

COMITÉ NACIONAL ESPAÑOL DE GRANDES PRESAS

NUEVA METODOLOGÍA PARA LA PREDICCIÓN DE LA EXPANSIÓN DEL HORMIGÓN EN PRESAS CON RAA

Ana Belén Martín Vacas¹
Esperanza Menéndez Méndez²
Luis María Lacoma Aller³

RESUMEN: Una de las misiones del Departamento de Explotación de Presas de Iberdrola Generación es el mantenimiento de los activos de la Dirección de Generación Hidráulica en condiciones óptimas de seguridad y funcionamiento. Esto incluye las grandes presas, entre las que destaca San Esteban como una de las más estudiadas desde su construcción por la expansión química en su hormigón. Su detección ha supuesto para Iberdrola un punto de partida para numerosos estudios de investigación sobre este fenómeno de interés mundial.

Hasta el desarrollo del proyecto PREXES, la expansión química del hormigón se ha venido diagnosticando con el tipo de reacción y la distribución y nivel de daño en un determinado instante. El objetivo de este proyecto ha sido aplicar a San Esteban una nueva metodología de caracterización del hormigón que permita definir la cinética de la reacción en las distintas zonas de la presa. Más específicamente, se estima la fracción de reacción consumida en el momento de estudio que, junto con el análisis de la

¹ Ingeniera de Caminos, Canales y Puertos. Iberdrola Generación

² Doctora Ingeniera Industrial. Instituto de Ciencias de la Construcción “Eduardo Torroja” (CSIC)

³ Doctor Ingeniero Industrial. Principia Ingenieros Consultores

documentación disponible y ensayos complementarios de caracterización del hormigón, permite zonificar los hormigones con características expansivas distintas.

1. CARACTERÍSTICAS DE LA PRESA DE SAN ESTEBAN



Fig. 1.- Aprovechamiento de San Esteban

La presa de San Esteban está situada en el río Sil a su paso por el término municipal de Nogueira de Ramuín, provincia de Orense. Origina un embalse de más de 200 Hm³ que, con las dos centrales asociadas, constituye el aprovechamiento hidroeléctrico con mayor producción anual media en el sistema Sil de Iberdrola, llegando a superar los 1000 GWh.

Se trata de una presa de hormigón de tipo arco-gravedad, de 115 m de altura desde cimientos y 295 m de longitud en coronación, dividida en 18 bloques. Se concibió con tres órganos de desagüe: el aliviadero de superficie, los desagües de fondo y un túnel aliviadero que fue condenado en 1960. La

presa alberga un conjunto de galerías para reconocimiento, drenaje y control.

San Esteban está cimentada en un terreno estrato-cristalino y granítico, con intrusiones de diabasa y abundantes diques filonianos aplíticos, pegmatíticos y de cuarzo. La compacidad de la roca es grande, su dureza muy acentuada debido a la abundancia de cuarzo y con gran resistencia a la fragmentación.

1.1. COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL

San Esteban se construyó entre 1946 y 1955. Desde el inicio del hormigonado se observaron fisuras en el material que llevaron a sospechar posibles fenómenos de expansión química y que se atribuyeron un exceso de cal libre en el cemento. Esto fue corroborado con ensayos y dio lugar a una modificación en su composición, que produjo una bajada en la resistencia del mismo y motivó un incremento de dosificación de cemento durante el hormigonado. Los diferentes cambios en la composición y dosificación del hormigón han generado zonas con diferentes condiciones expansivas, como se verá más adelante.

A lo largo de la fase de explotación, el Servicio Técnico de Explotación de Presas de la zona Sil de Iberdrola ha venido detectando anomalías propias de la expansión química: retomas húmedas en la zona alta; desalineaciones de bloques en coronación en los planos horizontal y vertical; fisuras horizontales y retomas húmedas en la galería de mayor cota; movimientos irreversibles en la zona superior de las juntas; desplazamientos no recuperables totalmente en coronación y en el paramento visto hacia aguas arriba; y fisuras en forma de mapa en el paramento de algunos bloques. Ello llevó a incrementar las medidas de control y a tratar de mitigar la reacción, tal y como se describe en el siguiente punto.

