

# Análisis termo-mecánico de la presa de La Breña II durante su construcción: estudio sobre la potencial aparición de fisuraciones de origen térmico

FERNANDO RUEDA (\*), NATALIA CAMPRUBÍ (\*\*), GUILLERMO GARCÍA (\*\*\*) y JOSÉ MIGUEL PARDO (\*\*\*\*)

**RESUMEN** Las presas de hormigón compactado con rodillo, como la mayor parte de obras masivas de hormigón, deben enfrentarse a la potencial aparición de fisuras derivadas de efectos térmicos. Un estudio detallado de esta potencial fisuración puede ser de gran ayuda en las fases iniciales del proyecto, puesto que puede proporcionar información útil para la toma de determinadas decisiones sobre variables tales como el espaciado entre juntas, las propiedades mecánicas del hormigón a considerar, la dosificación del cemento o la temperatura óptima de puesta en obra del hormigón.

Este artículo presenta los resultados de un análisis incremental no-lineal del proceso constructivo de la presa de La Breña II, en Córdoba, de 120 m de altura. Primero, se lleva a cabo un análisis transitorio de transferencia de calor en el dominio del tiempo, en el que las sucesivas tongadas de hormigón se van activando en el cálculo conforme avanza la construcción de la presa. El campo resultante de temperaturas es exportado con posterioridad al modelo mecánico, donde se calculan las tracciones resultantes al final del hormigonado de cada tongada.

De acuerdo con los resultados obtenidos, en el cimiento de la presa y en los paramentos aguas arriba y aguas abajo, se desarrollan importantes tracciones, por lo que pueden presentarse estados de fisuración que den lugar a la filtración de agua.

Los análisis desarrollados constituyen una valiosa herramienta para la definición de determinados aspectos geométricos, mecánicos y constructivos de la presa, de cara a minimizar el riesgo de fisuración. En opinión de los autores, estas herramientas de simulación avanzada pueden utilizarse ya de un modo fiable y asequible en el diseño de estructuras masivas de hormigón, cuyo análisis detallado hace unos pocos años era imposible. Estas herramientas pueden aportar información valiosa sobre fenómenos complejos, ayudando a la optimización del proyecto en coste y seguridad.

## THERMOMECHANICAL ANALYSIS OF LA BREÑA II DAM DURING ITS CONSTRUCTION PROCESS: EVALUATION OF POTENTIAL THERMAL CRACKING

**ABSTRACT** Roller compacted concrete (RCC) dams, as most massive concrete structures, must face potential cracking due to thermal induced effects. A realistic evaluation of these effects beforehand can be of great help during early design stages in order to guide the decision-making process concerning variables such as joint spacing, mechanical properties of the concrete to be used, best cement dosage and optimum placing temperature for the concrete lifts.

This paper presents a detailed non-linear incremental study of the construction process for a 120 m high RCC dam in Córdoba (Spain) in terms of both spatial and time discretization. First, the heat transfer problem is solved in the time domain in an incremental manner, where successive parts of the model representing new concrete lifts are activated as construction of the dam advances. This time-evolving thermal field is then exported to the mechanical model, where the resulting thermal stresses are calculated at the end of each lift placement.

Results obtained reveal that high tensile stresses appear at the dam foundation and at the upstream and downstream exposed faces. As a result, at these areas cracking and consequently, excessive seepage may occur.

The analysis performed in this work provides a valuable assessment tool for certain design features of the dam (both geometry and material properties) and for its construction conditions regarding cracking minimization. In the authors' opinion, these advanced numerical techniques can already be reliable and affordable when used to optimise the design of massive concrete structures, whose detailed analysis was out of reach a few years ago. These tools can give a valuable insight into many issues not yet well understood and may help to optimise the designs in terms of cost and safety.

**Palabras clave:** Hormigón, Fisuración, Presas de hormigón compactado con rodillo, Tensiones de origen térmico.

(\*) Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. IDOM Internacional S.A., España.

(\*\*) Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, IDOM Internacional S.A., España.

(\*\*\*) Ingeniero Técnico Aeronáutico. IDOM Internacional S.A., España.

(\*\*\*\*) Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Aquavir, España.

## 1. INTRODUCCIÓN

Hasta el momento, ha habido escasos intentos de determinar con cierto detalle el nivel tensional de grandes presas de hormigón durante su proceso de construcción. El poco interés práctico de las simulaciones numéricas en estas situaciones se debía a la discretización requerida, tanto en el tiempo como en el espacio, así como a las inherentes características no-lineales del problema y las incertidumbres existentes en la caracterización de muchos parámetros.

