

COMITÉ NACIONAL ESPAÑOL DE GRANDES PRESAS

ANÁLISIS DE LA FISURACIÓN ORIENTADA EN CORONACIÓN: INTERACCIÓN ESTRIBO-ESTRUCTURA

F. Río¹, C. M^a López², G. Araujo³ y A. Aguado⁴

RESUMEN: En varias presas ubicadas en zonas de una similar formación geológica del Pirineo español, se ha detectado un comportamiento expansivo del hormigón, fabricado con unos áridos con contenidos de sulfuros de hierro. Tales reacciones expansivas de origen interno, se dan en dos etapas: la oxidación de los sulfuros de hierro y el posterior ataque sulfático con la formación de la etringita. Generalmente, el fenómeno se refleja en la estructura a través de comportamientos como pueden ser: la fisuración enramada, el cambio de coloración superficial y movimientos no recuperables (cambio de la alineación hacia aguas arriba y el aumento de cota de nivelación).

En algunos casos, también se han detectado otros comportamientos anómalos como la presencia de una fisuración con dirección aproximadamente horizontal observada en paramento aguas abajo de la presa de Torán. En este trabajo se presenta un análisis numérico de la fisuración en coronación existente en paramentos aguas abajo de la Presa de Torán, mediante una modelización basada en el Método de los Elementos Finitos con la incorporación de elementos junta sin espesor. Se han discretizado en 2D cuatro bloques de la presa junto con el terreno colindante. En la malla de elementos finitos, se ha incluido elementos juntas sin espesor, a fin de posibilitar la simulación del comportamiento de la fisuración. La acción de las expansiones se ha incluido mediante deformaciones impuestas en una franja estrecha de la superficie de la roca.

¹ ENDESA GENERACIÓN

² Universitat Politècnica de Catalunya. ETSICCP. Barcelona

³ Universitat Politècnica de Catalunya. ETSICCP. Barcelona

⁴ Universitat Politècnica de Catalunya. ETSICCP. Barcelona

Los resultados obtenidos concuerdan significativamente con el estado de fisuración apreciado en obra y ponen de manifiesto la potencialidad del modelo para explicar esta problemática. Además este planteamiento puede servir para explicar ciertos comportamientos de interacción suelo-estructura en zonas altas de los estribos.

1. INTRODUCCIÓN

En varias presas ubicadas en zonas de una similar formación geológica del Pirineo español, se ha detectado un comportamiento expansivo del hormigón, fabricado con unos áridos con contenidos de sulfuros de hierro provenientes de zonas cercanas al lugar de emplazamiento de la obra [1]. La presencia en la roca de minerales potencialmente reactivos como los sulfuros de hierro, al entrar en contacto con el oxígeno en ambiente húmedo, generan productos de reacción de un volumen superior al de los compuestos originales. Dentro del hormigón, a estas reacciones primarias le siguen otras reacciones secundarias debidas al ataque sulfático de los productos de la oxidación primaria sobre la pasta de cemento, lo cual da lugar a la formación de etringita [2,3]. Generalmente, el comportamiento anómalo observado en presas construidas con este tipo de áridos se registra en los datos de las bases de medición sobre todo ubicadas en coronación de presas, que muestran unos movimientos remanentes de las alineaciones (movimiento horizontal) hacia aguas arriba y de las nivelaciones (movimiento vertical) en elevación. Por otro lado, en distintas zonas y elementos auxiliares de las presas se presenta una fisuración distribuida sin una orientación preferencial (tipo mapeada) acompañada de un cambio de coloración superficial (ocre), que ha sido analizada en trabajos previos mediante un modelo mesomecánico del hormigón de presa [1,4]. En algunos casos, también se han detectado otros comportamientos anómalos como la presencia de una fisuración con dirección aproximadamente horizontal observada en paramento aguas abajo de la presa de Torán. En este trabajo se presenta un análisis numérico de la fisuración en coronación existente en paramentos aguas abajo de la Presa de Torán, mediante una modelización basada en el Método de los Elementos Finitos con la incorporación de elementos junta sin espesor.

2. COMPORTAMIENTO OBSERVADO EN LA PRESA DE TORÁN

La presa de Torán es una presa de gravedad de planta recta, que presenta los problemas de fisuración enramada y movimientos remanentes hacia aguas arriba señalados en la Introducción. La presa presenta también unas fisuras planas, con una pequeña inclinación respecto de la horizontal en las zonas cercanas a coronación por encima de la cota de embalse, tal como puede apreciarse en la vista del paramento aguas abajo que se muestra en la Figura 1.

