

COMITÉ NACIONAL ESPAÑOL DE GRANDES PRESAS

HIPÓTESIS DE PARTIDA DEL COMPORTAMIENTO DE LA PRESA DE PASO NUEVO

**Jaime Espinós¹, Felipe Río², André Campos³, Izelman Oliveira⁴
y Antonio Aguado⁵**

RESUMEN: La presa de Paso Nuevo es una presa es del tipo arco gravedad construida en la década de 1960. En el año 1984 se dispuso de un sistema de medidas de nivelaciones y colimaciones. Si bien los primeros años el comportamiento era normal, a partir de 1994 se han ido midiendo y detectando un comportamiento singular con movimientos no recuperables de las bases de coronación, tanto de las colimaciones como de las nivelaciones.

En el contexto de relación existente entre ambas partes (ENDESA y UPC), se ha planteado la hipótesis de partida del comportamiento. Para esto se ha realizado un estudio minucioso de la información histórica que se dispone de la presa, así como diversas visitas a la misma para identificar in situ cada una de las variables a analizar. Esta metodología es básica en cualquier proceso de diagnóstico.

Tras estos primeros análisis, se ha establecido, como hipótesis más razonable, que el origen del comportamiento sea una expansión del hormigón, que afecta algunas tongadas de algunos bloques como consecuencia de un

¹ Ingeniero de Caminos, responsable Obra Civil UT Zaragoza

² Ingeniero de Caminos, responsable Obra Civil UPH Ebro Pirineos

³ Doctorando, Departamento de Ingeniería de la Construcción, Universitat Politècnica de Catalunya.

⁴ Doctorando, Departamento de Ingeniería de la Construcción, Universitat Politècnica de Catalunya.

⁵ Profesor Dr. Ing., Departamento de Ingeniería de la Construcción, Universitat Politècnica de Catalunya.

frente de cantera inadecuado con pirritas y/o pirrotinas. Esta disimetría conduce a una cierta sollicitaciones de torsión al conjunto de la presa, que se refleja sus efectos en fisuras de este tipo en galería superior de la misma (estribo margen izquierda).

1. INTRODUCCIÓN

La expansión del hormigón es un problema cada vez más presente en publicaciones técnicas, que afecta en muchos casos a presas de hormigón. Las reacciones químicas con los áridos son los tipos más comunes de expansión, de los cuales la reacción álcali-árido (RAA) es el tipo más frecuentemente encontrado y consecuentemente el mas estudiado tanto en España (Belesar ¹) cuanto en el extranjero (Mactaquac –Canadá ², Fontana – Estados Unidos ², Chanbon – Francia ¹⁶, Mascarenhas –Brasil ³). Sin embargo un mecanismo de deterioro del hormigón por expansión, muy similar a RAA, puede producirse por la presencia de sulfuros en los áridos.

En la Presa de Paso Nuevo, situada en el río Esera, correspondiente a la cuenca del Ebro, en el término municipal de Benasque (Huesca), se detectó , a partir del año 1994, en las bases de mediciones de nivelación y colimación en diversas bases en coronación, pequeños incrementos en las cotas de nivelación y en los movimientos de colimación. También pudo observarse algunas zonas con fisuración enramada y fisuras oblicuas en la galería cerca del estribo izquierdo. Esta presa es del tipo arco gravedad (ver figura 1), y fue construida entre 1966 y 1969, tiene una altura máxima de 72,60 m y 195m de longitud en coronación.