Este artículo presenta un estudio termo-mecánico con cierto nivel de detalle del proceso constructivo de una presa de hormigón compactado con rodillo. La presa todavía no ha sido construida y muchos de los parámetros empleados han sido estimados, por lo que los resultados son preliminares y han de ser tomados con cautela. Sin embargo, el comportamiento global predicho por los análisis parece estar en consonancia con experiencias previas en este tipo de estructuras. El objetivo de este artículo es mostrar el potencial asociado con el uso de estas técnicas avanzadas en el proyecto y control de estas estructuras de hormigón en masa en el futuro.

El fraguado del hormigón constituye una reacción exotérmica que genera gran cantidad de calor. La baja conductividad térmica del hormigón y el gran volumen de ciertas estructuras masivas de hormigón, tales como presas de gravedad, dificultan la disipación de este calor. Consecuentemente, durante la construcción de una presa, se pueden producir considerables gradientes térmicos que generen cambios de volumen. Estos cambios de volumen están normalmente restringidos por el hormigón puesto en obra con anterioridad o por otros condicionantes, pudiendo originarse tracciones que den lugar a la fisuración de ciertas zonas. Una excesiva fisuración del hormigón puede dar origen a filtraciones, con los resultantes problemas de durabilidad e incluso estabilidad estructural. Por esta razón, la fisuración ha de mantenerse controlada en todo momento.

La presa estudiada es la presa de La Breña II, una presa de gravedad de eje recto que se proyecta construir en el río Guadalquivir, en la provincia de Córdoba. El estudio se ha centrado en evaluar la potencial fisuración del hormigón debida a efectos térmicos. El trabajo descrito en este artículo ha proporcionado una valiosa herramienta a la hora de tomar ciertas decisiones sobre el proyecto de la presa (referentes a aspectos geométricos y mecánicos) o sobre su proceso constructivo. Alguno de los parámetros analizados fueron la distancia entre juntas, la altura de las tongadas, la época de inicio de hormigonado, la temperatura de puesta en obra del hormigón y la secuencia de hormigonado de las tongadas.

Se ha llevado a cabo un análisis estructural incremental no-lineal (NISA, Ref. 1) de la presa con ABAQUS/Standard (Ref. 2). El proceso constructivo ha sido reproducido de modo secuencial llevando a cabo una pareja de análisis térmicos y mecánicos para cada fase constructiva mediante el Método de los Elementos Finitos.

## 2. MODELO DE ANÁLISIS

### 2.1. METODOLOGÍA

Un NISA se compone de dos fases claramente diferenciadas: un análisis transitorio de transferencia de calor y un análisis tensional secuencial. En el primer caso, el problema transitorio de transferencia de calor se resuelve en el dominio del tiempo, para simular la evolución de la temperatura en el cuerpo de la presa durante su construcción. Como resultado de este análisis, se obtiene la historia del campo de

temperaturas en el hormigón. A continuación, se lleva a cabo un análisis tensional introduciendo el campo evolutivo de temperaturas calculado con anterioridad como carga térmica. Hay que destacar que este proceso se resuelve por escalones o pasos, donde cada paso representa el hormigonado de nuevas tongadas. El principio de superposición no es aplicable en este caso debido a la introducción secuencial, tanto de las cargas térmicas como de las tongadas, lo que hace el proceso no-lineal.

Algunas de las variables consideradas varían con el tiempo, tales como las cargas, las condiciones de contorno, la temperatura de puesta en obra del hormigón y las propiedades mecánicas (rigidez) del mismo, habiéndose tenido en cuenta estas variaciones en los análisis.

### 2.2. GEOMETRÍA Y DISCRETIZACIÓN

La presa de La Breña II tiene una altura máxima de 124 m, una longitud en cresta de 673 m y está dividida en 25 bloques. Los resultados presentados en el presente artículo se centran en el bloque central por su mayor volumen y, por tanto, mayor peligro de fisuración. Las deformaciones de origen térmico en el bloque provocan una tendencia en la masa central de hormigón a expandirse en la dirección entre juntas de expansión. Mientras, en las superficies exteriores, el hormigón puede tender a contraerse en función, principalmente, de la temperatura exterior. Por esta razón, es necesario realizar un análisis tridimensional si se quieren calcular las máximas tracciones en los paramentos aguas arriba y aguas abajo de la presa.

