

Evaluation of the behavior of concrete gravity dams suffering from internal sulfate attack

Comportamiento de presas de gravedad de hormigón con problemas de ataque interno por sulfatos



ARAÚJO, G. S.^a
georgiaserafim@hotmail.com

CHINCHÓN, S.^b
s.chinchon@ua.es

AGUADO, A.^c
antonio.aguado@upc.es

Abstract

Herein is described a methodology developed to evaluate concrete expansion and consequent abnormal behavior in gravity dams suffering from internal sulfate attack. The work presented here encompasses the analysis, in different phases, of three Spanish dams plagued by sulfate reactions.

The aggregate and concrete of the Torán dam were characterized at a microscopic level. The principal iron sulfides and the products resulting from oxidation of the aggregate, and the products of the subsequent sulfate attack of the concrete were all identified. Moreover, macrostructural studies of the upstream displacement observed in the Graus and Tavascán dams were performed using a mathematical model.

Keywords: internal sulfate attack, expansion, gravity dam, pyrrhotite, aggregate.

Resumen

En este trabajo se presenta la metodología seguida con vistas a evaluar la expansión del hormigón debido al ataque sulfático interno y su repercusión en el comportamiento anómalo de presas de hormigón de gravedad. Para ello se presenta el análisis, en distintas fases del estudio, de tres presas españolas afectadas por las reacciones sulfáticas.

En el nivel microscópico se ha procedido a la caracterización del árido y del hormigón de la presa de Torán, identificando el principal sulfuro de hierro y los productos generados en el proceso de alteración del árido y su posterior ataque al hormigón. Por otro lado, el estudio en el nivel macroestructural de los movimientos remanentes observados se hace mediante un modelo matemático aplicado a las presas de Graus y Tavascán.

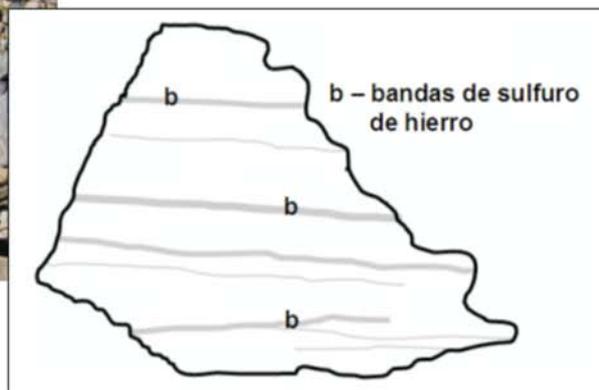
Palabras-Clave: ataque sulfático interno, expansión, presa de gravedad, pirrotina, árido.

^a Centro Federal de Educação Tecnológica do Espírito Santo (Brazil) – CEFETES, Universitat Politècnica de Catalunya, e-mail: georgiaserafim@hotmail.com, Barcelona, Spain.

^b Profesor Dr. Ing., Departamento de Construcciones Arquitectónicas, Universidad de Alicante, e-mail: s.chinchon@ua.es, Alicante, Spain.

^c Profesor Dr. Ing., Departamento de Ingeniería de la Construcción, Universitat Politècnica de Catalunya, e-mail: antonio.aguado@upc.es, Barcelona, Spain. Address: Universitat Politècnica de Catalunya, C/ Jordi Girona, 1-3, Campus Nord, Edificio C1, 08034, Barcelona, Spain.

Figura 1 - Aspecto de la muestra de roca y representación esquemática de las bandas de sulfuro



1. Introducción

Conocer las características del hormigón y de sus constituyentes es de gran importancia a la hora de evaluar las anomalías presentadas por las estructuras ejecutadas con este material. En el caso particular de obras que requieren grandes volúmenes de hormigón como las presas, el árido es un componente al que hay que dedicar especial atención ya que puede contener minerales que sean potencialmente inestables en los procesos de meteorización o que, como consecuencia de la reacción con los componentes del cemento, den lugar a compuestos expansivos. Un ejemplo son los sulfuros de hierro que, bajo determinadas condiciones de disponibilidad de humedad y oxígeno, pueden oxidarse y causar la expansión del hormigón. En estructuras como las presas de hormigón de gravedad, dicha expansión se manifiesta mediante la aparición de fisuras mapeadas, cambio de coloración superficial del hormigón, atasco de partes móviles y movimientos no recuperables. Este trabajo tiene como objeto presentar una propuesta de metodología de estudio de presas de hormigón afectadas por el desarrollo de reacciones sulfáticas de origen interno, explicando que el comportamiento anómalo observado es un reflejo de lo que se observa en un nivel microestructural. Para ello se muestran las distintas fases del estudio

aplicadas al caso real de tres presas ubicadas en el Pirineo Catalán (España). Inicialmente se verifica el origen del fenómeno mediante la caracterización del árido y del hormigón de la presa de Torán realizando una campaña experimental en la que se han empleado distintas técnicas de laboratorio como son la microscopía electrónica de barrido (MEB) con microanálisis (EDAX), la difracción de rayos X (DRX) y la fluorescencia de rayos X (FRX). A continuación se verifica la repercusión de las expansiones en el nivel macroestructural, a través de un modelo matemático aplicado a los movimientos no recuperables observados en coronación de las presas de Graus y Tavascán.

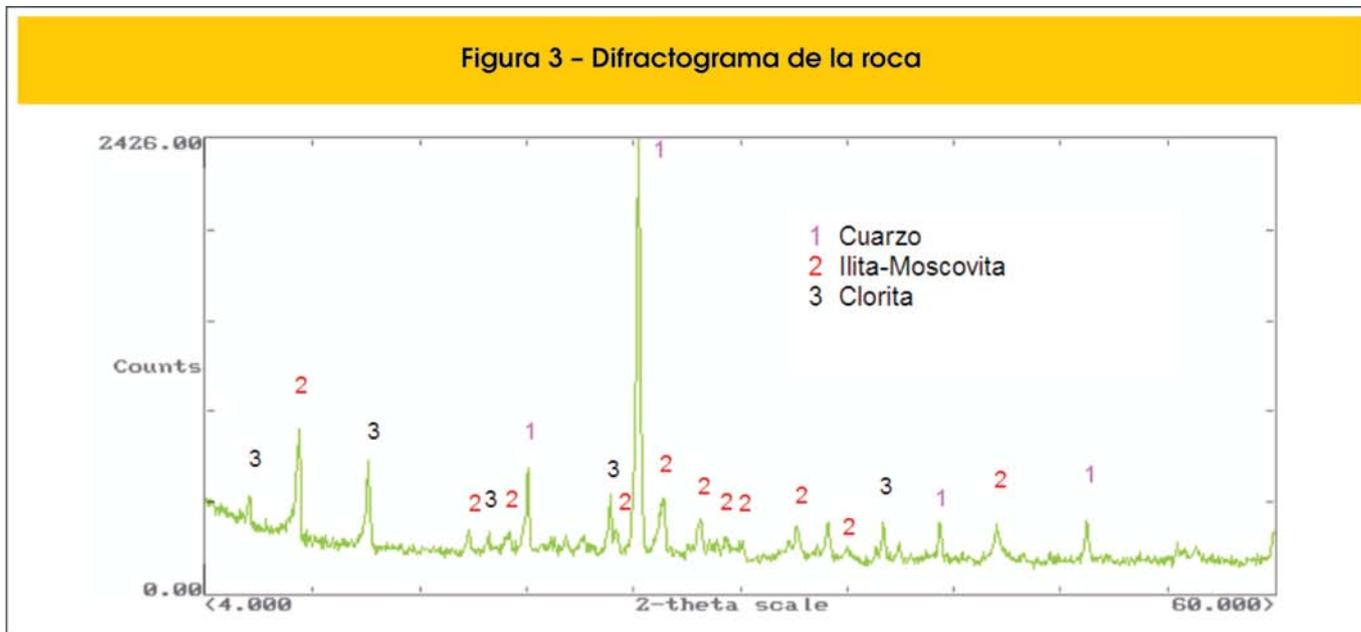
2. Campaña experimental

Figura 2 - Muestras de roca ensayadas



En el presente apartado se presentan los resultados de los ensayos de laboratorio llevados a cabo en muestras de roca y de hormigón de la presa de Torán, buscando determinar con precisión el origen de los comportamientos anómalos observados. Para ello se han analizado muestras de roca recogidas en la zona de ubicación de la estructura de donde se habría extraído el árido empleado en los hormigones de la presa. Por otro lado, a partir de los testigos sacados de la presa se ha buscado verificar la presencia de productos de reacción entre el árido y la pasta de cemento que puedan presentar características expansivas.

Figura 3 - Difractograma de la roca



2.1 Caracterización del árido

En el presente apartado se presentan los resultados de la etapa de la campaña experimental que trata de caracterizar el árido usado en el hormigón de la presa de Torán sobre todo buscando identificar la presencia de minerales potencialmente reactivos. En la Figura 1 se muestra un ejemplo del aspecto que tiene la roca en la cantera próxima a la presa, en que se pueden identificar las vetas de sulfuro de hierro que cortan los esquistos. Por otro lado, en la Figura 2 se presentan las muestras recogidas en la cantera y utilizadas en los ensayos.

En primer lugar se ha llevado a cabo el ensayo de DRX con vistas a identificar los compuestos cristalinos de la roca. En la Figura 3 se presenta el difractograma en el cual se observa que la roca está, básicamente, formada de cuarzo, mica y un tipo de arcilla aparentemente no expansiva. De esta manera se espera que los esquistos estén formados, mayoritariamente, de compuestos con una composición en óxidos tales como SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ y alguna cantidad de óxidos de calcio, magnesio, potasio y sodio de las arcillas y micas.

