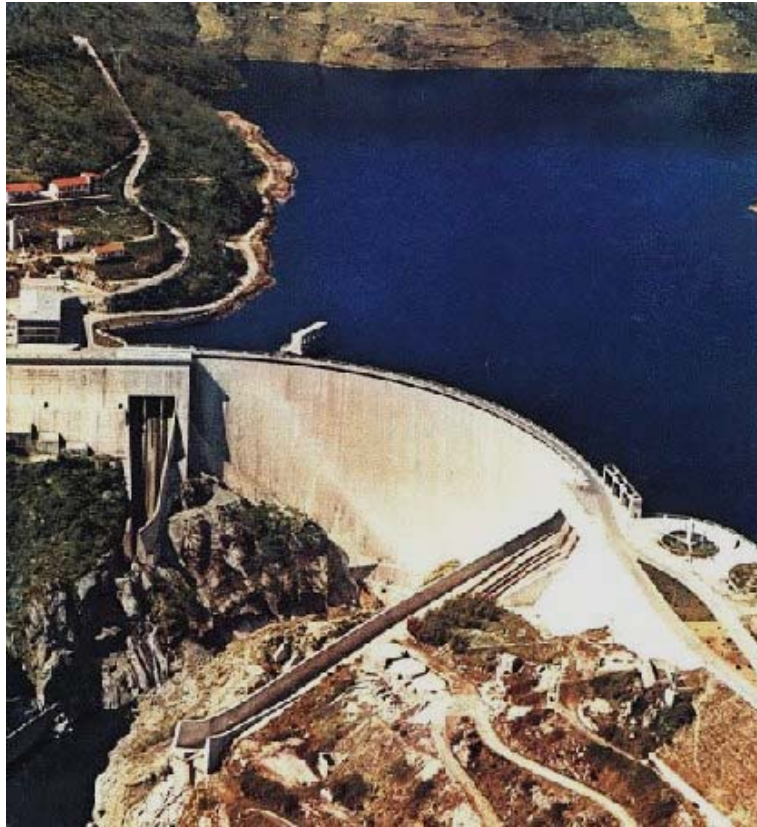
Como resumen de las conclusiones obtenidas de la observación de los distintos dispositivos de auscultación a que se ha hecho referencia se puede decir que la causa principal que provoca la fisuración es un fenómeno expansivo en el hormigón del aliviadero.

2.3 PRESA DE BELESAR

La presa de Belesar es una presa arco de 130 m de altura constituida por arcos circulares de curvatura variable. La construcción de la presa se terminó el 1963 y está dotada de multitud de equipos de auscultación (péndulos, extensómetros Carlson, medidores de juntas, termómetros, piézómetros, etc.).

En el análisis del comportamiento de la presa realizado en 1992, en el que se estudiaron los datos facilitados por los equipos de Auscultación desde su entrada en servicio hasta la citada fecha, se observa que los péndulos indican que la presa sufre un desplazamiento irreversible hacia aguas arriba, que se inicia entre 1981 y 1983 y continúa en la actualidad. Los movimientos detectados en las juntas mediante los medidores o bases de elongómetros son concordantes con los desplazamientos de los péndulos.

Del análisis de los extensómetros eléctricos tipo Carlson embebidos en el hormigón y fundamentalmente a partir de los extensómetros correctores se deduce que muchos de ellos detectan expansiones irreversibles con valores que varían entre 5×10^{-6} y 25×10^{-6} al año.



3. PRESA DE BELESAR

Se amplió a partir de 1993 el sistema de auscultación realizando triangulaciones de precisión que confirman los movimientos de los péndulos en años posteriores, instalando extensómetros de hilo de invar entre coronación y galerías, aprovechando los pozos de los péndulos, con el fin de medir a gran escala las expansiones, así como extensómetros bimetal (dos varillas) situados horizontalmente en galerías y de unos 5 m de longitud, con la misma finalidad.

También se realizan nivelaciones de precisión, y se inician estudios conducentes a determinar la causa del fenómeno expansivo.

3. DIAGNÓSTICO

Se desarrollaron estudios por parte del Laboratorio Central de Estructuras y Materiales del CEDEX en los casos de Salas y Portodemouros, y por el Dr. Alonso Ramírez, apoyado en el citado Laboratorio en el caso de Belesar. En todos los estudios se realizan análisis químicos de los materiales y del hormigón, análisis petrográficos de los áridos y difractométricos, ensayos de estabilidad frente a soluciones de NaOH, KOH y Ca(OH)_2 análisis de microfotografías realizadas con microscopio electrónico, análisis micropuntuales y de espectrometría infrarroja, que permiten deducir que las causas de los fenómenos expansivos son los que a continuación se citan:

3.1 PRESA DE SALAS

Los fenómenos de expansión observados se deben a la formación de geles amorfos de gran volumen molecular por la gran cantidad de agua incluida en su estructura.

Determinados áridos silíceos han reaccionado con el Ca(OH)_2 liberado en la hidratación del cemento portland, provocando la salida de sílice, aluminio, hierro y especialmente potasio, de los granos de árido, así como la entrada de calcio en los mismos.

Como consecuencia de ello se originan, en la interfase árido-pasta, geles voluminosos que dan lugar a fuertes presiones internas en el seno del hormigón endurecido, mediante reacciones álcali-árido secundarias.

De lo anteriormente expuesto, se deduce que las alteraciones observadas en el hormigón de algunas zonas de la presa de Salas son debidas a expansiones que hay que atribuirles a causas fisico-químicas, de naturaleza puntual, localizadas en regiones del hormigón en las que el hidróxido cálcico originando en los procesos de reacción del cemento con el agua, ha interactuado con granos de áridos reactivos.