El bloque central se ha discretizado con 34032 elementos hexaédricos (Figura 1). Se ha empleado la misma malla para los análisis térmicos y mecánicos. Con vistas a facilitar la reproducción del proceso constructivo en el cálculo, la malla ha sido definida de acuerdo con la geometría de las sucesivas tongadas. Estas tongadas tienen una altura de 0.30 m, habiendo considerado en el modelo que cada capa de elementos representa dos tongadas (0.60 m). Se ha considerado una ligazón total entre tongadas sucesivas, no representando, por tanto, la existencia de juntas de hormigonado. Aunque se sabe que estas juntas constituyen planos débiles, se ha adoptado este criterio al no existir tracciones relevantes en la dirección normal a dichas juntas.

El terreno bajo el bloque ha sido modelizado también mediante una malla de elementos hexaédricos. Las mallas correspondientes a la presa y al terreno se han declarado de manera independiente, es decir, no comparten nodo alguno. Se ha declarado un contacto entre las superficies en la interfase, de modo que ambas superficies puedan deslizar entre sí e incluso despegar la una de la otra.

La simulación del proceso constructivo requiere la activación gradual en sucesivas fases del cálculo de los grupos de elementos (y contactos) correspondientes a las distintas tongadas. Se han declarado un total de 207 fases para reproducir el proceso constructivo en su totalidad.

### 2.3. ANÁLISIS TÉRMICO

En el análisis térmico se ha activado una fuente de calor variable en el tiempo para cada pareja de tongadas hormigonadas en cada una de las 207 fases del cálculo. La curva de calor introducida representa la generación de calor por el fraguado del hormigón para la mezcla de cemento considerada, de muy bajo calor de hidratación. En las juntas verticales del bloque y en las superficies exteriores del volumen de terreno se han considerado condiciones de contorno adiabáticas. La temperatura del aire se ha impuesto de acuerdo

## ANÁLISIS TERMO-MECÁNICO DE LA PRESA DE LA BREÑA II DURANTE SU CONSTRUCCIÓN: ESTUDIO SOBRE LA POTENCIAL APARICIÓN DE FISURACIONES DE ORIGEN TÉRMICO

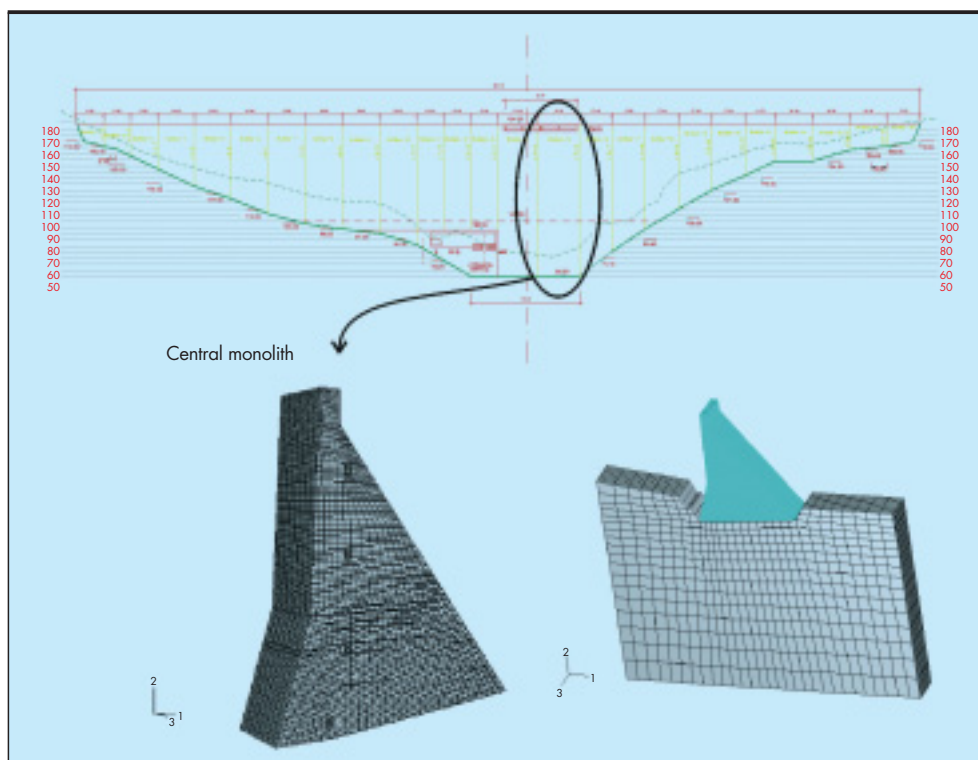


FIGURA 1. Geometría de la presa y del bloque seleccionado para el estudio dam. Discretización de la presa y el terreno inferior.

con los registros locales de temperatura media mensual. Las temperaturas de puesta en obra se han definido teniendo en cuenta la época del año en la que está previsto hormigonar cada tongada. Se han analizado dos escenarios de inicio de la construcción de la presa: mayo y noviembre. Los resultados mostrados en este artículo corresponden al escenario de inicio de hormigonado en mayo, escenario que resultó ser el más desfavorable. No se ha considerado dependencia con el tiempo de las propiedades térmicas del hormigón.