Para cuantificar y verificar la presencia de otros compuestos en la muestra de roca, se ha procedido al análisis químico de la roca mediante el ensayo de FRX, cuyos resultados se presentan en la Tabla 1. Además de los compuestos de la roca que esperábamos encontrar, se observa la existencia de un porcentaje de compuestos de azufre que no formaría parte de las fases minerales identificadas mediante el DRX. En el ensayo de FRX se ha verificado la presencia de un 2% de dichos compuestos que deben provenir de los sulfuros de hierro (piritas y/o pirrotinas) que contienen los esquistos.

De acuerdo con estos resultados se verifica que la roca machacada empleada como árido, posee compuestos de azufre en cantidades importantes, que serían los responsables de la formación de fases expansivas en el hormigón de la presa de Torán.

2.2 Caracterización de los sulfuros de hierro

Una vez identificada la presencia de compuestos de azufre, cabe ahora identificar el mineral que los contiene. Para ello se han empleado las técnicas de difracción de rayos X (DRX) y de microscopía electrónica de barrido (MEB) con microanálisis (EDAX).

Tabla 1 - Análisis químico de la roca mediante la Fluorescencia de Rayos X

FLUORESCENCIA DE RAYOS X					
Elemento	Óxido	Concentración (%)	Elemento	Óxido	Concentración (%)
Na	Na ₂ O	2.986	S	SO ₃	2.032
Mg	MgO	2.487	K	K ₂ O	3.175
Al	Al ₂ O ₃	17.378	Ca	CaO	3.130
Si	SiO ₂	59.403	Fe	Fe ₂ O ₃	7.881

Figura 4 - Difractograma de la muestra con concentración de sulfuros

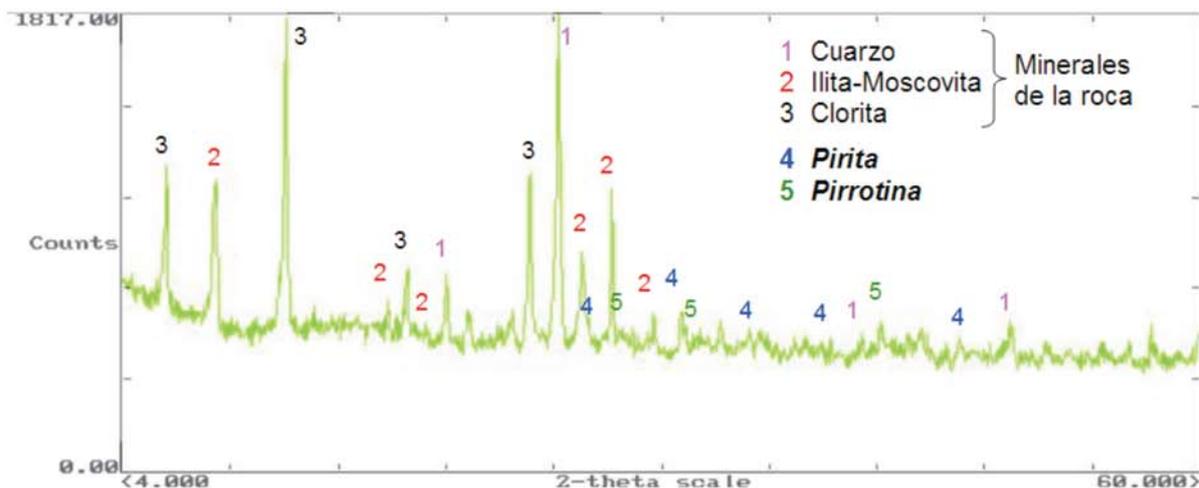


Figura 5 - Imagen, espectro y microanálisis de los sulfuros de hierro

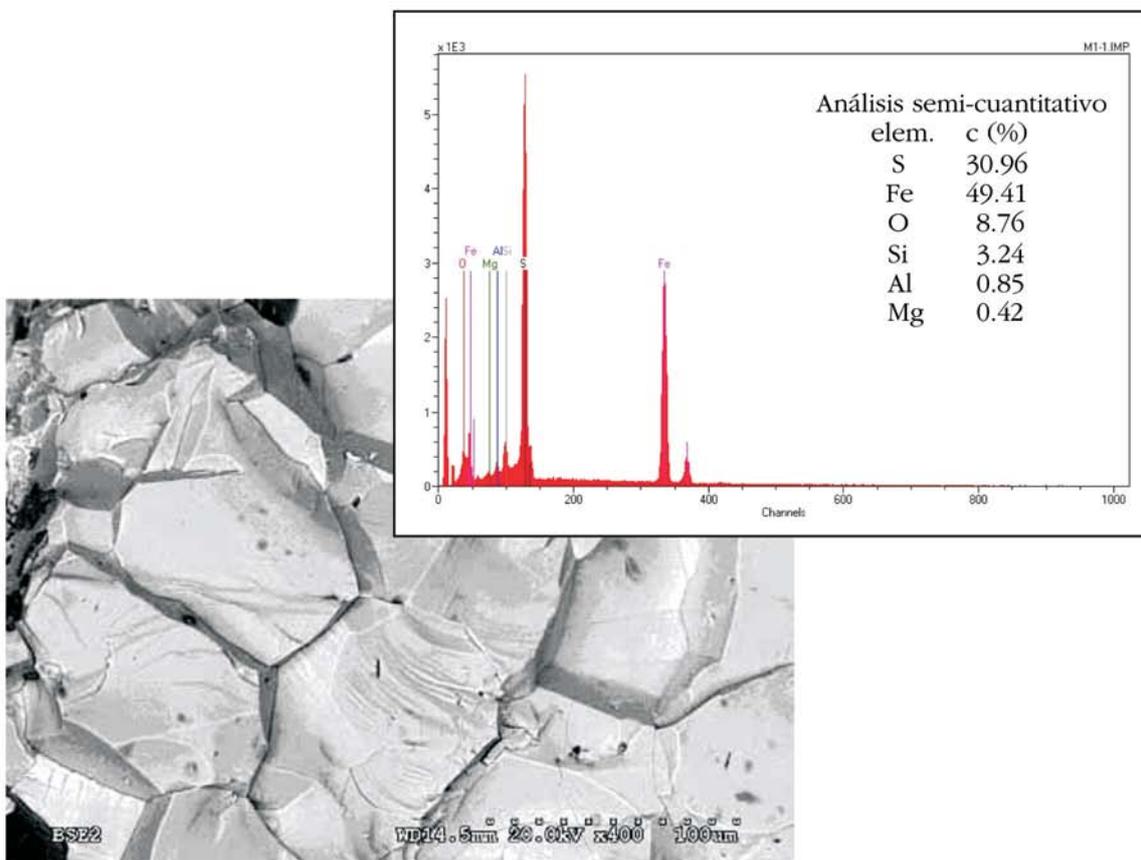
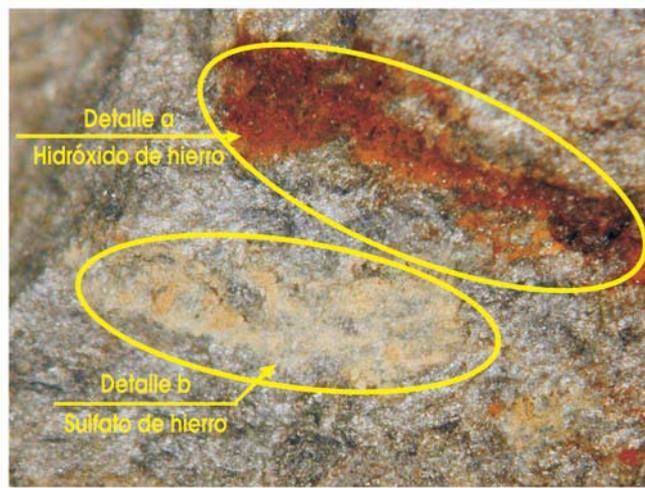


Figura 6 - Hidróxido de hierro (detalle a) y sulfato de hierro (detalle b) en la superficie de la muestra de roca



En la etapa de preparación de la muestra, se ha podido observar que la misma podría ser atraída por un imán. Al contrario de la pirita, los cristales de pirrotina presentan magnetismo permanente interno [1]. Por lo tanto, este sencillo procedimiento es un primer indicativo que en la muestra ensayada hay una significativa cantidad de pirrotina.

Como resultado del ensayo de DRX en la muestra, se ha obtenido el difractograma presentado en la Figura 4 en el que se identifican los principales picos de la pirita y de la pirrotina. La presencia del cuarzo, de la clorita y de otros minerales de arcilla es debida a la mineralogía de los esquistos que acompañan a los sulfuros de hierro en las muestras analizadas.

A continuación se ha llevado a cabo el ensayo de MEB cuyo resultado se presenta en la Figura 5. La identificación de los elementos que forman la muestra, se ha efectuado mediante el espectrómetro de rayos X acoplado al microscopio electrónico de barrido (microanálisis de la Figura 5). Asimismo se ha obtenido el análisis semi-cuantitativo correspondiente a la zona analizada. El ensayo se hizo en la muestra no metalizada para evitar la interferencia del pico del oro de la metalización con el pico del azufre.