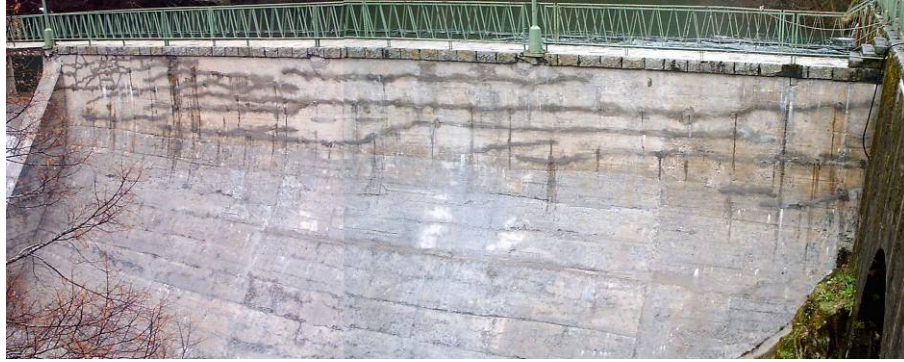


Figura 1. Fisuras aproximadamente horizontales en el paramento aguas abajo por encima de la cota de embalse de la presa de Torán (fotografía posterior al tratamiento de sellado de las fisuras).

Para explicar la existencia de esta fisuración, se pensó como hipótesis de partida que la causa estaría relacionada con la expansión del terreno debido a la oxidación de los sulfuros de hierro presentes en el mismo. La ausencia de armaduras en la zona y la forma direccionada que presentan estas fisuras, permiten suponer que se trata de un efecto de tipo estructural, diferente de la tendencia habitual que presenta la fisuración tipo mapeada y ramificada que caracteriza los efectos de las reacciones expansivas libres del hormigón.

Esta hipótesis significaría que el tipo de fisuración observado en el paramento aguas abajo también debería presentarse en el paramento aguas arriba, lo cual no había podido comprobarse al inicio de este estudio debido a que dicho paramento se encuentra desde hace años revestido por una capa impermeabilizante. Sin embargo, recientemente se ha encontrado en la Revista de Obras Públicas (1985) (que trata sobre el XV Congreso Internacional de Grandes Presas en Suiza), una foto de publicidad de la empresa IRET S.A., donde se puede observar el paramento aguas arriba de la presa de Torán en la época de los servicios de impermeabilización, llevados a cabo durante los meses de octubre y noviembre de 1984 (Figura 2a). En la foto se observa claramente, además de manchas blancas debidas al arrastre de la cal libre, unas fisuras aproximadamente horizontales por encima de cota máxima de embalse, tal como se presentan en paramento aguas abajo. Las fisuras de características similares, así como el aspecto de la fisura que se aprecia en un testigo extraído del bloque 2 de la zona fisurada (Figura 2b), son claramente indicativos de que la fisuración se presenta en planos a uno y otro lado de los paramentos.



(a)



(b)

Figura 2. a) Vista del paramento aguas arriba de la presa de Torán en el año 1984, b) Testigo de hormigón del bloque 2 en zona fisurada de la presa de Torán.

3. MODELIZACIÓN

Para explicar la aparición de las fisuras horizontales se han discretizado aproximadamente cuatro bloques (5, 6, 7 y 8) de la presa conjuntamente con el terreno contiguo tal como se muestra en la Figura 3, es decir, la mitad derecha vista desde aguas arriba (se ha discretizado la vista desde aguas arriba, ya que se disponía de los datos geométricos de los bloques y su cimentación). Para la representación del terreno se han adoptado dimensiones suficientes para disminuir la influencia de los bordes en las tensiones generadas en la presa. En la discretización mostrada en la Figura 3 inferior, también se han incluido elementos juntas sin espesor, a fin de posibilitar la simulación del comportamiento de la fisuración. Por un lado, estos elementos se han incorporado en la zona cercana a coronación, dispuestos en capas y con una inclinación de 3.5° con respecto a la horizontal, siguiendo aproximadamente la pendiente de las fisuras observadas en paramentos de presa. También se colocan elementos de interfase en el límite presa-terreno a fin de posibilitar la continuidad de las juntas anteriores.