#### 2.4. ANÁLISIS MECÁNICO

Las temperaturas obtenidas del análisis térmico anterior se han introducido como cargas térmicas en el análisis mecánico. El campo de temperaturas se importa en cada fase del cálculo al tiempo que se activan los elementos que representan las tongadas correspondientes junto con su peso propio.

Se han definido también contactos entre la presa y el terreno, asumiendo una determinada fricción entre las superficies, y entre las superficies correspondientes con las juntas verticales del bloque. Esta condición de contorno no lineal permite al bloque contraerse en la dirección del eje longitudinal de la presa, pero restringe su expansión, la cual está, de hecho, impedida por la presencia de los bloques adyacentes.

Dado que el comportamiento mecánico del hormigón varía de modo muy significativo en los primeros días tras el hormigonado debido al endurecimiento, el módulo de deformación longitudinal se ha definido como una función de la edad del hormigón (Ref. 4). Se ha tomado una rigidez final de 25 GPa. No se ha introducido una ley de fisuración dentro del modelo de material del hormigón, pues se ha visto que la extensión de las zonas susceptibles de sufrir cierta fisuración son bastante locales. Los coeficientes de Poisson y de dilatación térmica se han considerado constantes en el tiempo. Los efectos diferidos de retracción y fluencia no se han considerado en la ley de comportamiento del material.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1. ANÁLISIS TÉRMICO

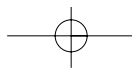
La resolución de las ecuaciones correspondientes al problema térmico ha requerido 8 horas de CPU. El incremento medio de tiempo real en la integración de las ecuaciones ha sido de 3.5 horas para un tiempo de cálculo total de 18 meses, duración estimada para el hormigonado de la presa. Por tanto, el proceso constructivo se ha dividido en un total de unos 3700 incrementos de cálculo. Como resultado del análisis se ha obtenido la evolución del campo de temperaturas en toda la presa durante su hormigonado.

La figura 2 muestra la evolución del campo de temperaturas en la presa en tres fases del proceso de hormigonado y justo después de su conclusión. Se puede observar un bulbo de altas temperaturas en el interior de la presa, alcanzando valores máximos del orden de 40°C, correspondientes a una mezcla de cemento con muy bajo calor de hidratación. La disipación de calor es muy lenta en el interior de la gran masa de hormigón, debido principalmente a la baja conductividad térmica del material y a la distancia existente con los paramentos expuestos al aire libre. Por el contrario, la temperatura en los paramentos se adapta con cierta rapidez (poca inercia térmica) a la temperatura ambiente, haciéndose evidentes las variaciones estacionales.