El magnetismo del material ensayado y la relación azufre/hierro de 0,62, más cercano a la relación azufre/hierro de la pirrotina, indican que es este sulfuro de hierro el que predomina en la muestra analizada. Sin embargo, no se puede descartar la presencia de la pirita una vez que se han observado los picos característicos de este mineral en el ensayo de DRX.

2.3 Alteración de los áridos

Una vez identificado el principal sulfuro de hierro que forma parte de la roca empleada como árido, es necesario entender el proceso reactivo de su oxidación además de los agentes externos que influyen en dicho fenómeno.

2.3.1 Agentes desencadenantes del proceso de oxidación de los sulfuros

Tanto el oxígeno como los iones hierro (Fe^{3+}) son importantes oxidantes de las piritas y pirrotinas [2]. En condiciones de $pH > 4$ el oxígeno es el principal responsable de la oxidación de los sulfuros [3]. Dado que el pH del hormigón en condiciones normales se mantiene entre 12,5 y 13,5, o bien en un valor de 9 si el hormigón está carbonatado, se puede concluir que el oxígeno es, en este caso, el principal agente desencadenante de las reacciones de oxidación de los sulfuros de hierro encontrados en los áridos de la presa de Torán. Así que en condiciones propicias de oxígeno y en ambiente húmedo, dichos sulfuros pueden sufrir oxidación generando hidróxido