1.2. MEDIDAS DE CONTROL Y ACTUACIONES

Durante la explotación de la presa se han acometido diversas actuaciones encaminadas a caracterizar el fenómeno y, en lo posible, mitigarlo:

- Intensificación de controles: Se dispusieron nuevos sistemas de auscultación para cuantificar los movimientos de la presa: péndulos combinados; extensómetros de varilla para el control de movimientos entre presa y cimiento, así como dentro de éste; bases de elongómetros en juntas entre bloques; extensómetros de hormigón de varios tipos; y un control topográfico basado en bissección, geodesia y nivelación de precisión.

Los datos proporcionados por todos los dispositivos han revelado un movimiento progresivo de la zona superior de los bloques hacia aguas arriba, una elevación de la coronación y abertura de juntas en su parte superior, todos parcialmente irreversibles.

- Prospección de la fábrica: Se realizaron sondeos con extracción de testigos y pruebas de permeabilidad. Se concluyó que había numerosas coqueras, retomas deficientes, vías de comunicación de agua y fisuras superficiales de escasa profundidad en ambos paramentos.
- Ensayos de liberación de tensiones que proporcionaron unos valores de tensión normales, salvo cerca de las fisuras.
- Análisis de materiales que revelaron la potencial expansividad del árido de cantera (de tipo granítico) fracturado, con cristales alterados y atacables por soluciones alcalinas originando productos expansivos, así como un hormigón muy poroso, con alto contenido en CaO, con áridos alterados y presencia de productos expansivos.
- Modelos estadísticos que reproducían la tendencia de movimiento de la estructura, tal y como hemos descrito anteriormente.
- Trabajos de relleno de juntas de construcción e impermeabilización de la parte superior del paramento mojado para disminuir la entrada de agua, así como campañas de inyección de juntas y de bloques, con el fin de disminuir la penetración de agua y conservar el monolitismo.
- Proyecto de I+D HOREX en el que se investigó el mecanismo de formación y desarrollo de la expansión química del hormigón, los ensayos más acertados para diagnosticarlo y la utilidad de los diferentes modelos matemáticos. Asimismo, se localizaron diferentes zonas de la presa con distinta incidencia de la reacción expansiva que han resultado de gran utilidad en PREXES.

Estas actuaciones han sido muy beneficiosas para diagnosticar el fenómeno en San Esteban y su nivel de incidencia. No obstante, hasta la creación del proyecto PREXES, la expansión del hormigón había sido tratada a nivel global por falta de información específica sobre las distintas zonas de la presa, restando capacidad predictiva a los modelos. En PREXES se ha aplicado una nueva metodología de caracterización del hormigón para identificar la cinética de la reacción expansiva en las diversas zonas. A continuación, se describen los trabajos realizados en este proyecto y las conclusiones obtenidas.

2. ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN

La búsqueda y análisis de la información relacionada con la presa constituyó una actividad imprescindible que requirió gran dedicación del personal involucrado en el proyecto. Para ello, Iberdrola revisó toda la información del Archivo Técnico de la presa, digitalizada en un gestor documental corporativo. La información seleccionada y enviada a las empresas colaboradoras incluyó los análisis del comporta-

miento de la presa desde su construcción, los informes sobre las intervenciones realizadas y los resultados de los ensayos de materiales. Entre estos últimos han sido de gran utilidad las más de 1200 fichas de ensayos de caracterización del cemento realizados durante la construcción, punto de partida para la zonificación de la presa.