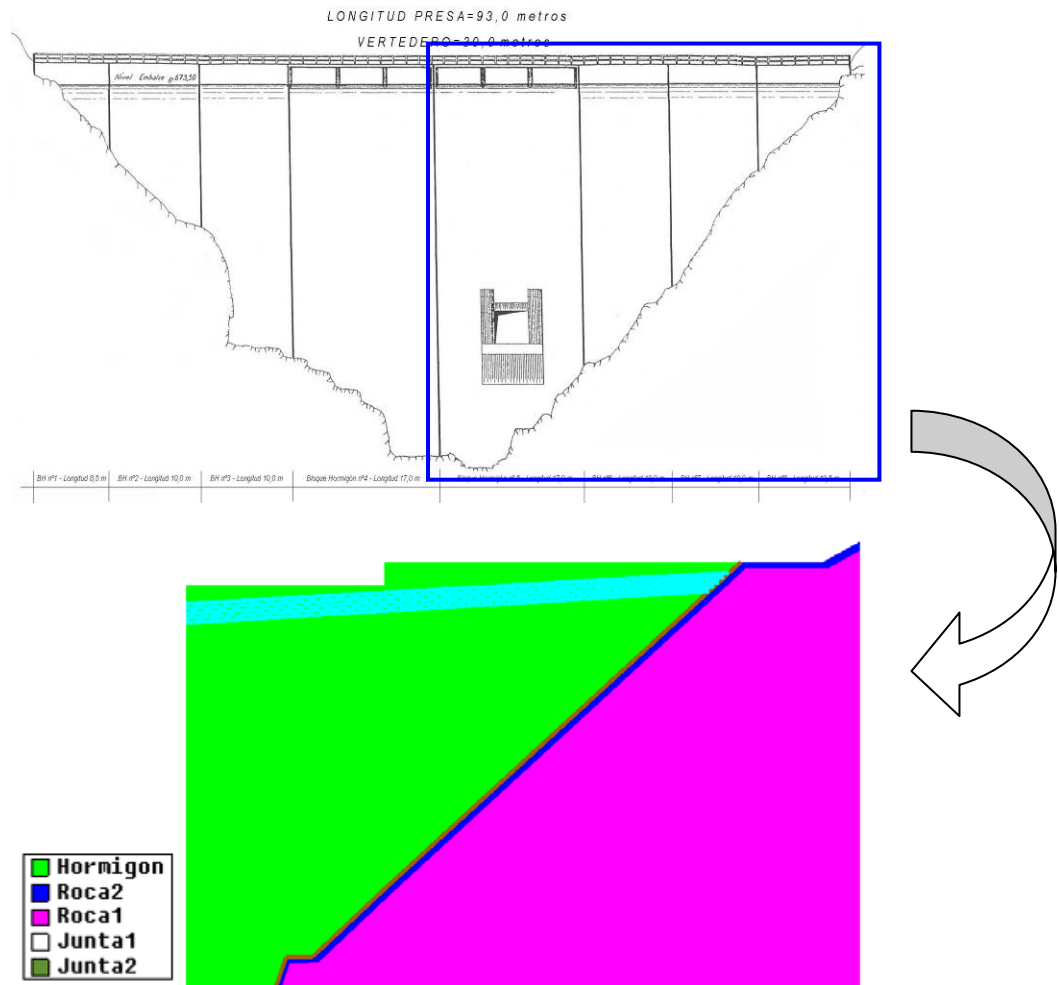


Figura 3. Presa de Torán vista desde aguas arriba (superior) y geometría empleada en la modelización de la presa.

En la Figura 4 se presenta la malla generada y se indica el número de elementos y de nodos resultantes. La densificación de la malla es mayor en la región de las juntas y de la unión presa-suelo. Como las reacciones de oxidación se habrían producido en las zonas más superficiales del terreno, se ha discretizado una franja estrecha de roca (en color azul en Figura 4 – terreno 1) de 1 metro de espesor, de modo que en los nodos correspondientes de los elementos continuos de esa franja se incluyen las deformaciones impuestas debidas a las expansiones del terreno.