Figura 7 - Difractograma del hidróxido de hierro

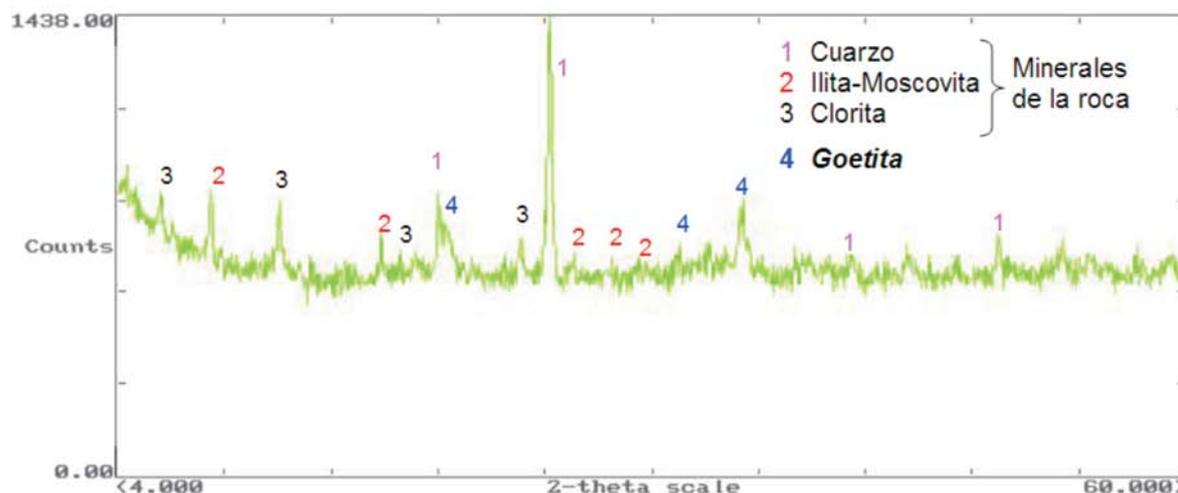


Figura 8 - Imagen y espectro del hidróxido de hierro

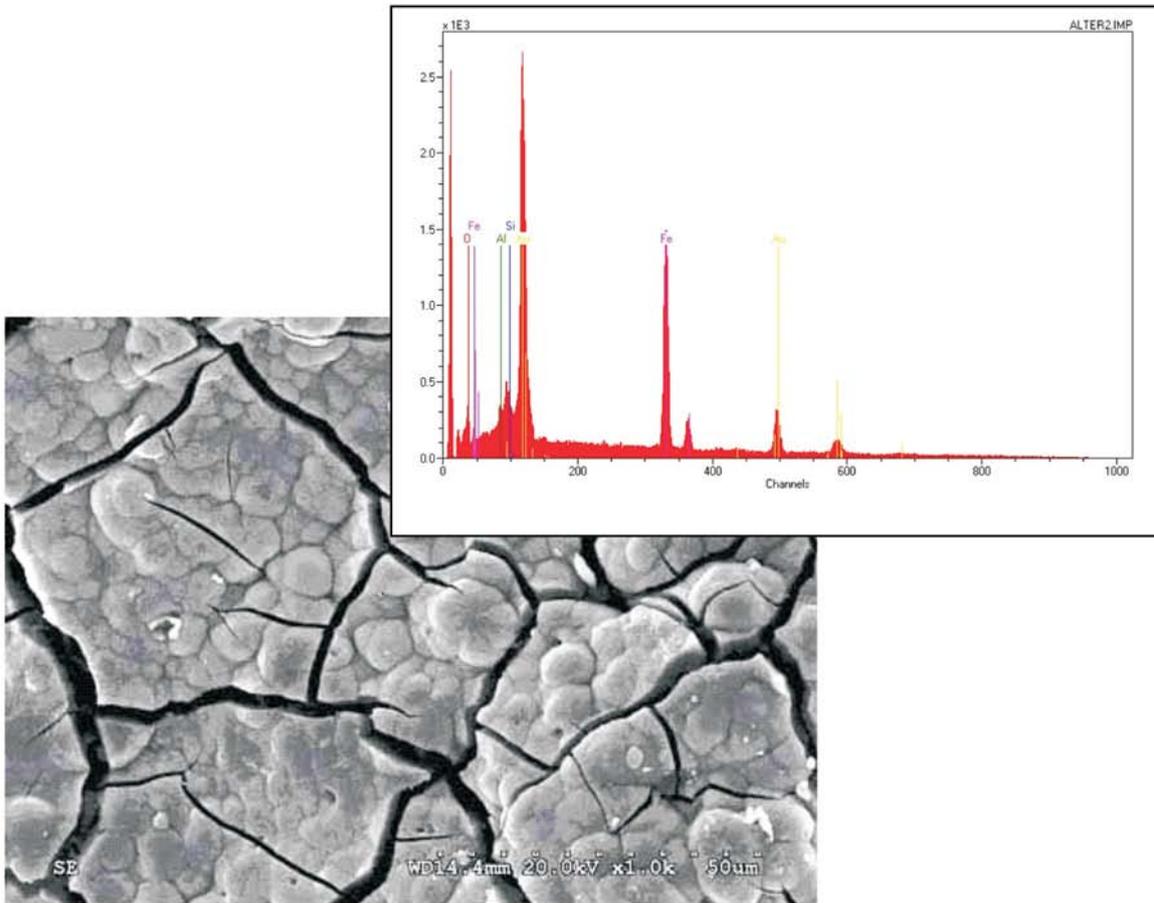


Figura 9 - Difractograma del sulfato de hierro

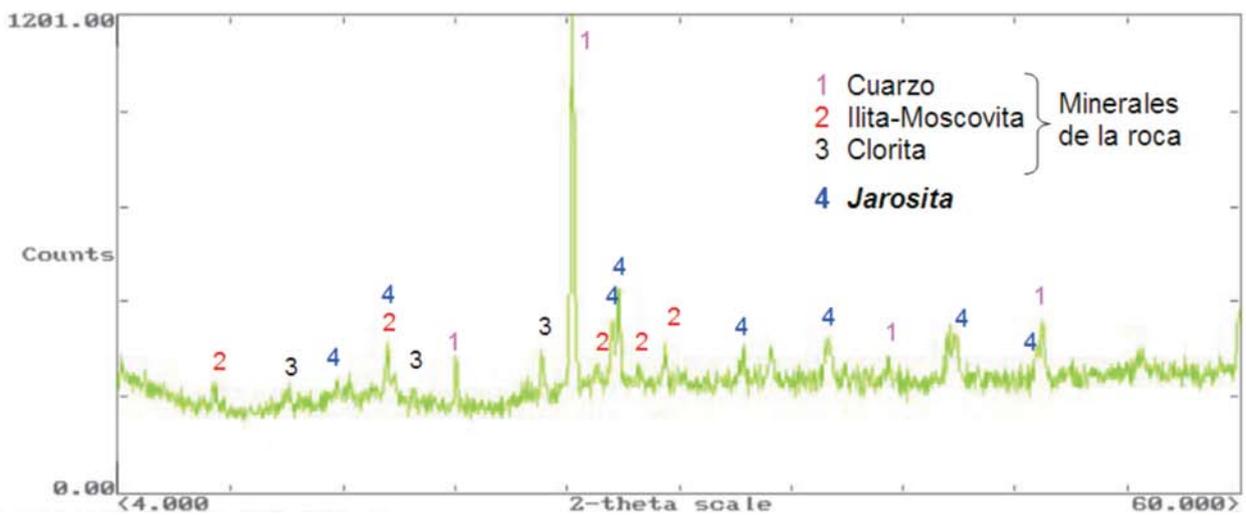


Figura 10 - Imagen y espectro del sulfato de hierro

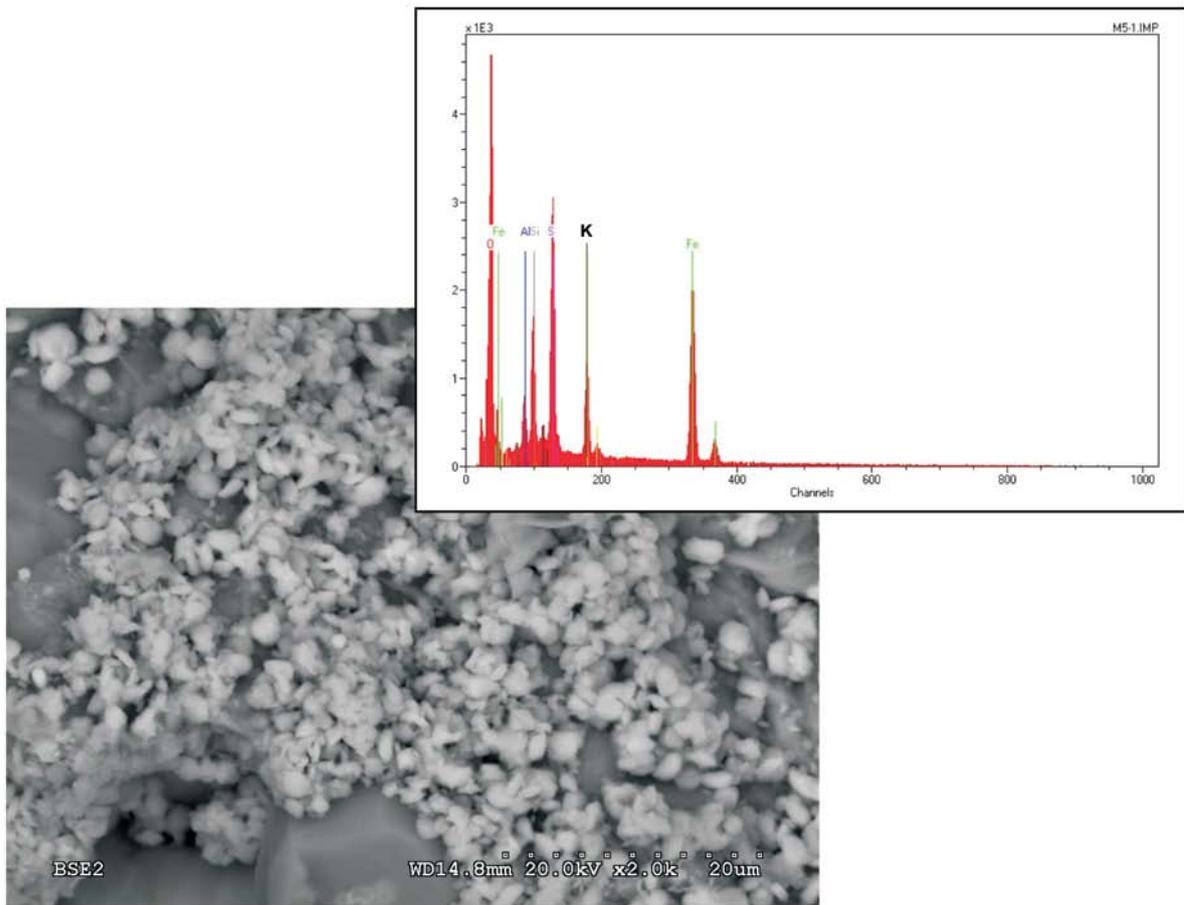


Figura 11 - Mineral cristalino colgado en la roca y detalle

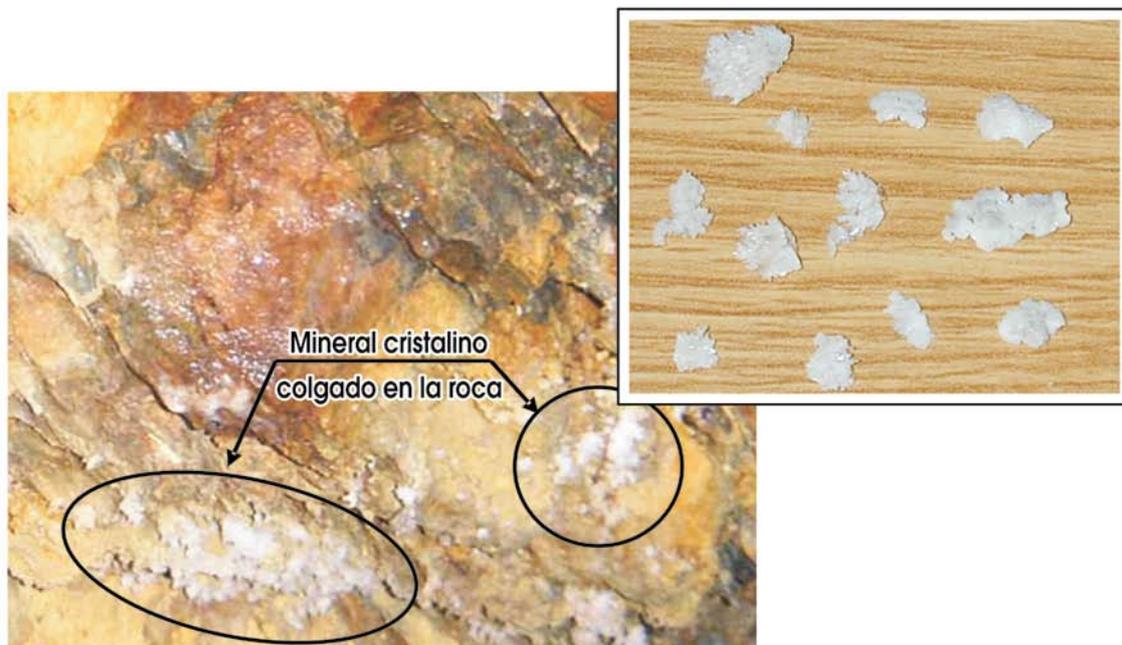
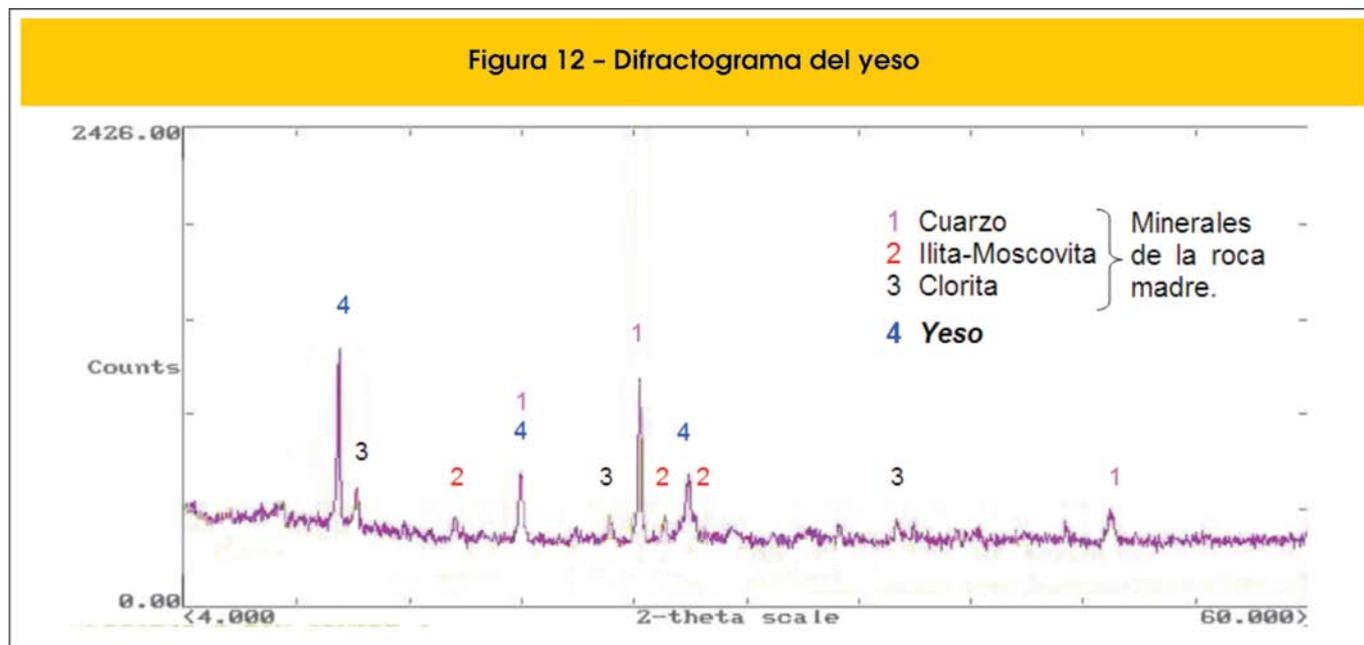


Figura 12 - Difractograma del yeso



y sulfato de hierro. En el proceso también se genera ácido sulfúrico lo que acaba por tornar el sistema menos alcalino (H⁺) [4]. Además del oxígeno y de la humedad, indispensables para el inicio de las reacciones de oxidación de los sulfuros de hierro, otros agentes pueden causar un efecto acelerador del proceso, como es el caso de la temperatura. Estudios de Steger [5] han concluido que hay un significativo incremento del grado de oxidación de la pirrotina con el aumento de la temperatura. Por otro lado, el propio (Fe³⁺), además de ser un agente desencadenante puede, bajo determinadas condiciones, actuar como acelerador del proceso siempre cuando no sea el oxidante principal [2].

2.3.2 Caracterización de los productos generados en la alteración de los áridos

Para verificar si los compuestos formados en el proceso de alteración de la roca están presentes en los áridos empleados en el hormigón de la presa de Torán, se han realizado los ensayos de DRX y de MEB con EDAX en los fragmentos de roca recogidos de la cantera (Figura 2). Un análisis de los fragmentos ha permitido verificar manchas superficiales indicativo de la presencia de compuestos de alteración de los sulfuros. En la Figura 6 se puede apreciar con mayor detalle un producto con un color parduzco característico de la formación de los hidróxidos de hierro (detalle a) y otro tendiendo más hacia un color verde claro típico de los sulfatos de hierro (detalle b).