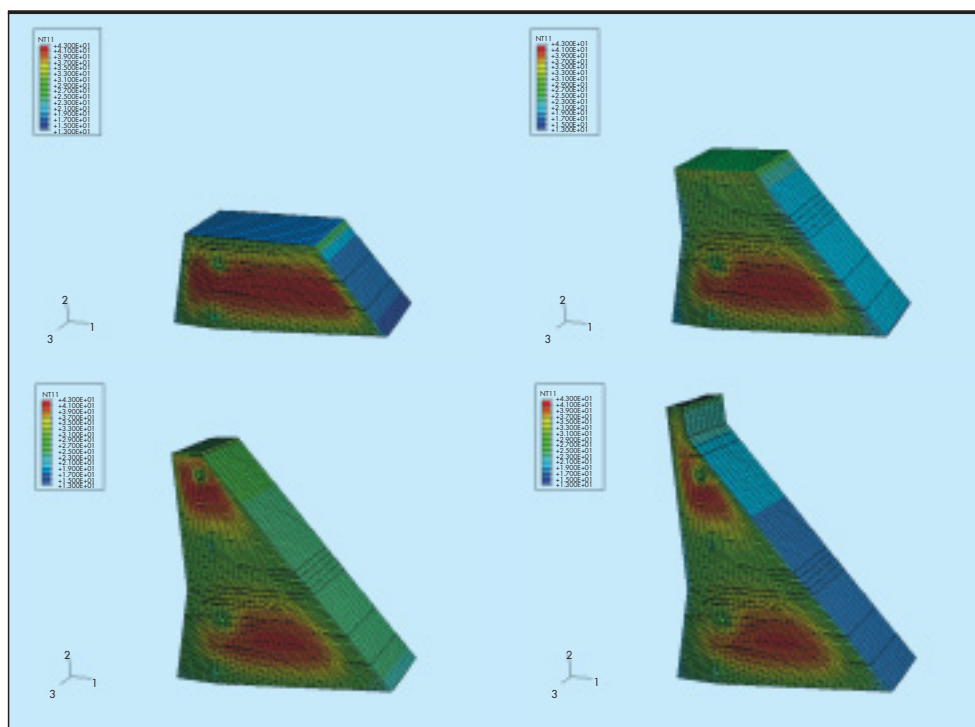
#### 3.2. ANÁLISIS TENSIONAL

La resolución de las ecuaciones correspondientes al problema mecánico ha requerido 18 horas de CPU. En la resolución de las ecuaciones se han linealizado las mismas entre el inicio y el final de cada una de las 207 fases de cálculo, considerando esta aproximación razonable.

Como cabría esperar, la mayor parte de la presa está sometida a un estado de compresión triaxial. Sin embargo, en la cercanía de los cimientos y en los paramentos aguas



ANÁLISIS TERMO-MECÁNICO DE LA PRESA DE LA BREÑA II DURANTE SU CONSTRUCCIÓN: ESTUDIO SOBRE LA POTENCIAL APARICIÓN DE FISURACIONES DE ORIGEN TÉRMICO

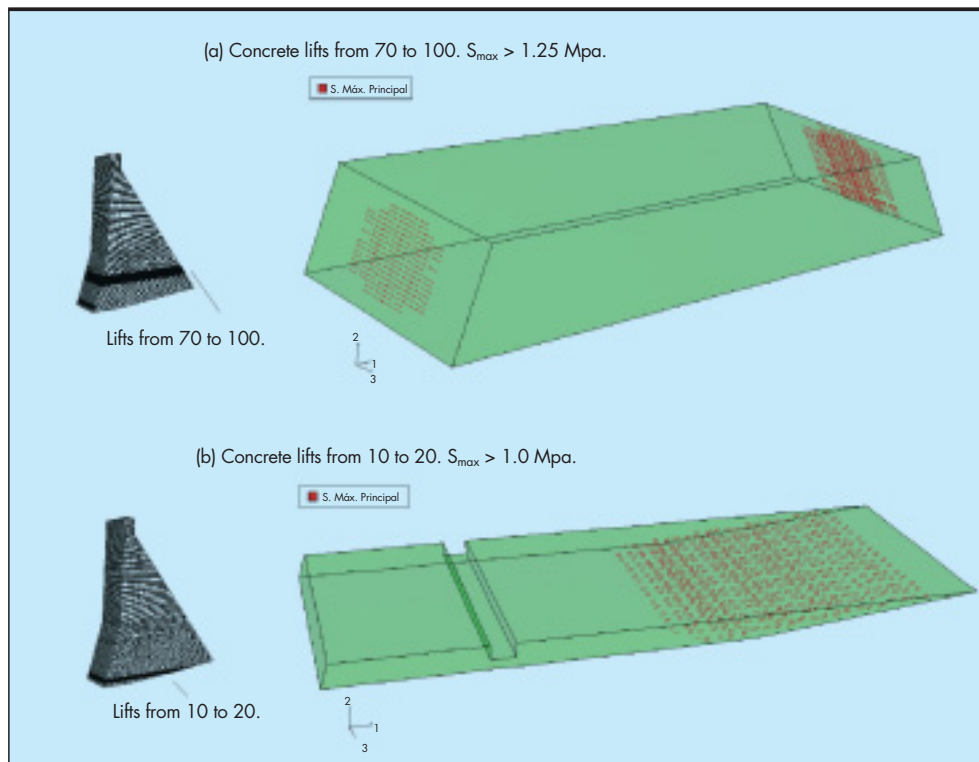


**FIGURA 2.** Evolución del campo de temperaturas en distintas fases del hormigonado de la presa.

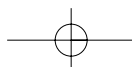
arriba y aguas abajo de la presa se observa la aparición de tracciones de cierta magnitud. También se observan tracciones en zonas cercanas a las galerías, aunque la respuesta calculada en esas zonas debiera interpretarse sólo como una aproximación cualitativa. Para obtener resultados más fia-

bles haría falta un considerable refinamiento de la malla esas zonas y una más precisa determinación de las condiciones de contorno térmicas en las galerías.