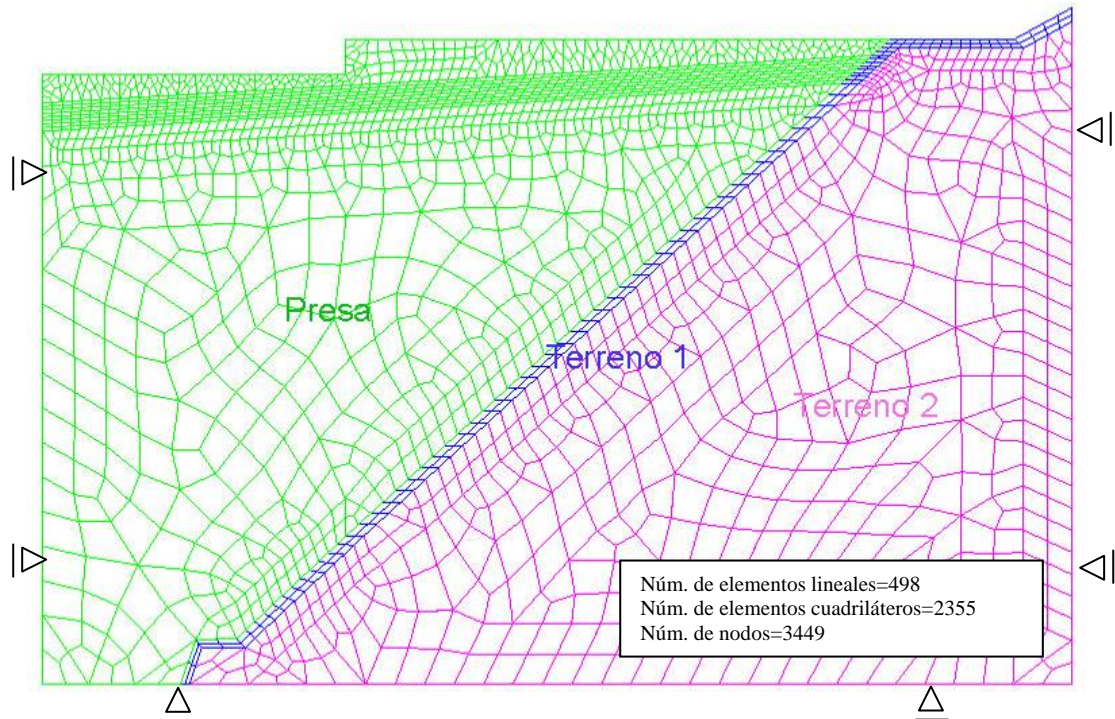


Figura 4. Malla generada y número de elementos y nodos.

En cuanto a las condiciones de contorno, se restringen los desplazamientos horizontales de los nodos ubicados en los bordes verticales del terreno de cimentación y los desplazamientos verticales del borde horizontal inferior.

4. RESULTADOS

Se han empleado los siguientes parámetros materiales: para el hormigón un módulo de Elasticidad (E) = 3.000.000 t/m² y coeficiente de Poisson (ν) = 0,2, y para el terreno: módulo de Elasticidad (E) = 6.000.000 t/m² y coeficiente de Poisson (ν) = 0,2 (en este análisis no se ha considerado el peso propio). A los elementos juntas se les ha asignado unos coeficientes de rigidez elástica con los valores más altos posibles, a fin de garantizar que no incorporan una mayor deformabilidad elástica ficticia. Estos trabajos han formado parte de la tesis doctoral de Serafín Araujo [5].

La acción de las expansiones se incluye mediante deformaciones impuestas en cada nodo de los elementos del terreno que pertenecen a la zona denominada Terreno 1 en la Figura 4, de manera equivalente al caso de incrementos de temperatura. La cinética de la reacción de oxidación de los sulfuros necesita de agua y oxígeno, por lo cual la intensidad de la expansión es distinta de acuerdo con la profundidad o distancia a coronación. En nuestro caso, la zona superior se expandirá mucho más, con lo cual, la presión ejercida en coronación es mayor y va disminuyendo a medida que va aumentando la profundidad. Por lo tanto, las deformaciones impuestas que se apliquen deben tener en cuenta este efecto. Para ello, se ha aplicado una variación del siguiente tipo:

$$\varepsilon_i = K \left(\frac{y_i - y_1}{y_n - y_1} \right)^t \quad (1)$$

donde: ε_i = deformación impuesta en el punto i ; K = factor de proporcionalidad; y_i = coordenada en la dirección Y del punto i ; y_1 = coordenada en la dirección Y del punto 1; y_n = coordenada en la dirección Y del punto n ; t = parámetro que influye en la forma de la curva (Figura 5).