La identificación de estos productos se hizo mediante las técnicas de DRX y MEB con EDAX. El difractograma de la Figura 7 y el espectro de la Figura 8 confirman la presencia de hidróxido de hierro en forma de goetita, FeO(OH).

Por otro lado los resultados del ensayo de DRX de la Figura 9 y la presencia de potasio en la Figura 10 indican que el sulfato de hierro predominante en la muestra analizada es la jarosita, KFe₃(SO₄)₂(OH)₆.

De la misma manera, se han llevado a cabo ensayos de las eflorescencias encontradas en la roca de la cantera de la presa de Torán (Figura

11) cuyo aspecto se puede apreciar en el detalle de la referida figura. El difractograma del ensayo de DRX (Figura 12), la forma acicular de los cristales y la presencia de calcio en el microanálisis de la Figura 13, indican que la roca ha sufrido un ataque sulfático generando yeso (CaSO₄·2H₂O). Los filamentos que aparecen en la figura son debidos a telas de araña depositadas junto a los productos de alteración.

Los resultados obtenidos en la caracterización de los productos de alteración presentes en la roca de la zona de ubicación de la presa de Torán concuerdan con los estudios de McGregor y Blowes [6] y de Valente y Leal Gomes [7] que, al analizar las propiedades físicas, químicas y mineralógicas de rocas conteniendo pirrotina, han identificado que los productos resultantes de su alteración fueron el yeso, la goetita y la jarosita.

2.4 El ataque sulfático del hormigón

En un ambiente propicio, es decir en presencia de oxígeno y humedad, la pirrotina existente en los áridos puede oxidarse formando los productos de alteración tal como explicado anteriormente (reacción primaria). Si esa oxidación se da en el árido que forma parte del hormigón, los productos generados reaccionan con los productos de hidratación de la pasta de cemento dando como resultado el ataque sulfático (reacción secundaria). El resultado de este proceso es la formación de compuestos expansivos de acuerdo con las siguientes reacciones [8]:

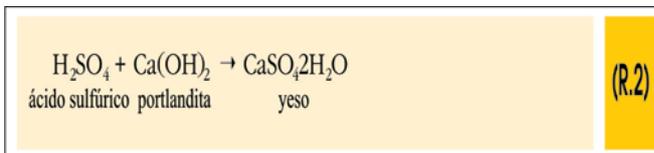
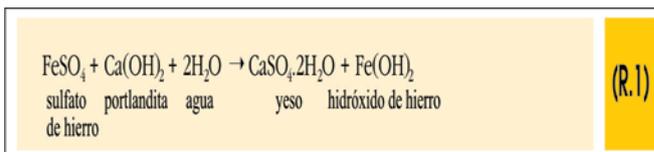


Figura 13 - Imagen y espectro del yeso

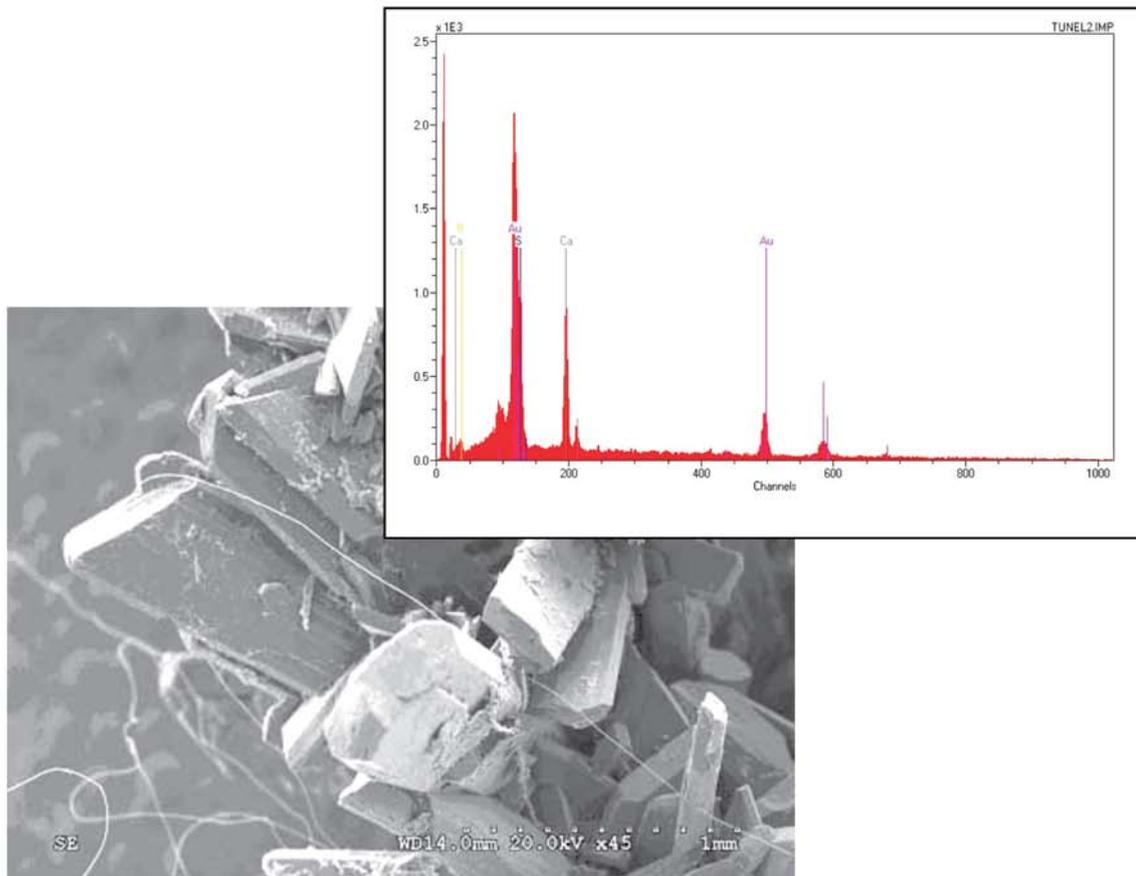


Figura 14 - Sulfuro de hierro (a) y borde oxidado de árido (b)

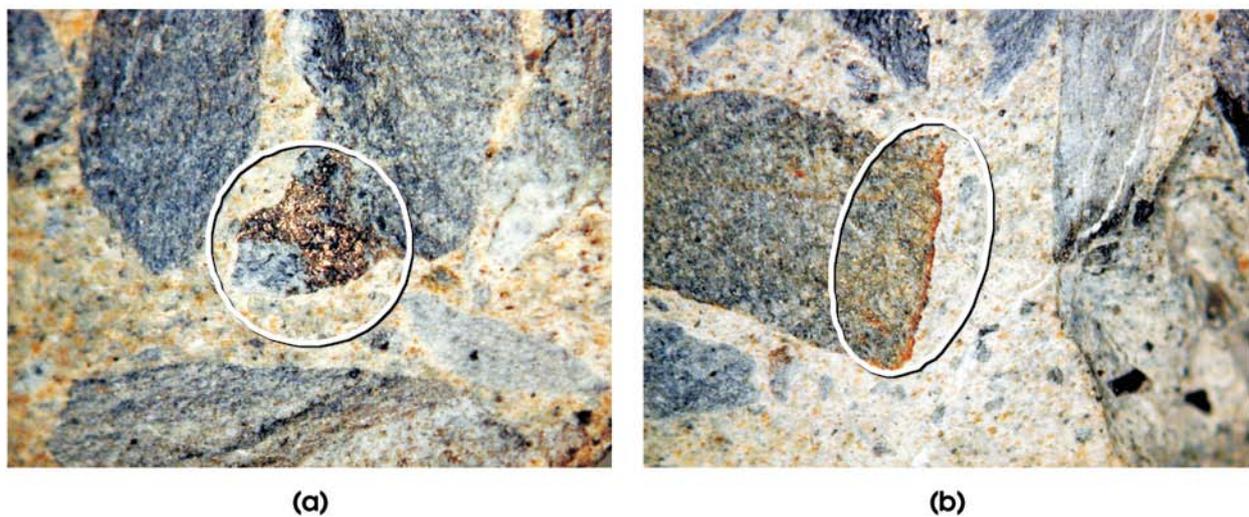
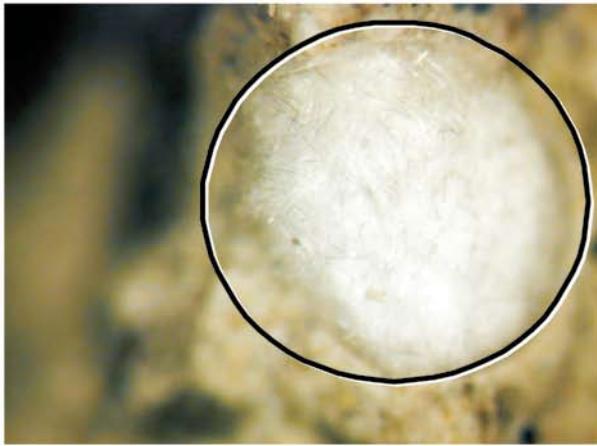
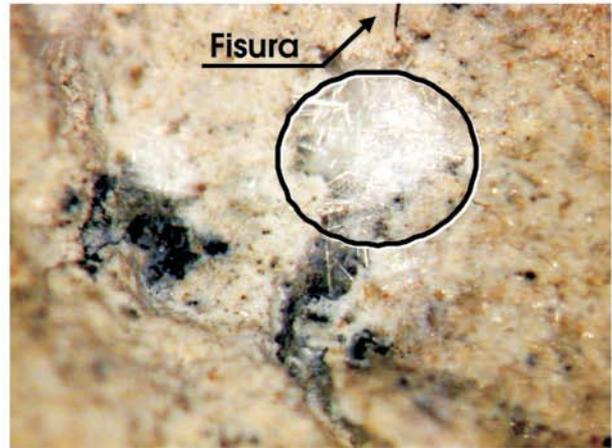