3.2 PRESA DE PORTODEMOUROS

Los áridos utilizados son pizarras constituidas por materiales inestables, capaces de experimentar reacciones con los componentes del cemento y con cationes propios de los mismos, sufriendo fenómenos de intercambio. Estos se ven favorecidos por la abundante presencia de iones de calcio (Ca^{++}) procedentes del Ca(OH)_2 liberado en la hidratación del cemento portland.

Este tipo de áridos ha propiciado la formación simultánea de geles expansivos y de cristales aciculares de etringita o sulfoaluminato tricálcico hidratado, dotados también de gran capacidad expansiva.

Parte de los silicatos descompuestos provoca reacciones de tipo álcali-árido, secundario. Los silicatos y silicoaluminatos que constituyen los geles formados, así como la sílice amorfa ($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$), presentan la capacidad de provocar reacciones con los álcalis circundantes.

La gran pureza de las aguas del embalse con su enorme capacidad de disolución, disuelven y arrastran el hidróxido cálcico originado en la hidratación de los silicatos del cemento portland. Este fenómeno produce un aumento de huecos en el seno del hormigón, facilitando aún más la penetración del agua. El arrastre se hace extensivo a los diferentes productos de descomposición de los áridos.

3.3 PRESA DE BELESAR

Considerando la totalidad de los resultados dados por las diferentes técnicas de investigación utilizadas para el estudio se deduce que los responsables directos de los fenómenos de fisuración en la Presa de Belesar son los áridos del hormigón, que son rocas graníticas consideradas como granodioritas debi-

do al contenido superior de feldespatos calcosódicos (plagioclasas) sobre los feldespatos potásicos.

Su composición química no tiene características desfavorables, salvo el poseer los alcalinos un poco elevados, lo que puede favorecer una reacción álcali-sílice secundaria.

Prácticamente todas las muestras de rocas poseen cuarzos con redes cristalinas muy distorsionadas y extinción ondulante, lo que, unido a la elevada cantidad de Ca(OH)_2 libre, favorece las reacciones de la portlandita con el cuarzo y con los feldespatos, muy alterados estructuralmente. Así, las plagioclasas han movilizad los iones Na^+ y Ca^{++} y las ortoclasas (especialmente microclina), se han transformado en ilitas y sericitas. También las micas se encuentran considerablemente alteradas.

Existen en estas rocas pequeñas cantidades de sulfuros, especialmente piritita, que han podido pasar a sulfatos en el transcurso del tiempo (más de 30 años), originando la formación de sulfoluminatos, aunque en pequeñas proporciones.

Las fisuraciones, tanto intergranulares como intragranulares, dan lugar a vías de acceso para el desplazamiento de los iones, especialmente N^+ , K^+ , y Ca^{2+}

Asimismo, se comprobó que, junto a los procesos de fisuración por reacciones de tipo álcali-sílice, secundarios, se han producido fenómenos de carbonatación del Ca(OH)_2 originado por la hidratación de los silicatos del cemento portland, formándose en las zonas exteriores de la presa redes de fisuras debidas a la aparición del carbonato de calcio (CaCO_3), con la consiguiente reducción de volumen frente al hidróxido de calcio.

La difracción de rayos X puso de manifiesto la presencia de geles, sílice amorfa, ceolitas expansivas, así como la existencia en el hormigón, además de las tobermoritas de hidrogranates sílice amorfa, ceolitas de tipo A, posiblemente algo de mineral trona, ettringita, halos amorfos, etc.

4. CONCLUSIÓN

En relación con los problemas expansivos que puedan presentarse en presas de hormigón con áridos síliceos y de acuerdo con la experiencia obtenida en las presas antes comentadas, se puede decir lo siguiente:

1. En general la expansión esta provocada por las presiones derivadas de los geles que se forman al reaccionar los álcalis con la sílice reactiva, reacción en la que juega un papel importante el hidróxido cálcico existente en el hormigón producto del fraguado del cemento, o bien por la formación de ettringita a causa de la presencia de sulfato, que puede derivar de la oxidación de sulfuros ó de otras procedencias.
2. El problema expansivo en una presa de hormigón se pone de manifiesto bien en las inspecciones visuales rutinarias al localizar fisuras sin justificación estructural, o bien del análisis de la información facilitada por los equipos de auscultación, a través de la existencia de desplazamientos irreversibles detectados por los péndulos hacia aguas arriba o de la elevación

también irreversible de determinados puntos de la coronación, puesta de manifiesto en las nivelaciones.

3. La determinación de la tasa de expansión, en general anisótropa, se puede deducir de las deformaciones de los extensómetros, tanto eléctricos como de cuerda vibrante instalados en el hormigón, mediante extensómetros de hilo de invar, situados en pozos de péndulos y con medidas entre galerías, mediante extensómetros bimetálicos, etc.

Los extensómetros, tanto eléctricos como de cuerda vibrante que permiten determinar la expansión libre del hormigón son los correctores que deben incluirse en los grupos de extensómetros, y que las únicas acciones a que están sometidos es a las térmicas y a las endógenas del propio hormigón.

4. El diagnóstico de las causas de la expansión se detecta en primera aproximación, por los depósitos de gel alrededor de determinados áridos, por protuberancias localizadas en testigos obtenidos mediante sondeos de un hormigón sospechoso, producto del gel solidificado, cuando la causa es una reacción tipo álcali-silice. Si la expansión es debida a la producción de ettringita la detección a simple vista es más difícil.

De todas formas se requieren análisis profundos en laboratorios especializados en los que además del análisis químico, se utilizan técnicas tales como la difracción por rayos X, la espectrometría infrarroja de algunos materiales, microscopía tanto óptica como electrónica, etc. etc, y fundamentalmente la planificación, desarrollo e interpretación de estos ensayos por técnicos de reconocida solvencia en la materia.