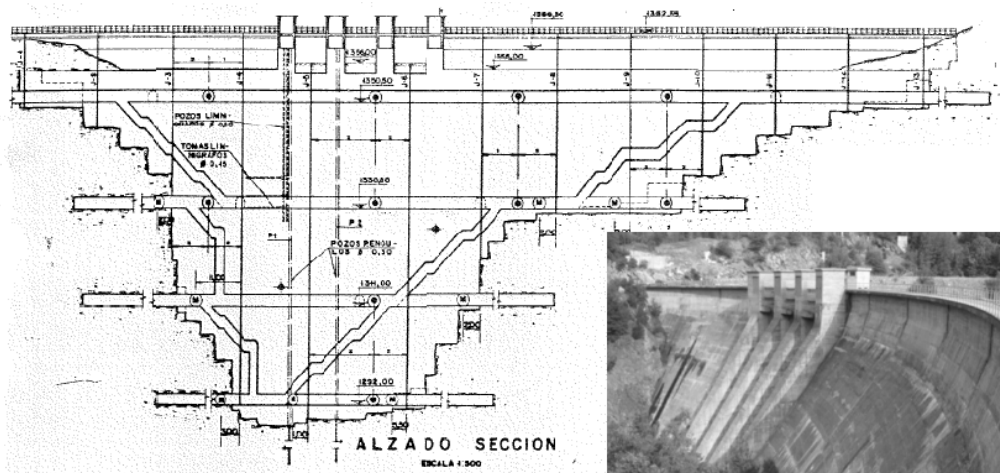


Figura 1- Alzado de la presa de Paso Nuevo

El objetivo de este trabajo es presentar una hipótesis inicial de comportamiento que explique el comportamiento singular registrado en la presa. Para esto se ha llevado a cabo un estudio detallado de la documentación histórica de la cual se dispone y realizado visitas a la estructura para identificar las diversas variables a analizar. Tras este planteamiento inicial se está trabajando en diversos métodos numéricos y experimentales para corroborar la hipótesis inicial realizada

2. COMPORTAMIENTO PRESENTADO POR LA PRESA

Del análisis de los movimientos registrados por la auscultación de la presa de Paso Nuevo medidos de octubre de 1984 hasta enero de 2008, se observa la existencia de desplazamientos no recuperables en colimación en dirección aguas arriba de orden de 42 mm y incrementos de nivelación no recuperables de orden de 28mm, tal como se muestra en la Figura 2.

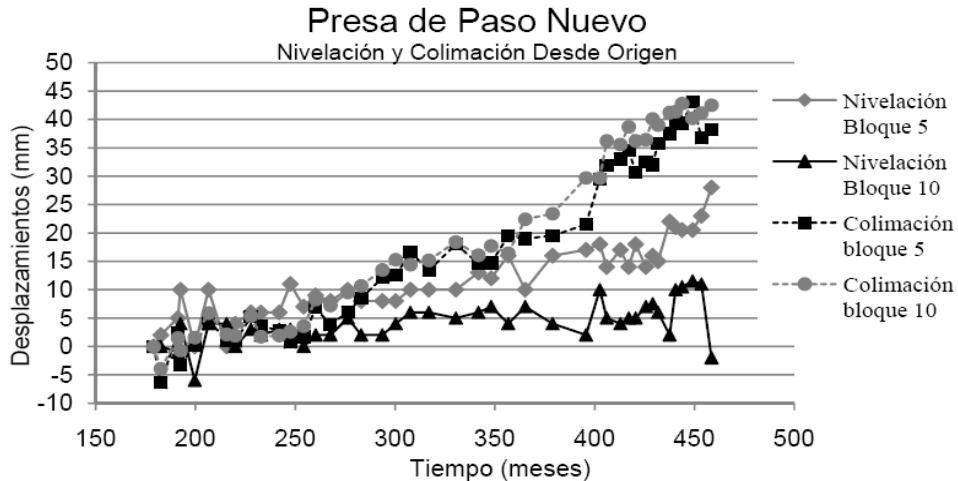


Figura 2- Evolución en el tiempo de los movimientos de nivelación y colimación en coronación.

Comparando los desplazamientos entre las bases de medida se constata que los bloques cerca de los estribos se mueven más, tanto en colimación como en nivelación, que los bloques centrales, como se puede observar en la figura 3. Este comportamiento es inusual ya que normalmente se espera que los bloques centrales, que son mayores y más esbeltos que los cercanos a los estribos, se muevan más.

En la presa hay también zonas con fisuración enramada cerca de los estribos, y en el medio de la presa cerca de la base, pero en las demás regiones el hormigón tiene muy buen aspecto.