Figura 15 - Cristales en forma de aguja: en poros (a) y en la interfase pasta-árido (b)



(a)



(b)

Figura 16 - Imagen y espectro de la etringita

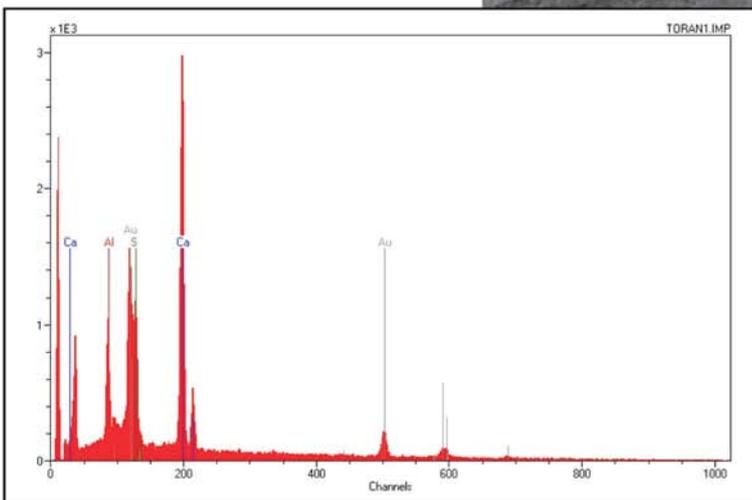
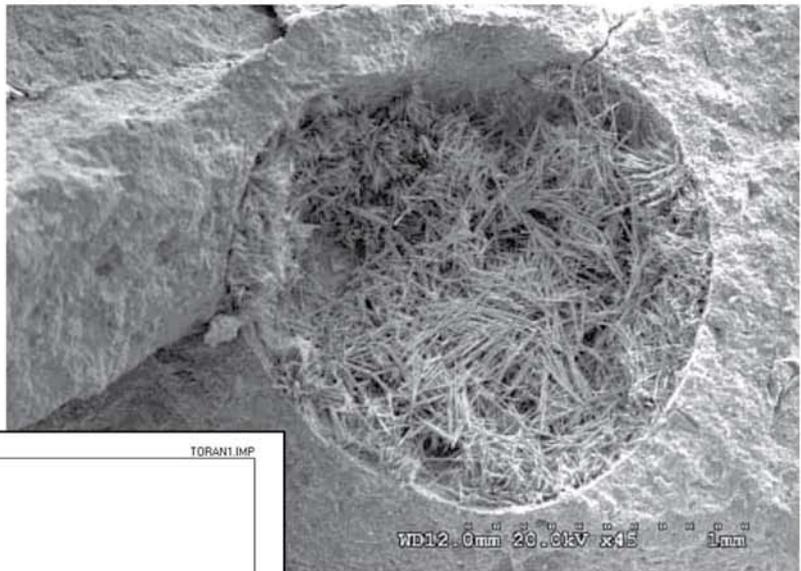
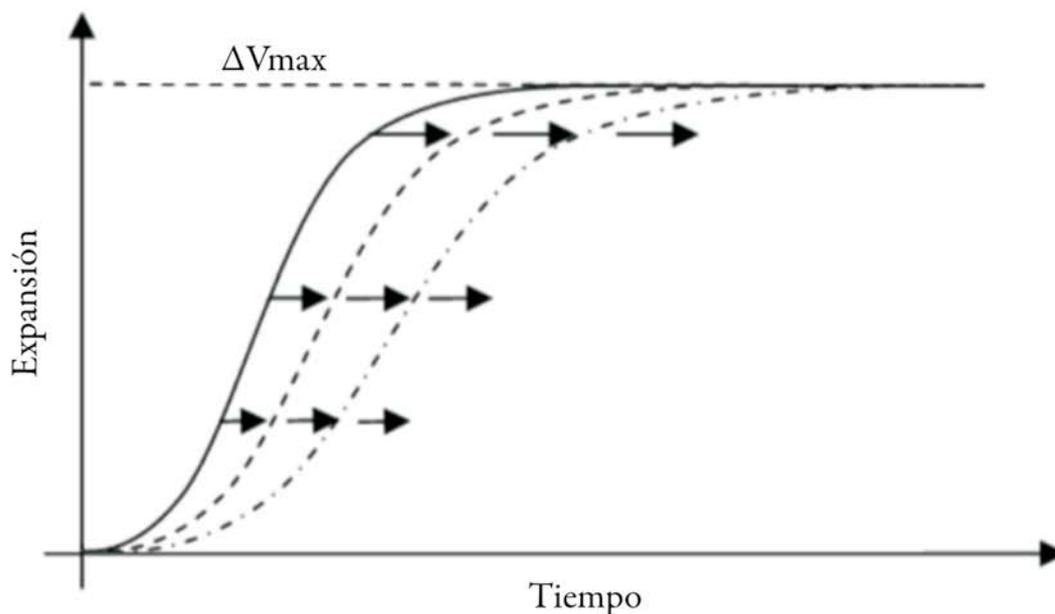
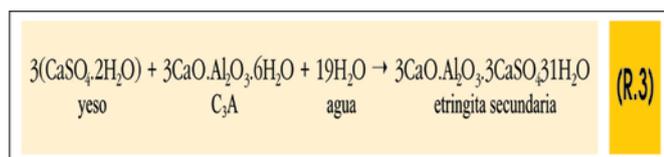


Figura 17 - Evolución del fenómeno expansivo del hormigón debido al ataque sulfático (10)



Las reacciones (R.1) y (R.2) pueden ser consideradas intermedias del proceso de expansión del hormigón, dado que el yeso formado en presencia de agua reaccionará con el aluminato tricálcico (C₃A) generando etringita secundaria expansiva, tal como se describe en la reacción (R.3) [9]:



Dado que se han identificado productos de oxidación en la roca empleada como árido en la presa de Torán, cabe ahora verificar si estos compuestos reaccionan con los productos de la pasta de cemento del hormigón formando la etringita secundaria. Para ello se ha realizado la microscopía óptica y la microscopía electrónica de barrido con microanálisis en las muestras de hormigón extraídas de la estructura.

La observación mediante la microscopía óptica del hormigón de la presa de Torán ha permitido verificar algunas características de interés para el presente estudio. En la Figura 14.a, por ejemplo, se puede apreciar en una zona interna de un testigo de hormigón, la existencia de pirrotina no oxidada. Por otro lado, en el mismo testigo pero en una zona más exterior próxima del paramento, se observa el inicio de la oxidación del borde del árido que se nota por el cambio de coloración de esta zona (Figura 14.b).

A través de esta técnica también ha sido posible identificar en los poros (Figura 15.a) y en interfases pasta-árido (Figura 15.b), la presencia de un material cristalino en forma de aguja. Asimismo

se verifica la aparición de fisuras en la pasta tal como se puede observar en la zona indicada de la Figura 15.b.

El resultado del ensayo de MEB con microanálisis realizado sobre los cristales aciculares de la Figura 15, confirma la presencia de etringita, 3CaO·Al₂O₃·3CaSO₄·31H₂O (Figura 16).

La formación de etringita secundaria es característica del ataque sulfático. En el caso específico de la presa de Torán, esta se da por la oxidación de los sulfuros de hierro presentes en el árido empleado. El resultado de este proceso es la generación de compuestos de alteración tales como los hidróxidos y sulfatos de hierro, además del ácido sulfúrico (reacción primaria). Una vez insertados en la masa de hormigón, estos productos reaccionan con la pasta de cemento dando lugar a la formación de etringita secundaria expansiva (reacción secundaria).

En la superficie de algunos áridos de tres de los once testigos analizados, se ha identificado la existencia de gel de la reacción alcali-árido. No obstante, su presencia es puntual lo que permite concluir que la principal causa de las anomalías observadas es la formación de etringita debido a la oxidación de los sulfuros de hierro.

3. Expansiones asociadas a la oxidación de los sulfuros de hierro y al ataque sulfático

Tanto los productos resultantes de la oxidación de los sulfuros de hierro como los generados en el posterior ataque a la pasta de cemento, poseen volúmenes mayores que sus compuestos de origen. La consecuencia directa es el aumento de las tensiones internas del hormigón que acaba por causar su fisuración.

Los estudios de Casanova et al. [10] estiman que los incrementos debido a la reacción primaria de oxidación de los sulfuros de hierro son del orden de 6,04 cm³/mol. Por otro lado, en el ataque sulfático

el aumento de volumen puede llegar a valores de 172,19 cm³/mol. Los referidos autores presentan un modelo numérico que permite evaluar la expansión máxima debido a las reacciones primaria y secundaria además de la velocidad con que se da el fenómeno expansivo. Este modelo puede ser representado de manera gráfica por la Figura 17. Las curvas representan el incremento de acuerdo con el tamaño de los granos, dado que la cinética de las reacciones es inversamente proporcional al diámetro de los áridos.