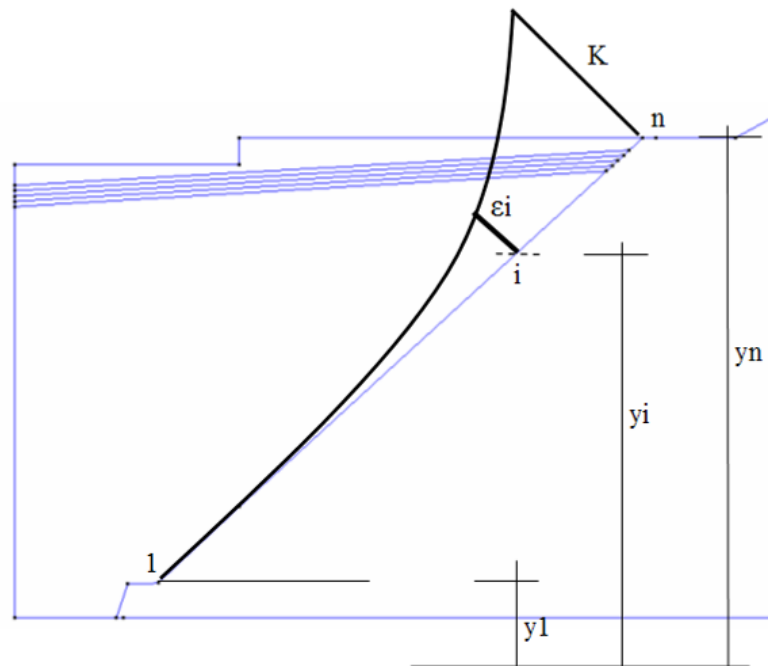


Figura 5. Representación esquemática de las deformaciones impuestas debidas a las expansiones incluidas en la zona de roca cercana a la interfase terreno-presas.

4.1. ANÁLISIS LINEAL

En las Figuras 6 a 8 se presentan los resultados del análisis lineal en términos de desplazamientos y tensiones principales. En la Figura 6 se muestra la malla deformada con un factor de amplificación de 200 veces a fin de posibilitar una mejor visualización.

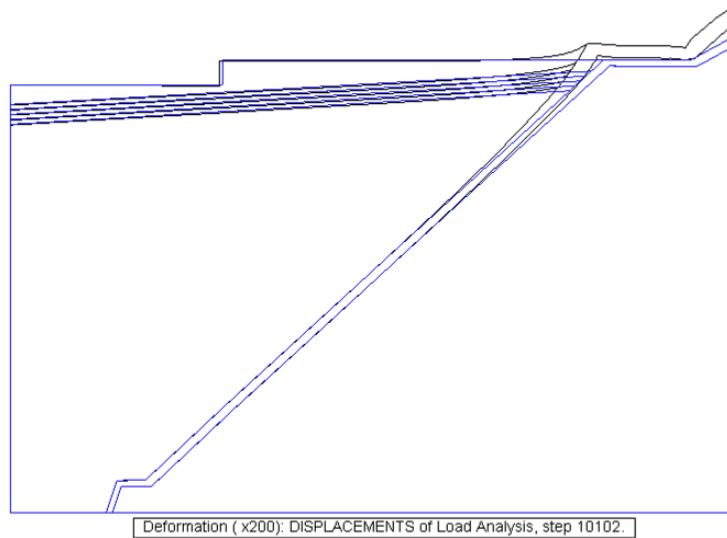


Figura 6. Malla deformada (x200) debido a la deformación del terreno.

En las Figuras 7 y 8 se pueden apreciar las representaciones vectoriales de las tensiones principales σ_1 y σ_2 , respectivamente, generadas en la zona de coronación de presa cercana al estribo, indicada con un recuadro en las figuras (la escala de representación adoptada en cada gráfico es diferente a fin de propiciar una mejor visualización). Se puede apreciar en estas figuras que las tensiones de compresión siguen una orientación similar a la de los elementos junta insertados en la discretización, y que se producen tensiones de tracción en la dirección perpendicular. Este hecho indica que las tensiones principales generadas por la deformación impuesta en las zonas superficiales del terreno tienden a producir una tendencia de fisuración que concuerda con la orientación de las fisuras reales observadas sobre los paramentos de la presa.