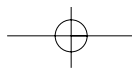
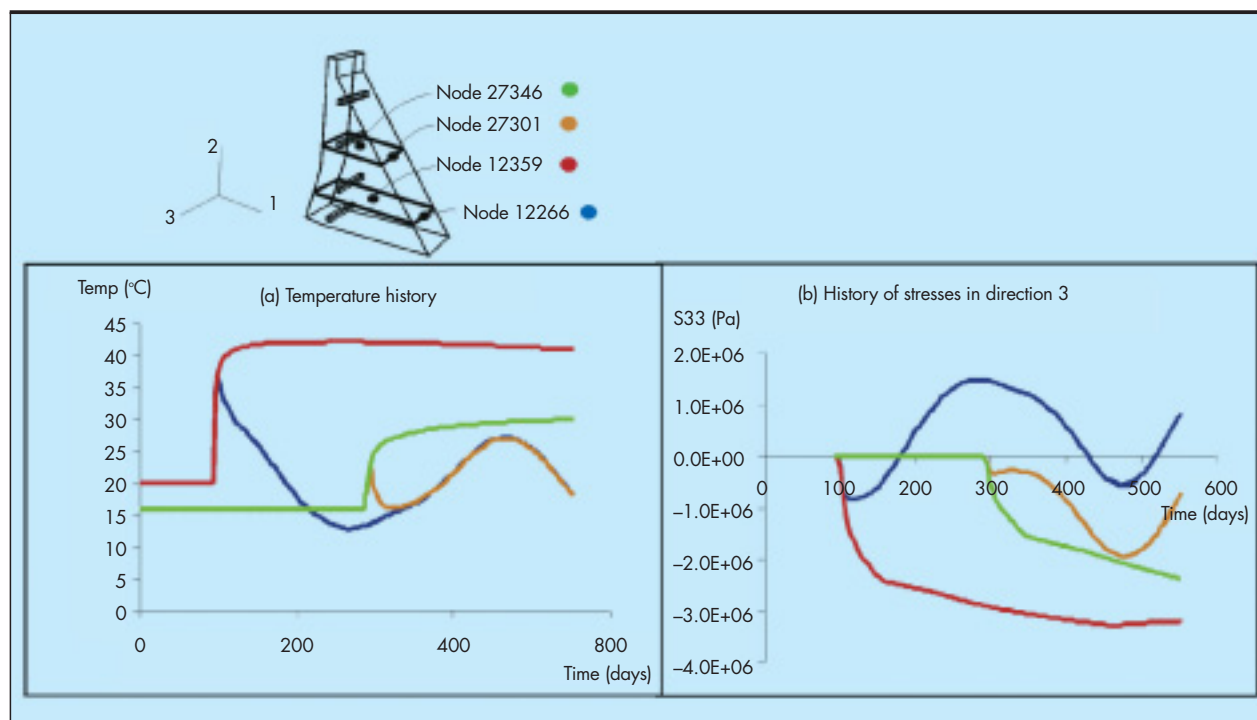
Las áreas susceptibles de desarrollar cierta fisuración se muestran en la figura 3, donde se representa la orientación



**FIGURA 3.** Tensiones principales máximas y sus direcciones. Áreas de fisuración potencial.






**ANÁLISIS TERMO-MECÁNICO DE LA PRESA DE LA BREÑA II DURANTE SU CONSTRUCCIÓN: ESTUDIO SOBRE LA POTENCIAL APARICIÓN DE FISURACIONES DE ORIGEN TÉRMICO**


**FIGURA 4.** Evolución de las temperaturas y tensiones en la dirección 3 en nodos del paramento aguas abajo y del interior de la presa.

de las tracciones. Estas direcciones muestran con claridad los planos en los que se puede producir la fisuración. Como se puede observar, en los paramentos las tracciones se originan en la dirección del eje longitudinal de la presa (dirección 3), mientras que en el entorno de la cimentación, las tracciones se producen en la dirección transversal (dirección 1). Tal y como se explica a continuación, ambos tipos de tracción tienen su origen en efectos térmicos, aunque el mecanismo estructural subyacente difiere en uno y otro caso.

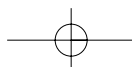
La figura 4a muestra la evolución de temperaturas en una serie de nodos localizados en el paramento aguas abajo de la presa y en el interior de la misma. Como se puede observar, la temperatura en el paramento se adapta rápidamente a la temperatura ambiente y a sus cambios, mientras que en el interior, la gran inercia térmica provoca una disipación muy lenta del calor generado durante el fraguado del hormigón. Esta diferencia en el comportamiento térmico entre diferentes zonas de la presa es la razón por la cual se desarrollan tracciones y, potencialmente, fisuras en los paramentos expuestos de la presa. En invierno, el hormigón cercano a los paramentos se enfría, por lo que tiende a contraerse. Esta contracción es parcialmente restringida por la masa interior de hormigón, originándose tracciones en la dirección del eje longitudinal de la presa. Este comportamiento se refleja en la figura 4b, donde se muestra la evolución de las tensiones según la dirección 3 en los mismos nodos. Este fenómeno es menos relevante en las tongadas superiores, donde, por un lado, la sección transversal de la presa es ostensiblemente más delgada, y, por otro, la temperatura ambiente en la época de hormigonado es sensiblemente más alta.