3. ENSAYOS

3.1. PROBETAS EXTRAÍDAS

Se analizó el hormigón de distintas zonas de la presa extrayendo sondeos de una longitud aproximada de 3 metros. Las zonas para la extracción de testigos se seleccionaron en función de los movimientos detectados en la presa y de la presencia de fisuras, tomándose además a diferentes cotas y en zonas en las que no se aprecian fenómenos relacionados con la expansión. Los testigos se codifican en relación al bloque y a la cota del sondeo. Se extrajeron los siguientes sondeos: B8I-C, B7I-C, B6I-C, B5I-180, B4I-C, B4I-210, B4I-180, B1I-150, B1D-180, B1D-150, B4D-C, B4D-210, B4D-180 y B5D-180; donde *I* y *D* corresponden a la margen derecha e izquierda de la presa respectivamente, y *C*, 150, 180 y 210 corresponden a las diferentes cotas: coronación, 150, 180 y 210m. Para la caracterización y análisis del hormigón se tomaron muestras de la zona superior (S) e inferior (I) de cada sondeo.

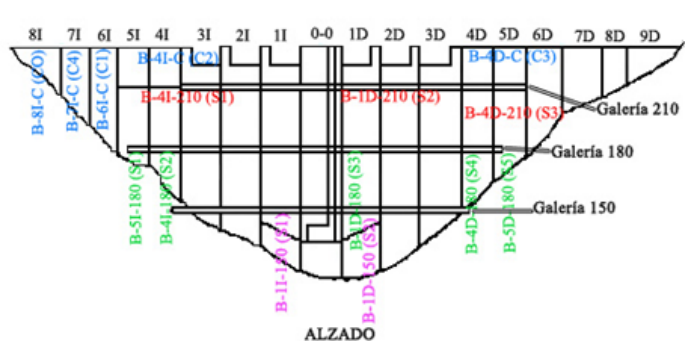


Fig. 1.- Distribución de sondeos extraídos de la presa.

3.2. NIVEL DE DAÑO

Se analizó el grado de desarrollo de la reacción árido-álcali en las diferentes muestras de hormigón. El nivel de daño está dividido en 5 grados, desde el más bajo (nivel 1) hasta el mayor grado de desarrollo (nivel 5). La definición del nivel de daño se basa en el análisis de la presencia, el tipo, la localización y la cantidad relativa de productos de reacción en el hormigón. En el hormigón extraído de la presa se han identificado diferentes niveles de daño, lo que indicaría diferentes grados de avance de la reacción. Estos diferentes grados de avance están relacionados con diferencias en los componentes del hormigón, principalmente cemento y áridos, y/o con la diferente incidencia de las condiciones ambientales a las que está expuesto.

En general, se observa una mayor incidencia y desarrollo de la reacción árido-álcali en la margen derecha, desde aguas arriba de la presa. En la Tabla 1 se recoge el nivel de daño del hormigón de las distintas muestras extraídas.

B8I	DL	B7I	DL	B6I	DL	B5I	DL	B4I	DL	B1I	DL	B1D	DL	B4D	DL	B5D	DL
C-S	2,5	C-S	2	C-S	2,5			C-S	2,5					C-S	0		
C-I	4,5	C-I	3,5	C-I	1,5			C-I	1					C	1		
								210S	0			210S	0	210S	1		
								210I	0			210I	0	210I	0		
						180S	0	180S	0			180S	0	180S	0		
						180I	1,5	180I	0			180I	1	180I	0		
										150S	2,5	150S	0			180S	0
										150I	1	150I	0			180I	1

Tabla 1.- Niveles de daño en las zonas analizadas de la presa

3.3. EXPANSIÓN LIBRE RESIDUAL DEL HORMIGÓN

3.3.1. Descripción del ensayo

Con el fin de analizar la expansión residual del hormigón se extrajeron porciones de testigos de hormigón con una longitud promedio de 30 cm. Para la realización del ensayo se cortan dos superficies perpendiculares al eje longitudinal del testigo y se pegan índices de acero inoxidable con un mortero-cola no expansivo en los extremos. Los testigos se ensayan a una temperatura de 40 °C y 100 % de humedad relativa, midiéndose periódicamente el incremento de longitud con el tiempo y tomando como longitud inicial de referencia la obtenida tras la estabilización de la imbibición inicial de agua. Los testigos de hormigón se comenzaron a medir en el año 2009 con una periodicidad frecuente y variable en el tiempo.