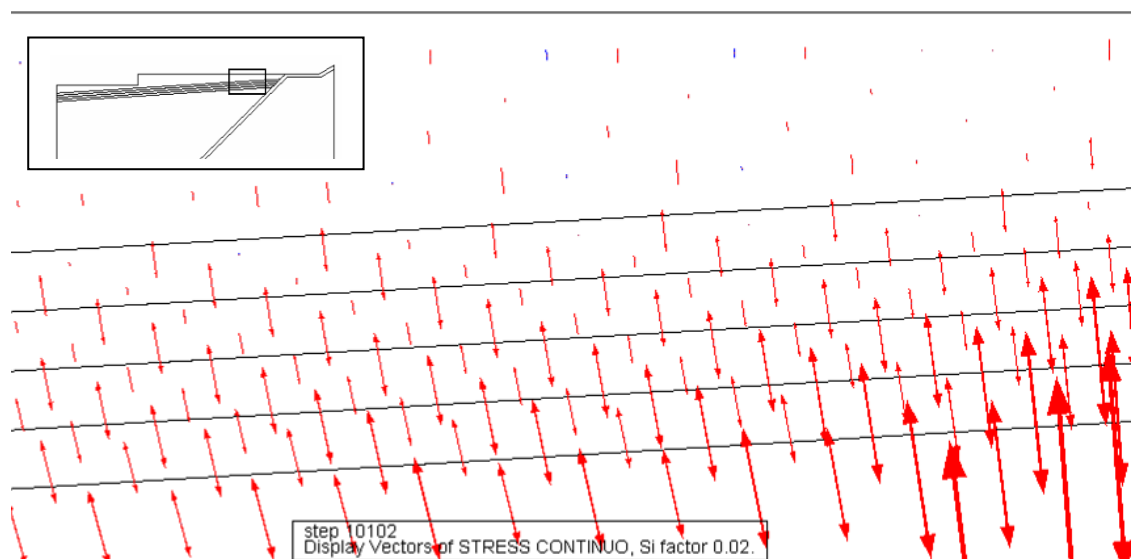


Figura 7. Representación vectorial en la zona detallada de la tensión principal σ_1 debido a la deformación del terreno (rojo para tracción y azul para compresión).

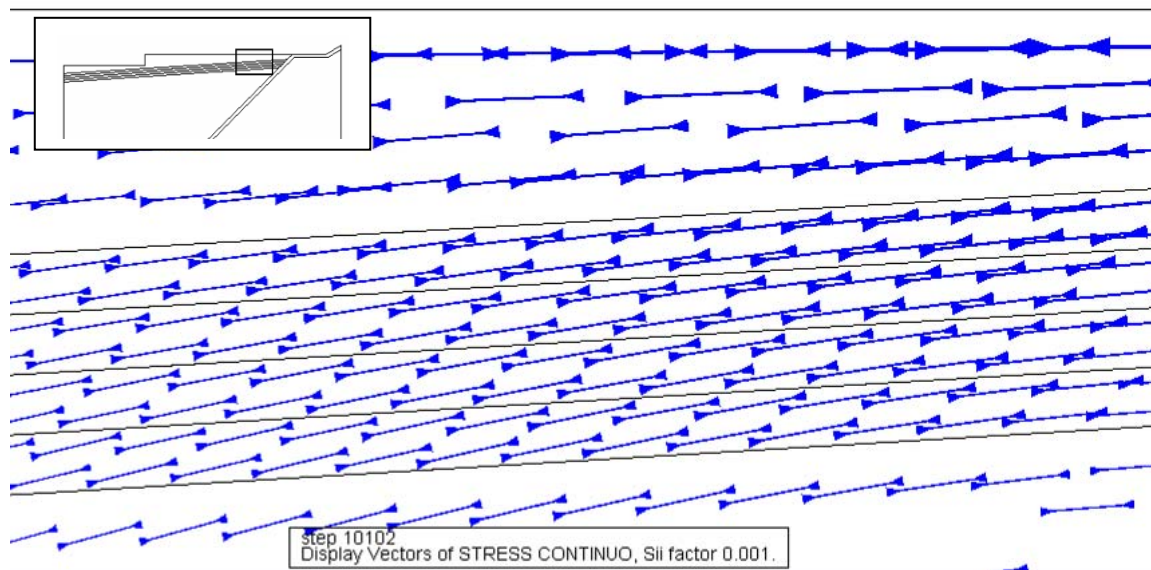


Figura 8. Representación vectorial en la zona detallada de la tensión principal σ_2 debido a la deformación del terreno (azul para compresión).