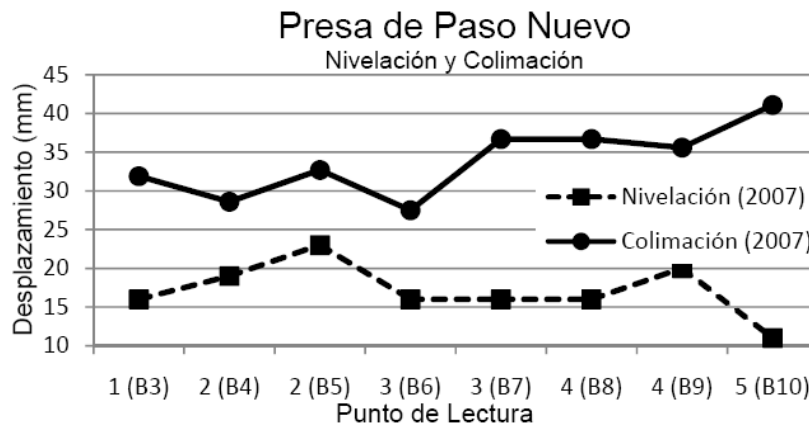


Figura 3 - Movimientos de nivelación y colimación en coronación de los distintos bloques.

3. ESTUDIO DE LA DOCUMENTACIÓN E INSPECCIÓN VISUAL

3.1. DOCUMENTACIÓN HISTÓRICA

Con la intención de desarrollar una hipótesis de comportamiento que explique las singularidades en el comportamiento observado, se ha llevado a cabo un estudio detallado de la documentación histórica de la presa, inspecciones visuales realizadas durante dos visitas a la estructura (en los días 05/02/08 y 29/07/08) y estudio de la geología del local con mapas del Instituto Geológico y Minero de España¹. Los documentos analizados de la presa fueran:

- Diario Técnico de la presa de Paso Nuevo. Comprende desde 13 de mayo de 1968 hasta el 10 de agosto de 1999, si bien hay un resumen inicial de las obras anteriores en la fecha de inicio del libro;
- Planos de Construcción – Tomo I;
- Informes sobre trabajos de impermeabilización (1968-1970) e inspecciones técnicas (1997, 1999, 2000, 2001 y 2002);
- Datos de nivelación, colimación, péndulos, manómetros, movimientos de juntas y afogarodes, a partir de 1984 hasta 2007;
- Análisis de agua (1999, 2000 y 2001).

Con base en el Libro de la Presa, se ha reestablecido el mapa de hormigonado (Figura 4), en el que se observa unos bloques en los que no se dispone de información, contruidos con anterioridad al verano de 1968.

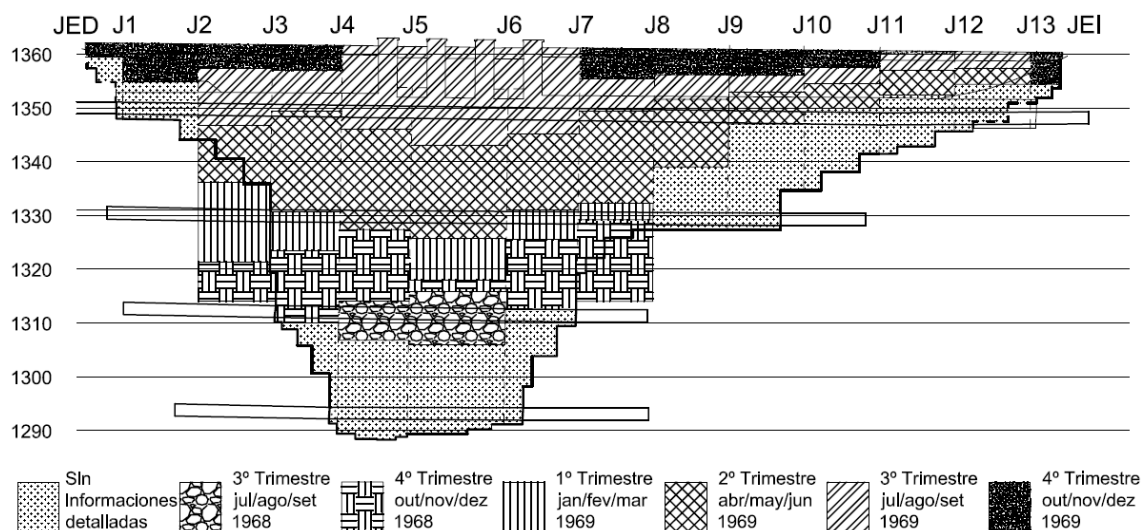


Figura 4- Mapa de Hormigonado.