3.3.2. Interpretación de los resultados

Las curvas de expansión muestran dos ramas, quizá por fenómenos diferentes, que conviene individualizar. Para ello se determinaron funciones bilineales que aproximasen los datos experimentales, dando igual peso a ambos lados de la inflexión. Se obtuvieron ajustes para los testigos en coronación y galerías a 150, 180 y 210 m (ver Fig. 2 para algunas de la galería 180 m). Los valores promediados del punto de inflexión (encuentro de los dos tramos) se resumen en la Tabla 2.

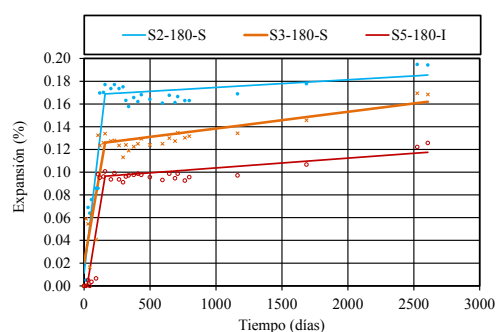


Fig. 2.- Expansión residual a cota 180 m

Galería	Tiempo (días)	Deformación (%)
150 m	164	0,108
180 m	158	0,127
210 m	146	0,129
Coronación	124	0,127

Tabla 2.- Punto de inflexión

De los resultados obtenidos se postula que tiene lugar una primera fase de la reacción pero parte de los geles no han expandido. Una vez extraído el hormigón y saturado de agua, la hidratación de los geles es efectiva. Se necesita menos tiempo para alcanzar el equilibrio al aumentar el grado de microfisuración, dada la mayor movilidad de las especies, y éste tiende a ser menor para los testigos más profundos. Por tanto, la primera parte de la curva de expansión también tiene un origen químico y los resultados reflejan la sensibilidad de la expansión al estado tensional.

Por otra parte, parece que la cantidad de geles no hidratados, potencialmente expansivos, es aproximadamente la misma, independientemente del nivel de compresión. Conviene tener en cuenta que el valor ligeramente inferior en la galería a 150 m proviene de sólo cuatro testigos.

3.4. EXPANSIÓN DE MORTEROS CON ÁRIDOS EXTRAÍDOS

3.4.1. Descripción del ensayo

Para analizar la reactividad de los áridos después del tiempo transcurrido en la estructura es necesario extraer las distintas fracciones del árido. Hay que señalar que todas las fracciones tienen la misma mineralogía, ya que proceden del machaqueo de la misma cantera de árido granítico. Para la separación de las distintas fracciones granulométricas de árido se realiza en primer lugar un ataque físico mediante la realización de ciclos hielo-deshielo, con el que se consigue la disgregación del hormigón y, en segundo lugar, se realiza un ataque químico de la pasta cementante con ácido metanol-salicílico. Después de distintos ciclos de ataque se obtiene la fracción de áridos que se distribuye en sus diferentes fracciones granulométricas. Se separan dos fracciones de árido: fracción de árido fino, con tamaño inferior a 5 mm, y fracción de árido grueso, con tamaño superior a 5 mm.

Se preparan probetas de mortero con la fracción de árido fino en la que se considera que la reacción se ha consumido de forma mayoritaria, y con la fracción de árido grueso. En este segundo caso los áridos gruesos se muelen para obtener los tamaños adecuados para la fabricación del mortero. En este proceso de molienda se abren nuevas superficies reactivas, obteniéndose áridos con la reactividad prácticamente original del árido utilizado en cada zona de la presa de donde se han extraído testigos de hormigón. Las probetas de mortero se ensayan de forma acelerada en una disolución alcalina a 80 °C, analizando su expansión con el tiempo y obteniendo la expansión diferencial de los áridos gruesos (prácticamente no reaccionados) con relación a los áridos finos (reaccionados).