4.2. ANÁLISIS NO LINEAL

Para el análisis no lineal de las fisuras de la presa de Torán se ha empleado una ley constitutiva de junta basada en la teoría de la elasto-plasticidad que incorpora conceptos de la Mecánica de Fractura [5-7]. En la ley de junta no lineal se han empleado unos valores de los parámetros razonables para este caso de estudio, con una resistencia a tracción de 2 MPa.

En la Figura 9 se presenta el estado de fisuración obtenido en cuatro situaciones distintas del incremento progresivo de las deformaciones impuestas. En la figura se representan las juntas que han alcanzado la fisuración, en términos de la energía de fractura disipada en los nodos de las juntas en cada momento del análisis. Se puede apreciar claramente en los gráficos que se produce un estado de fisuración progresiva que se inicia en las juntas situadas a la derecha, más cercanas al estribo, y que el proceso evoluciona de manera continua de derecha a izquierda activando las juntas vecinas. Los resultados de este análisis no lineal concuerdan con el estado de fisuración apreciado en obra en el paramento aguas abajo, y presumiblemente reflejan adecuadamente la evolución del proceso de fisuración progresiva que tuvo lugar en la presa.

5. CONSIDERACIONES FINALES

Los resultados numéricos obtenidos de la modelización empleada a fines de explicar el origen de la fisuración de orientación casi horizontal observada en paramento aguas abajo de la presa de Torán permiten concluir que:

- la orientación de las tensiones de tracción en la zona donde se han insertado las juntas, pone de manifiesto que la tendencia de fisuración que predice el modelo representa el comportamiento observado.

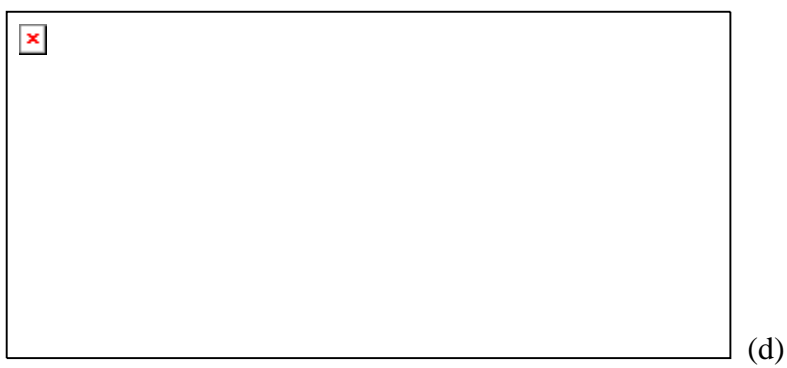
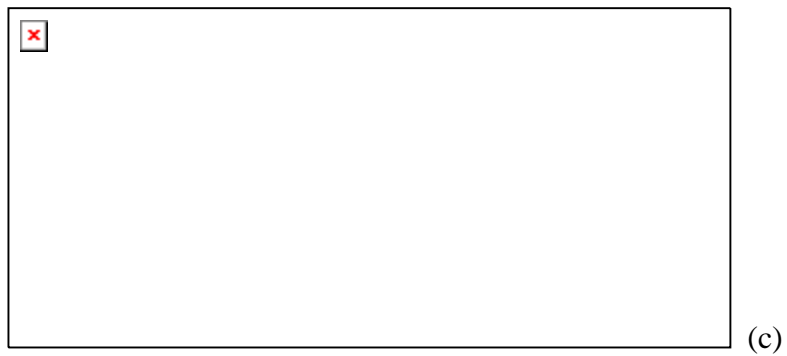
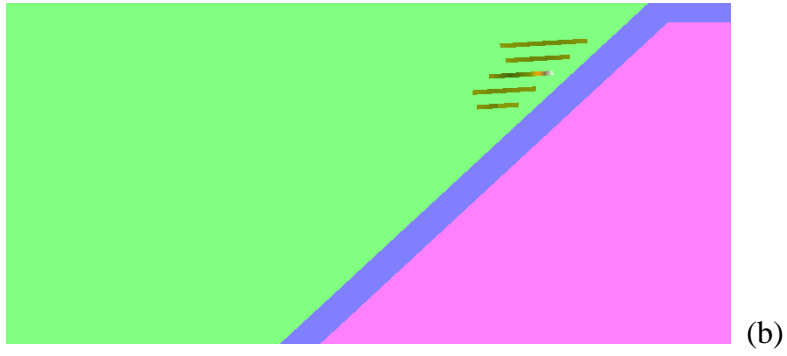
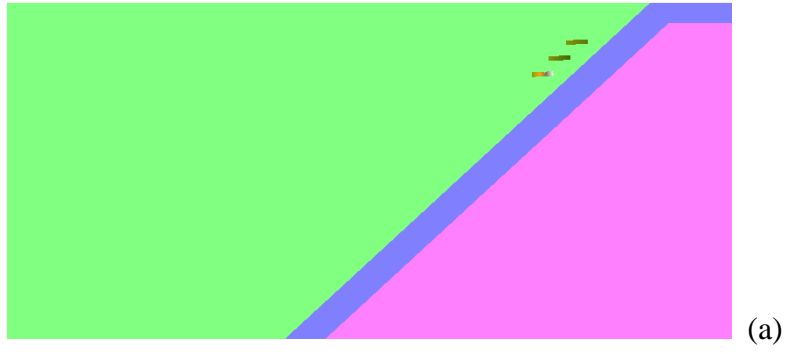