3.2. ESTUDIO DE LA GEOLOGÍA

En primer lugar los resultados del estudio de los mapas geológicos indican que el área cercana de la presa es del período Cuaternario, Devónico y Silúrico, y, estando constituida concretamente por aluvión indiferente, calcita y pizarra, y pizarras metamórficas respectivamente. A falta de la contrastación

experimenta de la mineralogía, es posible que los siguientes minerales puedan estar presentes en la interfaz presa-roca o dentro del árido utilizado, caliza, calcita, cuarcita y horneblenda. La presencia de estos minerales podría producir una expansión química extensa, dependiendo en las cantidades de cada uno de los componentes.

Analizando los planos del Instituto Geológico y Minero de España⁴ correspondientes a la zona de ubicación de la presa puede constatar que la geología puede cambiar notablemente con pequeñas distancias.

3.3. INSPECCIÓN VISUAL

En las visitas in situ, se constató que las áreas con fisuración enramada se ubicaban en bloques cercanos a los estribos y en los bloques centrales bajo de la cota 1310,00 m. También se observó la fisuración oblicua en la galería de la cota 1350,00 m cerca de la junta 11, como se puede ver en la Figura 5.

Otro punto de interés observado en la visita es la existencia de dos frentes de cantera (Figura 6), una pequeña que corresponde al inicio de los trabajos de hormigonado, y una grande que probablemente fue utilizada en la mayor parte de la presa.



Figura 5- Fisuración oblicua en la galería cota 1350 m cerca de la junta 11

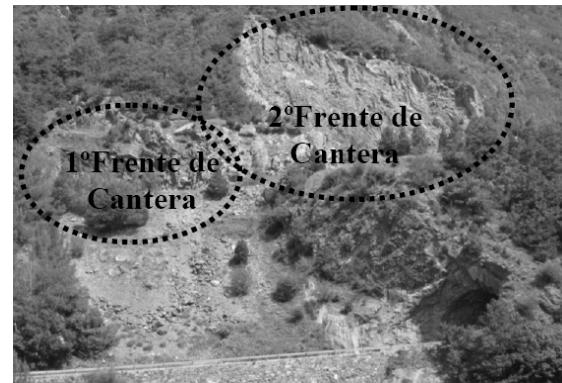


Figura 6- Frentes de cantera utilizados en el hormigonado de la presa

3.4. DIFERENCIAS ENTRE PROYECTO Y REALIDAD

Comparando las informaciones obtenidas a partir de los planos de construcción (Figura 4) con la visita in situ realizada en el día 29 de julio de 2008 fue posible observar algunas diferencias entre la estructura proyectada y la construida, como por ejemplo la existencia de bloques de cierre de hormigonado (que no están en los planos de planta) en el estribo derecho (aguas arriba y aguas abajo) y en el estribo izquierdo (aguas abajo).

La Figura 7 muestra un detalle los bloque de cierre de la presa de Paso Nuevo. Como se ve, están llenos de fisuras enramadas, características de expansión del hormigón. Debido a la ubicación de éstos, una expansión en ellos podría crear un empuje en los bloques cerca de los estribos en dirección aguas arriba, lo que podría producir los desplazamientos de los puntos de colimación en los estribos.

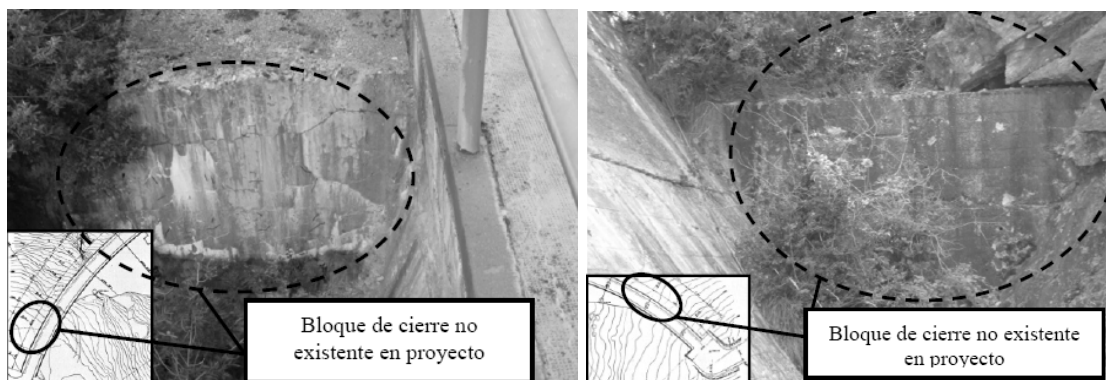


Figura 7- Bloques de cierre en los estribos – aguas abajo.