3.3.2. Estimación de la fracción de reacción consumida

La estimación de la fracción de reacción ya consumida en la presa se basa en la comparación de los resultados de los ensayos de expansión con las fracciones gruesa y fina. La hipótesis básica es que la expansividad o reactividad residual es proporcional a la fracción de superficie específica no reaccionada. A su vez, la superficie específica es inversamente proporcional al tamaño de los áridos, siendo la constante de proporcionalidad función de la densidad de empaquetamiento de los mismos y a su factor de forma. Se considera que la doble molienda no cambia la constante de proporcionalidad.

Relacionando las expansividades de áridos finos y gruesos se llega a que la fracción de expansión del hormigón que ya ha tenido lugar en la presa es:

$$\xi = (\lambda - 1) / (\lambda - d^*)$$

siendo λ la relación a tiempo infinito entre la expansión obtenida con la fracción gruesa molida de los áridos y la obtenida con la fracción fina, d/D . El factor de molienda adimensional d^* es la relación entre el tamaño equivalente de los áridos de la probeta normalizada y de la fracción gruesa. El tamaño equivalente se obtiene con la media armónica de la granulometría, que refleja la superficie específica del conjunto.

Como resultado se concluyó que, para los hormigones más expansivos, la fracción actual de reacción consumida es alrededor del 40 %.

4. MODELO DE LA PRESA

4.1. ZONIFICACIÓN

La zonificación inicial se basaba sólo en los cambios en el cemento, pero los ensayos de los áridos evidenciaron la heterogeneidad de éstos, exigiendo refinar la zonificación. Se decidió hacerlo particionando el período de hormigonado con dos fechas intermedias, dando así lugar a tres materiales distintos. Se trataba entonces de hallar estas dos fechas para optimizar el ajuste de la nivelación.

Para cada configuración se estimó la expansividad de la presa como sigue: *i)* se asignó un peso a cada material, que representa la expansividad en $\text{mm}/(\text{año}\cdot\text{m})$ de desplazamiento vertical sin tener en cuenta la variación de la expansión por las condiciones ambientales; y *ii)* se buscaron los pesos que minimizan la suma de los cuadrados de las desviaciones en nivelación.

Las fechas resultantes que definen los tres períodos de hormigonado aparecen en la Tabla 3. La primera es el 11 de julio de 1954, que coincide con la modificación del cemento para disminuir la expansión en el ensayo de las galletas en agua hirviendo. Se trata por tanto de una fecha razonable, obtenida del proceso de ajuste sin incorporar ninguna suposición. La segunda (17 de abril de 1955) parece deberse a cambios en los áridos y es consistente con la agrupación de los resultados de expansión de probetas construidas con la fracción gruesa (Fig. 4). En la tabla se presenta también la fracción de reacción consumida.