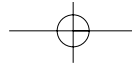
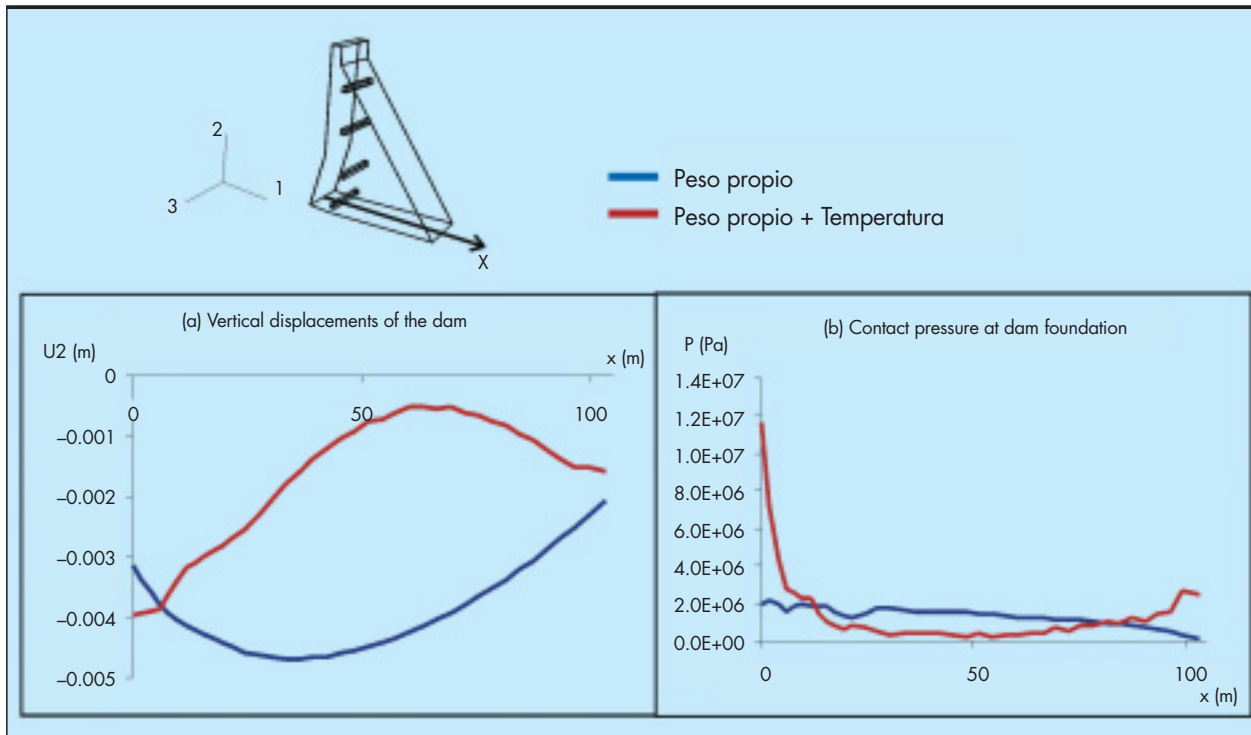
Las elevadas tracciones en el cimiento de la presa se deben a un mecanismo termomecánico distinto. Bajo la acción de la carga térmica, el interior de la zona de la presa que descansa sobre el terreno tiende a levantarse. Este

efecto es sólo parcialmente contrarrestado por la acción del peso propio. En la figura 5a se muestran los desplazamientos verticales (según la dirección 1) al final del proceso constructivo sobre la recta mostrada en el esquema de la presa. En la figura 5b se muestra la presión de contacto entre la presa y el terreno sobre la misma recta. En ambos casos, se comparan los resultados obtenidos considerando sólo peso propio o considerando peso propio y efectos térmicos. Bajo la acción del peso propio, el cimiento de la presa tiende a descansar tal y como muestra la curva, aunque la forma de dicha curva depende obviamente de la rigidez considerada para el terreno, que, de acuerdo con los datos disponibles, es elevada.