4. HIPÓTESIS DE COMPORTAMIENTO

4.1. REACCIÓN SULFÁTICA INTERNA (RSI)

Después del análisis de la documentación y de la inspección visual queda la duda de ¿por qué dos frentes de cantera?. Una posibilidad es que empezaran a hormigonar con áridos extraídos del primer frente y, al constatar posibles problemas en los áridos, abrieran el segundo frente de cantera. Esta hipótesis se refuerza al observar la geología local, que presenta importantes variaciones en pequeñas distancias.

Otro punto interesante es que al comparar la ubicación de las fisuras enramadas con el mapa de hormigonado, se pone de manifiesto que todas están en la zona correspondiente al hormigonado realizado en la primera fase de la obra y que no viene reflejado en el libro de presa (sin informaciones detalladas en la Figura 4). No hay información de cuando se cambió de cantera en la documentación, pero es razonable pensar que el hormigonado inicial no reflejado en el libro corresponde principalmente al primer frente de cantera.

Como primera hipótesis se planteó que la presa podría presentar reacciones de expansión, causada por la presencia de sulfuros de hierro en los áridos utilizados en el hormigón, hipótesis que se ve reforzada después de un análisis de los problemas ocurridos en presas situadas en ubicaciones cercanas y después de una visita de inspección in situ. En esta visita se observaron manchas en la superficie del hormigón. Estas manchas presentan con un color marrón oscuro (posible oxidación de los sulfuros de hierro presentes en los áridos), sin embargo no fue posible concluir si estos sulfuros son del mineral piritita (FeS_2) y/o pirrotina (Fe_{1-x}S)⁵.

La reacción sulfática interna (RSI) puede ocurrir en dos diferentes etapas dentro del hormigón: una reacción primaria por la oxidación del sulfuro de hierro (pirritas y/o pirrotinas) presente en el árido y una reacción secundaria cuando los sulfatos e iones de hidrógeno liberados en el poro de la solución reaccionan con la pasta de cemento Portland (especialmente aluminatos y/o portlanditas) para formar expansiones adicionales en las fases: yeso, monosulfoaluminato y finalmente, etringita⁶. Siendo así, parece razonable pensar que se trata de un problema de reacción sulfática interna con origen en la oxidación de sulfuros de hierro presentes en los áridos de la primera cantera.

Esta hipótesis parece adecuada visto que:

- Los bloques con mayor elevación de la cota de nivelación son los que tienen gran cantidad de hormigón de primera cantera (bloque 5 entre J5 y J6) (Figura 8);
- El bloque con menor elevación de la nivelación es el que tiene menos hormigón de la primera cantera (bloque 7 entre J7 y J8);
- Los movimientos de colimación son mayores cerca de los estribos por tener esta zona más hormigón de la primera cantera.