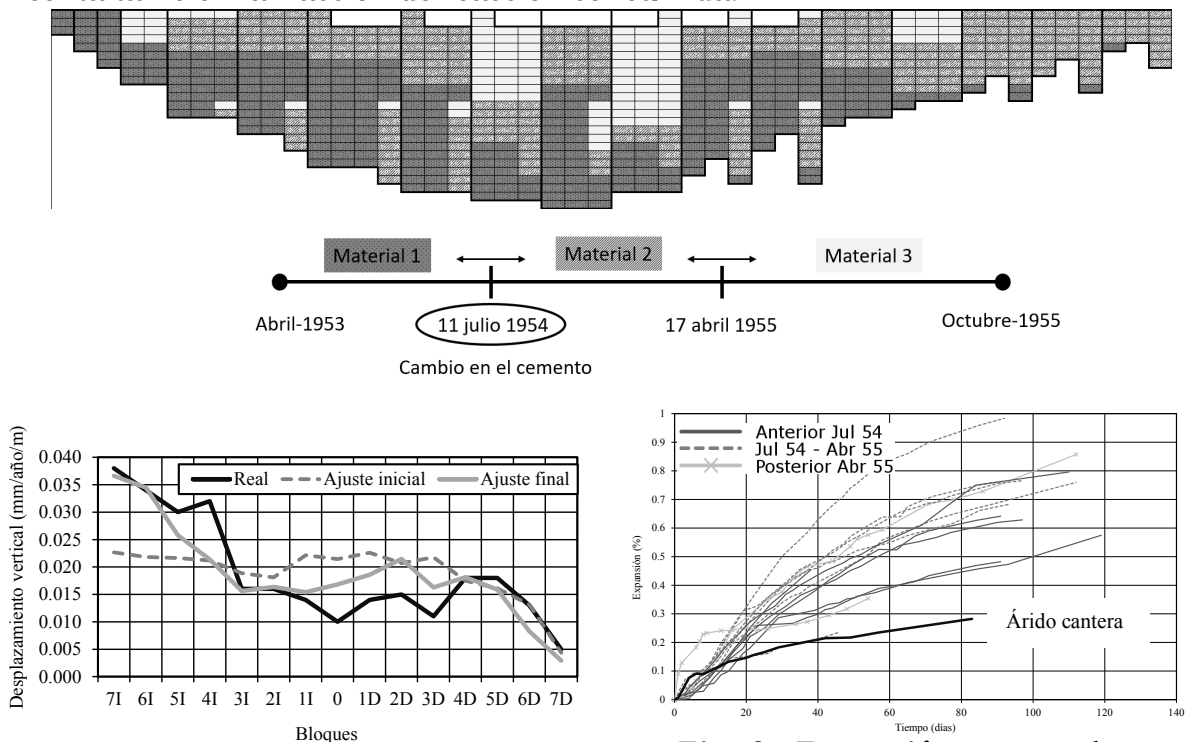


Fig. 3.- Ajuste de nivelación con la zonificación definitiva

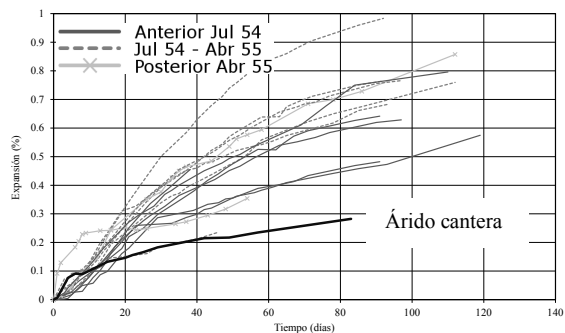


Fig. 4.- Expansión para probetas con la fracción gruesa de áridos

	Fracción (-)	Deformación (mm/año·m)
Anterior a 11 julio 1954	0,303	0,003
11 julio 54 – 17 abril 55	0,394	0,038
Posterior a 17 abril 1955	0,193	0,015

Tabla 3.- Fracciones de reacción y expansiones estimadas por materiales

4.2. MODELO DE EXPANSIÓN

Se adoptó el modelo de Ulm et al (2000), que es un modelo macroscópico y que incluye el efecto de la temperatura como la variable más influyente. Hay modelos más sofisticados que parten del anterior, como el de Saouma y Perotti (2006), con expansiones anisótropas basadas en el estado tensional, pero se prefirió usar una formulación sencilla para no complicar mucho los ajustes.

El modelo de Ulm describe la evolución de la reacción con la ecuación:

$$1 - \xi = t_c(\xi, \theta) \frac{d\xi}{dt}$$

donde ξ es la extensión de la reacción, t_c es el tiempo característico de la reacción, θ es la temperatura absoluta y t es el tiempo.

El tiempo característico disminuye con la extensión de la reacción según:

$$t_c(\xi, \theta) = \tau_c(\theta) \lambda(\xi, \theta) \quad \lambda(\xi, \theta) = \frac{1 + \exp(-\tau_L(\theta)/\tau_c(\theta))}{\xi + \exp(-\tau_L(\theta)/\tau_c(\theta))}$$

siendo τ_c y τ_L las constantes del tiempo de característico y de latencia.