Si se añade la influencia de las temperaturas, el comportamiento mecánico tiende a un estado intermedio entre los efectos contrapuestos de origen térmico y de peso propio. Los desplazamientos verticales en la zona central del cimiento disminuyen considerablemente con respecto a los cálculos realizados considerando sólo peso propio. Esto también se traduce en una disminución importante de las presiones sobre el terreno, que, por el contrario, aumentan muy considerablemente en los extremos. Como consecuencia de lo anterior, el camino de cargas gravitatorias del cuerpo de la presa al terreno, cambia de modo significativo, fugando de la zona central de la presa a las zonas extremas, situadas bajo los paramentos.

Otra consecuencia derivada de los efectos térmicos producidos por el calor de fraguado del hormigón es la contracción de la presa en la zona próxima a su contacto con el terreno según la dirección 1 (ver figura 5). Este efecto es parcialmente contrarrestado por la tendencia del cimiento a expandirse en la misma dirección, originada por la acción del peso propio, y por el propio rozamiento existente entre el terreno y la presa, cuyo valor se ha estimado en los cálculos en 1.0.




**ANÁLISIS TERMO-MECÁNICO DE LA PRESA DE LA BREÑA II DURANTE SU CONSTRUCCIÓN: ESTUDIO SOBRE LA POTENCIAL APARICIÓN DE FISURACIONES DE ORIGEN TÉRMICO**

**FIGURA 5.** Desplazamientos verticales y presión sobre el terreno en el cimiento de la presa.

Por consiguiente, tanto la fuga en el camino de cargas gravitatorias hacia los extremos del cimiento (zonas situadas bajo paramentos) como la restricción a la contracción de origen térmico provocada por el rozamiento con el terreno, son las causas de la aparición de tracciones importantes según la dirección 1 en las tongadas situadas sobre el cimiento. El número de tongadas afectadas es del orden de 20.

Cabe destacar que, de acuerdo con los resultados obtenidos, las zonas afectadas por la aparición de tracciones (paramentos y cimiento de la presa), son zonas susceptibles de sufrir problemas de filtración en caso de aparición de fisuras.

## 5. CONCLUSIONES

En este artículo se ha presentado el análisis termo-mecánico del proceso constructivo de una presa de hormigón compactado con rodillo. Como resultado de este estudio, se ha concluido que el calor generado por la hidratación del cemento durante el fraguado del hormigón afecta al comportamiento mecánico global de la presa.

Despreciando los efectos de origen térmico, el hormigón de la presa se encuentra en un estado de compresión triaxial. Sin embargo, al tomar en consideración los fenómenos de origen térmico, los resultados obtenidos predicen el desarrollo de tracciones de cierta relevancia en el entorno inmediato del cimiento de la presa y en los paramentos aguas arriba y aguas abajo de la misma. Estas tracciones pueden dar lugar a la fisuración del hormigón y a posteriores problemas de filtración y durabilidad.

Las tracciones generadas en los paramentos se deben a las variaciones estacionales de temperatura en el aire, que, en épocas frías, causan una tendencia a contraerse del hor-

migón situado en la superficie. Esta tendencia es impedida por el gran volumen de hormigón situado en el interior de la presa a mayor temperatura. En el cimiento de la presa, las tracciones se originan como resultado de la tendencia de la presa a despegarse del terreno en la zona central por efecto de la temperatura y de la restricción impuesta por el rozamiento hormigón/terreno en la interfase.

Por tanto, la consideración de estos efectos térmicos a la hora de estudiar el comportamiento estructural de una presa de estas características puede resultar crucial, si estos resultados se confirman mediante la realización de campañas experimentales de monitorización durante el proceso constructivo de la presa.

## 6. REFERENCIAS

- [1] U.S. Army Corps of Engineers. "Nonlinear, Incremental Structural Analysis of Massive Concrete Structures". Technical Letter No. 1110-2-542- Department of the Army, U. S. Army Corps of Engineers. Washington D.C. 1997.
- [2] Hibbit, Karlsson & Sorensen, Inc. "ABAQUS/Standard User's Manual". Version 6.4. 2003.
- [3] U.S. Army Corps of Engineers. "Roller-Compacted Concrete". Engineer Manual No. 1110-2-2006. Department of the Army, U. S. Army Corps of Engineers. Washington D.C. 2000.
- [4] M. Conrad, M. Aufleger and A. I. H. Malkawi. Investigations on the modulus of elasticity of young RCC. – In: Roller Compacted Concrete Dams, Proc. of the 4th Int. Symp. on Roller Compacted Concrete (RCC) Dams, Madrid: 17. – 19.11.2003. Hg.: Berga, L. u.a.. Lisse: Balkema, 2003, P. 729 – 733.