En la Figura 17 es importante destacar:

- la forma exponencial de la curva en la que se pueden diferenciar tres fases distintas. Inicialmente las expansiones

se desarrollan lentamente a tasas aproximadamente constantes. En una segunda fase, se da un crecimiento acentuado del incremento de volumen. Finalmente en la última fase los incrementos de volumen se desaceleran y, a partir de un determinado tiempo, cesan las expansiones.

- la estabilización del fenómeno expansivo. Esto parece bastante razonable dado que, una vez consumido todo el mineral potencialmente reactivo, se acaban las reacciones de oxidación y en consecuencia las expansiones.

En algunos casos es de especial interés conocer las deformaciones unitarias en las diferentes direcciones analizadas a partir

Figura 18 - Modelo de análisis del comportamiento estructural en distintos niveles (10)

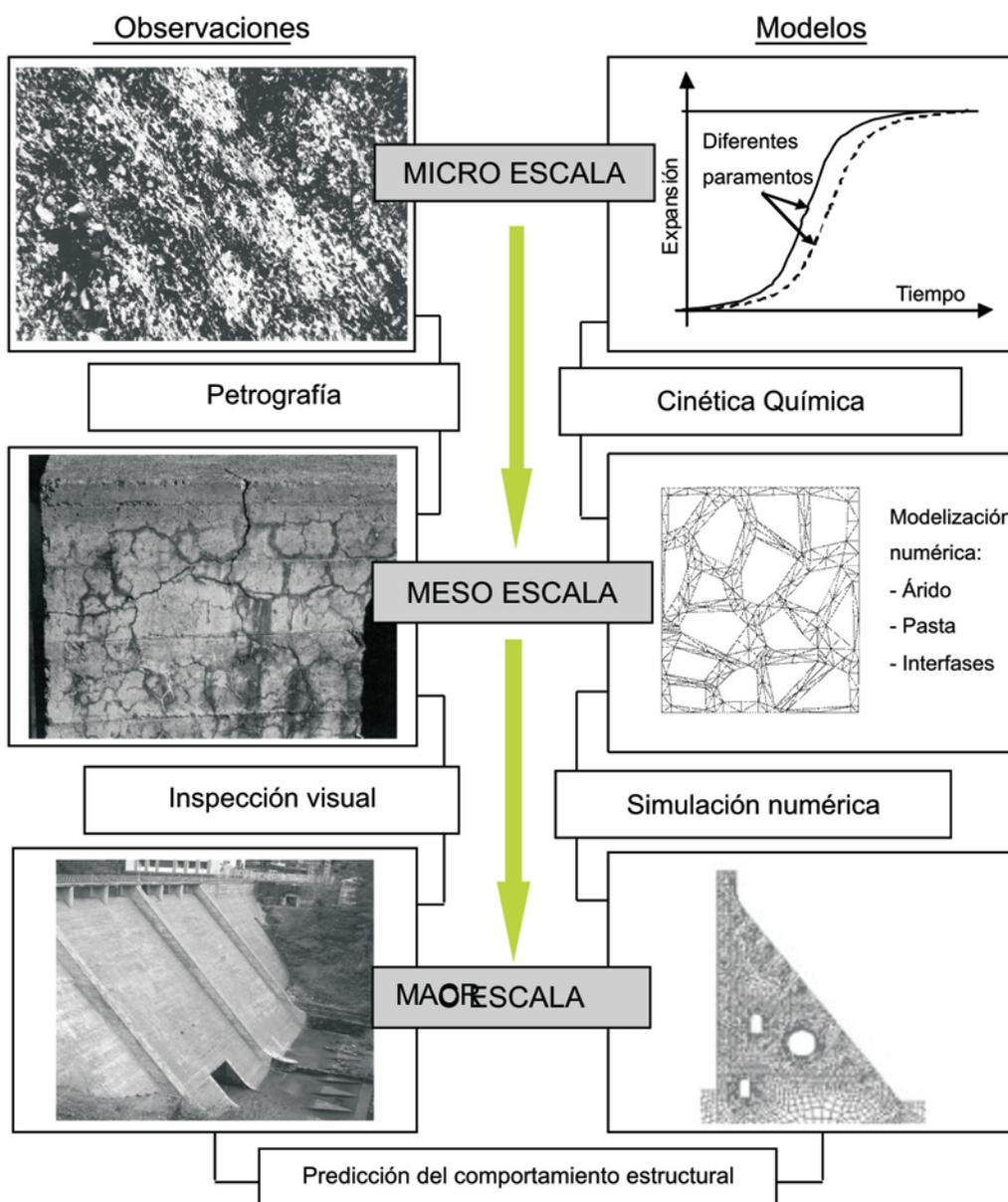
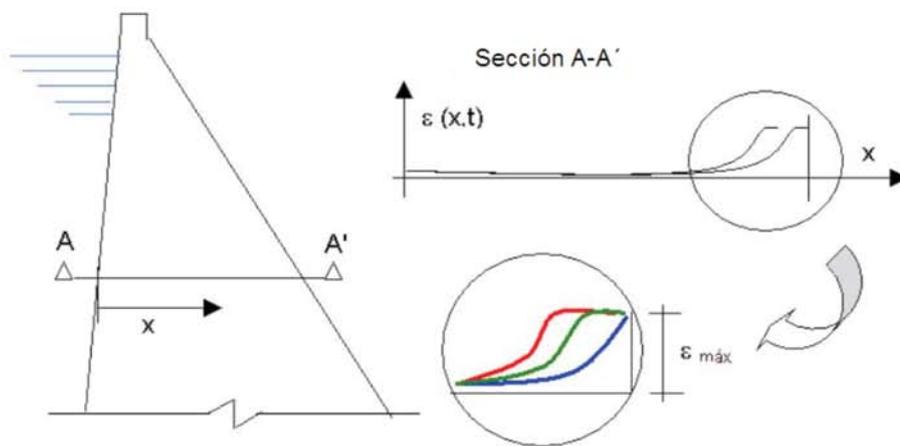


Figura 19 – Distribución no-lineal de las deformaciones (12)



del incremento de volumen del material. Dichas deformaciones pueden ser isotrópicas o anisotrópicas. Por lo tanto, es necesario analizar la distribución espacial, mediante modelos geométricos, de los minerales potencialmente expansivos en la estructura estudiada.

Si el hormigón presenta problemas de expansión puede suceder que este fenómeno afecte al comportamiento normal de la estructura dependiendo de distintos factores como pueden ser su diseño, la disponibilidad de agentes oxidantes y de mineral potencialmente reactivo.

4. Repercusión del ataque sulfático en la presa

En este apartado se explica de manera cualitativa que el comportamiento anormal observado en presas de hormigón de gravedad es consecuencia de los compuestos expansivos formados a partir de la oxidación de la pirrotina presente en el árido y el posterior ataque sulfático. En otras palabras, el comportamiento en un nivel macroestructural es el resultado de lo que sucede en la microestructura del material hormigón.

En el modelo de la Figura 18 se demuestra la necesidad de integración entre los distintos niveles de estudio para explicar satisfactoriamente el comportamiento macroestructural [11]. Dicho modelo consiste en abordar la problemática de la expansión del hormigón debido al ataque sulfático interno en tres niveles (micro, meso y macroestructural) de manera que los resultados de una fase sean los datos de entrada para la siguiente.

Inicialmente, en el nivel microscópico se simulan numéricamente las cinéticas de las reacciones cuyos resultados pueden ser transformados en deformaciones unitarias usadas como parámetro de entrada para la segunda etapa. En el nivel mesoestructural se propone un modelo numérico a través del que se pueden determinar las deformaciones y tensiones para las distintas condiciones de confinamiento. Finalmente, en la etapa de análisis macroestructural, los datos de entrada son las deformaciones impuestas, resultado de las expansiones del nivel mesoestructural.

5. Movimientos observados en presas con problemas de ataque sulfático interno

Tal como se ha visto anteriormente, el comportamiento anómalo observado en las presas de hormigón es consecuencia de lo que se da en un nivel del material. Antes de analizar el comportamiento real de la estructura es interesante verificar los movimientos esperados en una presa de gravedad con problemas de reacciones expansivas por oxidación de los áridos.

En el caso de presas de hormigón de gravedad, la geometría es el principal factor que influye en los diferentes grados de desarrollo de las reacciones de oxidación debido a que, es ella quien regula la disponibilidad de los agentes oxidantes. Así que en el paramento aguas arriba, que se encuentra sumergido largos períodos de tiempo, la disponibilidad de oxígeno es más baja cuando se lo compara con el paramento de aguas abajo.

Por otro lado, la humedad ambiente y las aguas de la lluvia son suficientes para aportar la humedad necesaria al inicio y avance del proceso de oxidación en este paramento. Asimismo su gran superficie le deja más expuesto a las temperaturas más altas dependiendo de la orientación de la presa. Por lo tanto, se puede observar que el paramento aguas abajo posee las condiciones favorables para el desarrollo más rápido e intenso de las reacciones de oxidación que el paramento aguas arriba. Eso permite concluir que las expansiones también se darán de manera más acentuada en aquel paramento. En consecuencia es de esperar que la estructura acabe por presentar unos movimientos en dirección aguas arriba. Así que los movimientos de alineación hacia aguas arriba es una consecuencia directa de las expansiones observadas en el nivel del material.