Figura 9. Análisis no lineal: evolución del estado de fisuración en la zona de coronación de la presa de Torán.

- la inclusión de elementos junta sin espesor con una inclinación de $3,5^\circ$ es una hipótesis razonable ya que, además, las tensiones de compresión en esta zona tienden a acompañar la pendiente de las referidas juntas.
- la fisuración comenzaría a producirse en la zona de coronación cercana a los estribos, y luego seguiría desarrollándose de manera progresiva hacia la zona donde se encuentra el vertedero.
- el análisis numérico no lineal ha dado unos resultados que concuerdan significativamente con el estado de fisuración apreciado en obra en ambos paramentos, y permiten establecer que presumiblemente la evolución real del fenómeno ha seguido un proceso similar al que predice el cálculo.

Agradecimientos

Los autores agradecen el continuado apoyo de ENDESA GENERACIÓN, en el estudio de presas con expansiones. Asimismo agradecen la ayuda recibida en el proyecto DAMA del Ministerio de Educación y Ciencia MEC BIA2005-09412-C03-03.

Referencias

- [1] AGUADO, A., AGULLÓ, L., CASANOVA, I. AND LÓPEZ, C. M., 1998. Estudio de fenómenos expansivos en presas de hormigón. De la micro a la macroestructura. Comité Nacional Español de Grandes Presas (ed.).
- [2] CASANOVA, I, AGULLO, L. AND AGUADO. A., 1996. Aggregate Expansivity Due to Sulfide Oxidation - I. Reaction System and Rate Model. Rev. Cement and Concrete Research. Vol. 26. n° 7. Agosto 1996. pp. 993-998.
- [3] CASANOVA, I., AGUADO, A. AND AGULLÓ, L., 1997. Aggregate expansivity due to sulfide oxidation - II. Phisico-chemical modeling of sulfate attack. Cem. Concr. Res., 27, pp.1627-1632.
- [4] LÓPEZ C.M., 1999. Análisis microestructural de la fractura del hormigón utilizando elementos finitos tipo junta. Aplicación a diferentes hormigones. Tesis doctoral. Universitat Politècnica de Catalunya. ETSECCCP-UPC, E-08034 Barcelona, España.
- [5] SERAFIM ARAUJO, G., 2008. La reacción sulfática de origen interno en presas de hormigón. Propuesta metodológica de análisis. Tesis doctoral. Universitat Politècnica de Catalunya. ETSECCCP-UPC, E-08034 Barcelona, España.
- [6] CAROL I., PRAT PC., LÓPEZ CM., 1997 A normal/shear cracking model. Application to discrete crack analysis. J of Engineering Mechanics 123(8):765-773.
- [7] CAROL, I., LÓPEZ C. M. AND ROA, O., 2001. Micromechanical analysis of quasi-brittle materials using fracture-based interface elements, Int. J. Numer. Meth. in Engrg, 52, 193-215.