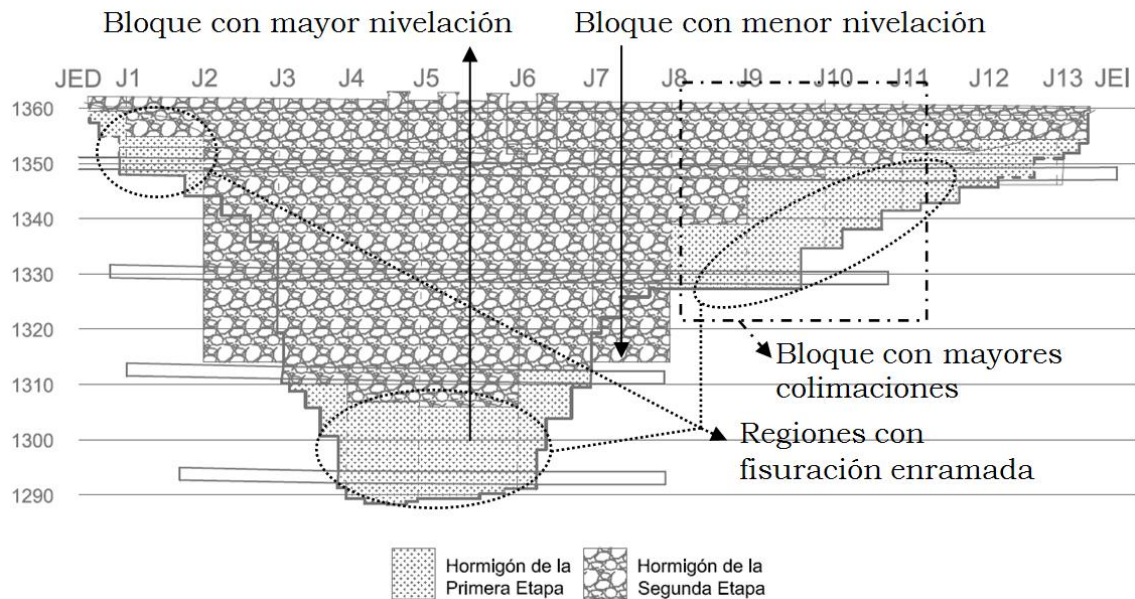


Figura 8- Mapa de hormigonado

Si las reacciones expansivas ocurren predominantemente en el hormigón con áridos de la primera cantera, como define la hipótesis, el fenómeno no es generalizado. Esta afirmación se comprobó al hacer un paralelismo entre los movimientos obtenidos, con la esbeltez y altura de los bloques.

Esta verificación de la relación entre la esbeltez de los bloques y sus movimientos relativos fue propuesta con base en los estudios realizados por Aguado et al., 1988⁷ donde se estudiaron las posibles causas que del anómalo comportamiento de la Presa de Graus (España). En este estudio, fue posible verificar que los movimientos diferentes de cada bloque son fruto de una acción similar en todos ellos, si bien estos tienen una geometría diferente. El fenómeno que se ha expresado como expansivo se producía en toda la presa.

Aplicando lo mismo para la presa de Paso Nuevo se obtienen los resultados de la figura 9. Para la presa de Graus existía una correlación entre esbeltez-alineación y altura-nivelación, pero para Paso Nuevo no hay correspondencia, lo cual es coherente con el hecho de que el problema no es general, sino que afecta a unos bloques en concreto, en especial a los hormigonados con los áridos procedentes del primer frente de cantera.

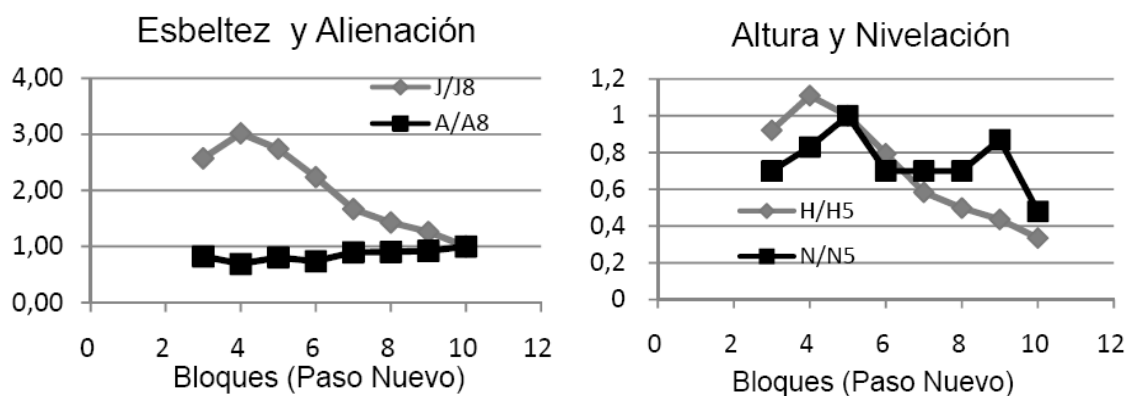


Figura 9- Relación entre esbeltez (J) y alineación (A); Relación entre altura (H) y nivelación (N)