En la Figura 19 se presenta esquemáticamente la distribución no-lineal de las expansiones en una sección genérica de la presa [12]. Hay que señalar que el avance de las expansiones respecto a la profundidad a partir del paramento aguas abajo, tiende a la estabilización con el tiempo. Esto sucede debido a menor disponibilidad de agentes oxidantes a medida que se aleja de las zonas más expuesta hacia el interior de la presa.

Para estudiar los movimientos remanentes de alineación observados en coronación de presas de gravedad afectadas por reacciones sulfáticas internas, se ha adoptado un modelo matemático. Para ajustar una ecuación matemática que representase satisfactoriamente el comportamiento anormal de las estructuras, Aguado et al. [13] proponen una función exponencial del tipo:

$$y = A + B \left(1 - e^{-\left(\frac{t}{c}\right)^p} \right) \quad (E.1)$$

donde: A es el valor de la ordenada en el origen (valor inicial de los movimientos); B es el valor de la ordenada de los máximos movimientos previstos; C es el valor de la abscisa del punto de inflexión (mes a partir del cual los efectos de la expansión empiezan a estabilizarse); t es el tiempo en meses y p es el parámetro que influye en la forma de la curva.

La ecuación exponencial propuesta por los autores ha sido aplicada a casos reales de las presas estudiadas. Dado que la falta de suficientes datos de mediciones de los movimientos de la presa de Torán no permite la aplicación del modelo propuesto, su validez es verificada en las presas de Graus y Tavascán cuyos historiales de mediciones son bastante extensos, más de 400 meses. Dichas estructuras presentan problemas de expansión interna del hormigón debido a la alteración de los sulfuros de hierro en forma de pirrotina existentes en el árido empleado en la mezcla. Al igual que en Torán los síntomas observados en ambas presas son la fisuración mapeada, el cambio de coloración superficial y desplazamientos no recuperables.

A través de los métodos de los mínimos cuadrados, la función (E.1) ha sido ajustada para la obtención de los parámetros requeridos para distintos tiempos de estabilización del proceso. El análisis de los resultados ha permitido concluir que, de las diversas curvas ajustadas, la que mejor ha representado los

movimientos es la que tiene el punto de inflexión alrededor de los 350 meses. En las Figuras 20 y 21 se presentan los movimientos reales medidos (en línea continua) y las respectivas curvas de 350 meses ajustadas (líneas descontinuas).

Tal como se puede observar, las curvas graficadas representan muy satisfactoriamente los desplazamientos horizontales observados en coronación de ambas presas analizadas. Además de los tiempos de estabilización de los movimientos remanentes, el modelo matemático permite predecir un orden de magnitud para los movimientos máximos esperados.

La ventaja de este tipo de función es que representa tanto los movimientos observados en las estructuras como la tendencia exponencial de las ecuaciones que controlan la expansión del hormigón, tal como se ha visto en el apartado 3.

6. Consideraciones finales

Por todo lo expuesto anteriormente, se puede decir que:

- los productos de alteración debido a la oxidación de los sulfuros de hierro en forma de pirrotina existente en el árido y el posterior ataque sulfático a la pasta es la principal causa de las expansiones observadas en la presa de Torán.
- el fenómeno expansivo se manifiesta principalmente por la fisuración mapeada y por los movimientos no recuperables.
- la expansión más acentuada en el paramento aguas abajo es la responsable por los movimientos remanentes hacia aguas arriba observados en las presas.
- el modelo matemático propuesto ha permitido representar adecuadamente los desplazamientos remanentes observados en las presas de Graus y Tavascán posibilitando, incluso, prever los tiempos de estabilización de dicho comportamiento y los movimientos máximos previstos.

7. Agradecimientos

Los autores agradecen a ENDESA GENERACIÓN S.A. por el apoyo y por permitir la publicación de los datos y a D. Felipe Río por facilitar las informaciones necesarias al desarrollo de este estudio.

Figura 20 – Movimientos de alineación y curvas ajustadas – Presa de Graus

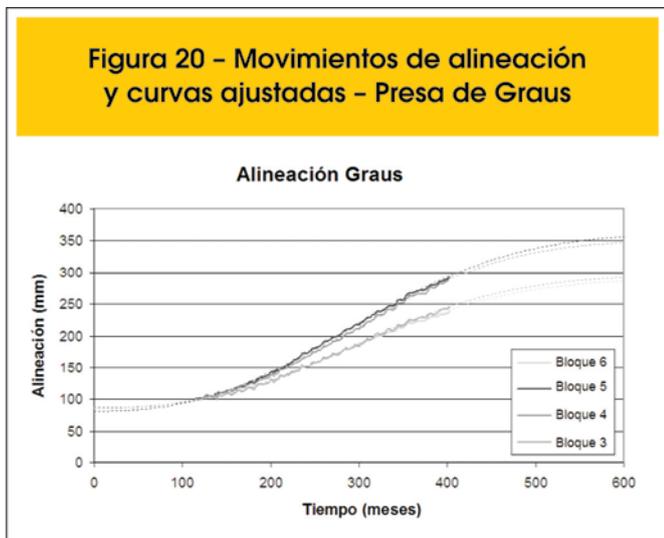
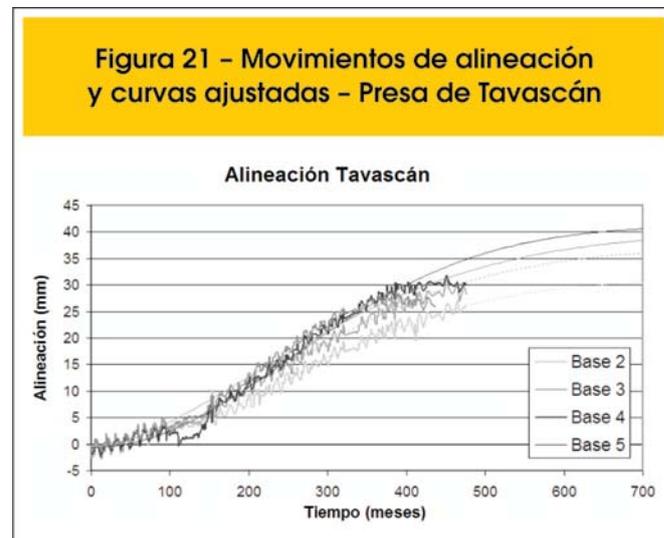


Figura 21 – Movimientos de alineación y curvas ajustadas – Presa de Tavascán



8. Referências bibliográficas

- [01] Bowen, R. *Geology in engineering*. Elsevier Applied Science Publishers, Londres, 411 p. (1984),
- [02] Janzen M. P., Nicholson, R. V.; Scharer, J. N. Pyrrhotite reactions kinetics: reaction rates for oxidation by oxygen, ferric iron, and for nonoxidative dissolution. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64 (2000) 1511-1522.
- [03] Mikhlin, Y. L.; Kuklinskiy, A. V.; Pavlenko, N. I.; Varnek, V. A.; Asanov, I. P., Okotrub, A.V.; Selyutin, G. E.; Solovyev, L. A. Spectroscopy and XRD studies of the air degradation of acid-reacted pyrrhotites, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 66 (2002) 4057-4067.
- [04] Ayora, C.; Chichón, S.; Aguado, A.; Guirado, F. Weathering of iron sulfides and concrete alteration: thermodynamic model and observation in dams from Central Pyrenees, Spain. *Cem and Concr Res*, 28 (1998) 1223-1235.
- [05] Steger, H. F.; Oxidation of sulfide materials, VII. Effect of temperature and relative humidity on the oxidation of pyrrhotite. *Chemical Geology*, 35 (1982) 281-295
- [06] McGregor, R. G.; Blowes, D. W., The physical, chemical and mineralogical properties of three cemented layers within sulfide-bearing mine tailings. *Journal of geochemical exploration*, vol. 76, (2002) 195-207.
- [07] Valente, T., Leal Gomes, C. Tipologia e evolução dos materiais de neoformação supergénica detectados na escombreira da mina de Valdearcas (Vila Nova da Cerveira – N Portugal) – Implicações ambientais. *Cadernos Lab. Xeológico de Laxe*. Coruña, vol. 23, (1998), 43-58.
- [08] Shayan, A. Deterioration of a concrete surface due to oxidation of pyrite contained in pyritic aggregates. *Cement and Concrete Research*, 18 (1988) 723-730.
- [09] Tagnit-Hamou, A.; Saric-Coric, M; Rivard, P. Internal deterioration of concrete by oxidation of pyrrhotitic aggregates. *Cem Concr Res*, 35 (2005) 99-107.
- [10] Casanova, I.; Agulló, L.; Aguado, A. Aggregate expansivity due to sulfide oxidation – I. Reaction system and rate model. *Cem Concr Res*, 26 (1996) 993-998.
- [11] Aguado, A., et al. Incidencia de la microestructura en la respuesta macroestructural de elementos de hormigón. V Congreso Nacional de Propiedades Mecánicas de Sólidos. E.T.S. Ingenieros Industriales de Barcelona, Barcelona (1996) 12 pp
- [12] Aguado, A.; Rodríguez-Ferran, A.; Casanova, I.; Agulló, L. Modeling time evolution of expansive phenomena in concrete dams as a decision-making tool. *Comission Internationale des Grands Barrages*, Montreal, (2003).
- [13] Aguado, A.; Agulló, L.; Casanova, I.; Lopez, C. M. Estudio de fenómenos expansivo en presas de hormigón. De la micro a la macro estructura. *Comité Español de Grandes Presas*. Premio José Torán, Barcelona, (1998) 103 p.