La temperatura afecta a estas constantes según la ley de Arrhenius:

$$\tau_c(\theta) = \tau_c(\theta_0) \exp(U_c(1/\theta - 1/\theta_0)) \quad \tau_L(\theta) = \tau_L(\theta_0) \exp(U_L(1/\theta - 1/\theta_0))$$

donde θ_0 es la temperatura de referencia, U_c es la constante de activación del tiempo característico y U_L es la constante de activación del tiempo de latencia.

Por fin, la expansión volumétrica es proporcional a la extensión de la reacción:

$$\varepsilon_{\text{vol}}(t) = \xi(t) \varepsilon_{\text{vol}}(\infty) = 3\xi(t)\beta$$

siendo β la expansión unidireccional a tiempo infinito.

Se adoptaron las constantes de activación de los tiempos característico y de latencia de Larive (1998), 5400 y 9400 K, respectivamente.

4.3. ANÁLISIS TERMO-QUÍMICO-MECÁNICO

4.3.1. Análisis térmico estacional

Se construyó un modelo térmico que resuelve la ecuación del calor para obtener distribuciones estacionales representativas. Se partió de una temperatura uniforme de 15 °C y se simuló 30 años, suficiente para alcanzar las distribuciones estacionales periódicas.

Se impusieron las temperaturas en los paramentos de aguas arriba y aguas abajo en base a los registros de temperatura en el hormigón entre 2012 y 2016, ajustadas con series de Fourier de período anual. Las temperaturas representativas de diciembre se muestran en la Fig. 5.

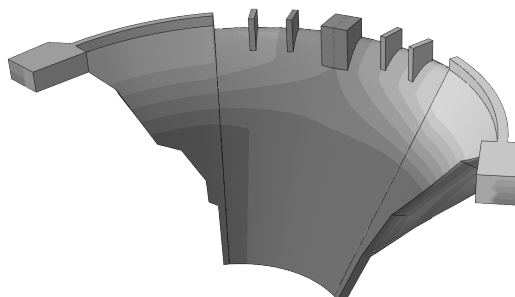


Fig. 5.- Distribución de temperaturas en diciembre

4.3.2. Análisis químico-mecánico

El modelo químico-mecánico incorpora la presa zonificada y el terreno. La Fig. 6 muestra la malla generada.

El modelo de material utilizado para modelizar el comportamiento inelástico del hormigón es el “concrete damaged plasticity” de Abaqus. Se trata de un modelo de plasticidad con endurecimiento tanto a tracción como a compresión, combinado con un modelo de daño continuo isótropo. Los bloques son independientes e interaccionan con un coeficiente de rozamiento de 1,0.

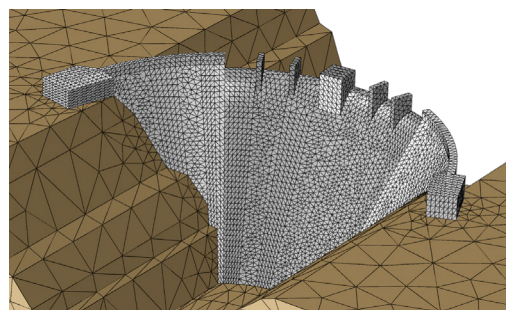


Fig. 6.- Malla modelo mecánico

Las fases de carga son: *i*) peso propio con bloques independientes; *ii*) importación de tensiones debidas al peso propio, activación de contactos entre bloques (inyección de juntas) y presión hidrostática con la cota a 229 m; *iii*) importación de temperaturas y expansión química durante 85 años.