4.2. TENDENCIA DE COMPORTAMIENTO

Con los datos de colimación y nivelación registrados, es posible representar la componente no recuperable de los movimientos a través de un modelo matemático, ya utilizado con buenos resultados por Araújo, 2008⁶ y que fue desarrollado por Aguado et al., 1998⁸. Esto consiste en un modelo matemático exponencial que permite ajustar una curva que reproduce el historial de mediciones de los desplazamientos no recuperables, y posibilita también una predicción del comportamiento futuro indicando los probables tiempos de estabilización. La ecuación exponencial del modelo es:

$$y = A + B \left(1 - e^{-\left(\frac{t}{C}\right)^P} \right)$$

Donde A es el valor de la ordenada en el origen, B el rango de variación de la curva en ordenadas, t es el tiempo, C el valor de la abscisa para el cual se produce el punto de inflexión en caso de curvas con P mayor que 1 y P es el parámetro que da la forma a la curva.

El gráfico de la Figura 10 se ha hecho a partir de los movimientos de alineación de la presa de Paso Nuevo, donde se utilizó como punto de inflexión (C) un valor de tiempo igual a 450 meses. Este valor fue adoptado después de examinar las curvas de regresión hechas para diferentes valores de C (350, 400, 450 y 500 meses) en el bloque 9 de la presa, presentando el mejor coeficiente de correlación (R^2). En él se puede distinguir dos tendencias distintas, donde los bloques 1, 2, 3 y 4 (conjunto 1) tienen una velocidad (mm/mes) similares entre sí, sin embargo más pequeña que la velocidad mostrada por los bloques 5, 6, 7 y 8 (conjunto 2).

Estas divergentes tendencias entre las curvas de regresión pueden deberse a dos posibilidades: una diferencia en la cantidad de material potencialmente reactiva entre los dos conjuntos o desiguales condiciones para la ocurrencia de reacciones y expansión.

En la primera, una cantidad mayor de material potencialmente reactivo conduce a una mayor velocidad en las reacciones de expansión del conjunto 2 y probablemente un mayor tiempo de estabilización, también determinado como tiempo de pasivación en la tesis doctoral de Araújo, 2008⁶. Esto está en consonancia con la hipótesis de comportamiento desarrollada, una vez que el conjunto 1 tienen cantidades mayores de hormigón de primera cantera en relación al conjunto 2.

En la segunda, condiciones desiguales entre la disponibilidad de oxígeno y agua (humedad) para los bloques pueden generar valores diferentes de expansión para un mismo periodo de tiempo.

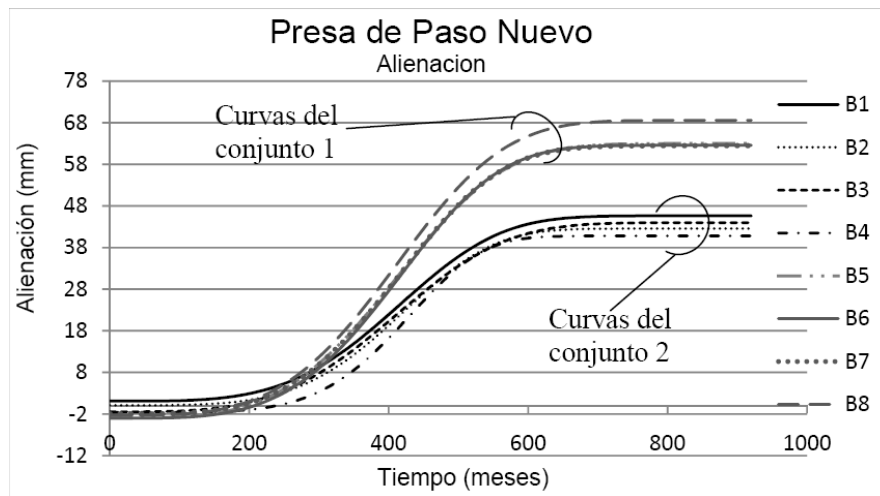


Figura 10 - Movimientos alineación medidos y curvas ajustadas (C=450 meses)

4.3. TORSIÓN EN LA PRESA

En cuanto a las fisuras oblicuas en la galería de la cota 1350 m, Estas tienen formato generalmente decurrente de efectos de torsión, pero ¿qué podría causar torsión en la presa?