Para el ajuste se ha supuesto que los parámetros temporales de la reacción son iguales en los tres materiales y que: *i*) la temperatura media anual del aire de 14°C es representativa de las condiciones durante la reacción; *ii*) el tiempo característico es 1/4 del tiempo de latencia (razonable en base a ajustes preliminares); y *iii*) la fracción de reacción consumida en la actualidad es del orden del 40 %, conclusión extraída de los ensayos. Esto permite estimar parámetros temporales a partir de la solución de la evolución para temperatura constante, dando lugar a un tiempo característico de 6118 días y a un tiempo de latencia de 24.472 días.

El modelo queda definido a falta del parámetro de expansión a tiempo infinito para cada uno de los tres materiales de la zonificación. El mejor ajuste se obtiene con una expansión lineal potencial de 0,042 % para hormigones anteriores al 11 de julio de 1945, 0,340 % entre esa fecha y el 17 de abril de 1955, y 0,189 % para hormigones posteriores. Las expansiones verticales a tiempo infinito son coherentes con la expansión residual de los testigos extraídos teniendo en cuenta la fracción de la reacción.

Los desplazamientos verticales en diciembre de 2017 se muestran en la Fig. 7, donde se ve la asimetría generada por la zonificación, afectada por la distribución de temperatura.

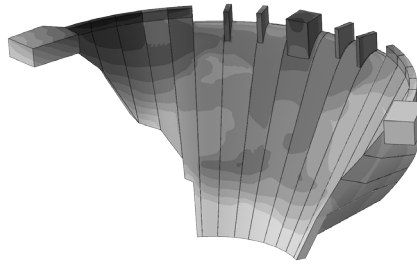


Fig. 7.- Desplazamientos verticales totales en 2017 (m)

5. CONCLUSIONES

Fruto del trabajo realizado se destacan las siguientes conclusiones:

a) El hormigón de la presa no es homogéneo, sino que sus propiedades dependen de la fecha de hormigonado por efecto tanto de los áridos como del cemento y la dosificación. Las dos fechas intermedias que definen la zonificación son el 11 de julio de 1954 y el 17 de abril de 1955.

b) Se ha propuesto una metodología para evaluar la fracción de reacción consumida en el momento del ensayo basada en la comparación entre las curvas de expansión de probetas obtenidas con la fracción fina y la fracción gruesa molida de los áridos extraídos del hormigón de la presa. La fracción consumida en la actualidad resulta ser aproximadamente el 40 %.

d) Para una temperatura de 14 °C, el tiempo de latencia del hormigón de la presa es de unos 67 años y el tiempo característico 16,75 años.

e) La expansión a tiempo infinito del material más expansivo, que es el del período entre el 11 de julio de 1954 y el 17 de abril de 1955, es 0,34 %. Este valor se ha obtenido ajustando los datos de nivelación y es coherente con la expansión residual de los testigos extraídos.

f) El modelo permite prever la evolución futura de la presa y la incidencia de posibles actuaciones o cambios en la forma de operarla.

6. REFERENCIAS

Larive, C. (1998) "Apports Combinés de l'Expérimentation et Théorique des Effets Mécaniques de l'Alcali Réaction sur des Structures Modèles", Tesis Doctoral, Université de Marne la Vallée, Francia.

Saouma, V. y Perotti, L. (2006) "Constitutive Model for Alkali-Aggregate Reactions", ACI Materials Journal, pp. 194-202, mayo-junio.

SIMULIA (2016) "Abaqus Analysis User's Guide", 2017, Providence, Rhode Island.

Ulm, F.-J., Coussy, O., Keifei, L. y Larive, C. (2000) "Thermo-Chemo-Mechanics of ASR Expansion in Concrete Structures", ASCE Journal of Engineering Mechanics, Vol. 126, no. 3, pp. 233-242, mayo.

Menéndez, E. (2011) "Evaluation and gradation of simultaneous damage in concrete affected by alkali-silica reaction and sulfate attack", IRECE, Vol2 N2

Gao, X. X., Cyr, M., Multon, S., & Sellier, A. (2013). "A three-step method for the recovery of aggregates from concrete". Construction and Building Materials, 45, 262-269.