Una hipótesis que explica las fisuras es el hecho de que, como se observa en los gráficos de colimación, los bloques próximos al estribo tienen desplazamientos hacia aguas arriba mayores que los centrales y, debido a la diferencia de desplazamientos, se genera una torsión como se puede ver en la Figura 10.

Las fisuras presentadas en la figura 5 están solamente en el estribo izquierdo, lo cual puede ser debido a que la forma del estribo derecho ofrece resistencia al movimiento hacia aguas arriba, lo que reduce el efecto en relación al izquierdo, y también a que la cantidad de hormigón de primera cantera es mayor en el estribo derecho.

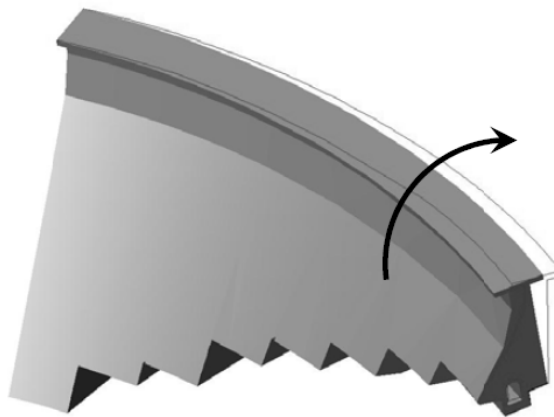


Figura 10- Efecto de torsión en la presa

4. CONSIDERACIONES FINALES

La hipótesis inicial de trabajo desarrollada permite explicar todo el comportamiento anómalo de la presa de Paso Nuevo, siendo por lo tanto muy razonable, sin embargo deberá verificarse con resultados experimentales de medidas sobre testigos y estudios numéricos asociados.

Para esto se ha propuesto una campaña de extracción de testigos. El número de sondeos y su localización obedecerán a criterios basados en un intento de optimizar de una parte, la representatividad de las muestras en relación al problema planteado y de otra, los costes de extracción.

En el desarrollo de la investigación se ha puesto de manifiesto una vez más la gran importancia que tiene en cualquier obra el reflejar documentalmente el proceso de actuación y la conservación de ésta información, habiendo sido, en este caso, la información del proceso de construcción de singular ayuda en el establecimiento de hipótesis.

REFERENCIAS

1. Saouma, V.; Xi, Yunping. Literature Review of Alkali Aggregate Reactions in Concrete Dams. Under Contract from Swiss Federal Office for Water and Geology FOWG Nov. 10, 2004
2. Herrador, F. M., Martínez-Abella, F. Dopico R. R. J. Experimental evaluation of expansive behavior of an old-aged ASR-affected dam concrete: methodology and application Materials and Structures 15 February 2007
3. Sabbag F. A. Verificação Da Existência De Reação Álcali-Agregado No Concreto Da Uhe De Mascarenhas. Universidade Federal Do Paraná. Curitiba 2003
4. Instituto Geológico y Minero de España (1971), "Mapa Geológico de España, E. 1: 200.000, Síntesis de la Cartografía existente.", Madrid.
5. CASANOVA, L. AGULLO and A. AGUADO. Aggregate expansivity due to sulfide oxidation – I. Reaction system and rate model Departament d'Enginyeria de la Construcció, Edifici C 1, Universitat Politècnica de Catalunya, E-08034 Barcelona, Spain. Cement and Concrete Research, Vol. 26, No. 7, pp. 993-998.1996
6. ARAUJO G. S. La reacción sulfática de origen interno en presas de hormigón. Propuesta metodológica de análisis. E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. U.P.C. 10 de abril de 2008. Directores: Antonio AGUADO y Carlos M^a. LÓPEZ
7. AGUADO y L. AGULLO. Dictamen sobre las posibles causas que influyen en el anómalo comportamiento de la presa de Graus. Universidad Politècnica de Catalunya, Fuerzas Eléctricas de Cataluña, S.A. (F.E.C.S.A) (Documento núm. 7 Barcelona, Diciembre 1988).
8. AGUADO, A.; AGULLÓ, L.; CASANOVA, L.; LÓPEZ, C. M. (1998), "Estudio de fenómenos expansivos en presas de hormigón. De la micro a la macro estructura." Comité Español de Grandes Presas. Premio José Torán, 103p.