

COMITÉ NACIONAL ESPAÑOL DE GRANDES PRESAS

DESARROLLO DE UN CÓDIGO DE CÁLCULO PARA EL ANÁLISIS TERMO-TENSO-DEFORMACIONAL COMPLEJO DE LAS PRESAS BÓVEDA

Carmen María Baena Berrendero¹

Fernando Salazar²

Cristian Ponce³

Ignacio J. Ocaña⁴

RESUMEN: El proyecto de investigación denominado ACOMBO, se está desarrollando en la actualidad dentro de la convocatoria RETOS-COLABORACIÓN del Ministerio de Economía y Competitividad, participando 4 entidades: CIMNE, ENDESA GENERACIÓN, JESÚS GRANELL INGENIERO CONSULTOR y UPM.

El objetivo principal es disponer de una herramienta de cálculo numérico que permita conocer el estado tensional de una presa de fábrica (considerando una bóveda, por ser la de comportamiento más complejo) teniendo en cuenta todos los fenómenos relevantes involucrados desde el inicio de su construcción.

En la actualidad, los modelos estructurales utilizados en los cálculos de presas de esta tipología, responden a simplificaciones o a combinación de modelos independientes (principalmente en lo relativo a las cargas térmicas) que implican que el cálculo no se realice de una manera global. El programa, del que se detallan sus avances en esta ponencia, pretende englobar todos los factores que afectan al estado tensional de la estructura.

¹ JESÚS GRANELL, INGENIEROS CONSULTORES SA.

² CIMNE

³ UPM

⁴ ENDESA GENERACIÓN

1. INTRODUCCIÓN

La mayoría de las presas arco y bóveda construidas en España en el siglo XX se calcularon con métodos numéricos como el Trial Load y/o se comprobaban en modelos reducidos en laboratorio.

El gran avance de los modelos numéricos de presas (basados en el método de los elementos finitos) se ha aplicado en los últimos proyectos de presas y para analizar el comportamiento de presas ya construidas. Principalmente en el primer tipo de modelos, se ha visto la necesidad de actualizar la modelización numérica utilizando parametrizaciones de la compleja geometría e incluso revisar las hipótesis de cálculo, principalmente en lo referente a los modelos térmicos y a las fases constructivas, que en la actualidad se realizan de forma desacoplada con el modelo tensional.

Como presa de referencia para evaluar los avances de la herramienta de cálculo que se pretende desarrollar con este proyecto de investigación se ha elegido la bóveda de Baserca, que constituye el embalse inferior del aprovechamiento hidroeléctrico reversible de Moralets en el río Noguera Ribagorzana, proyectado por Enher en 1975, entre Lérida y Huesca [1]. La presa de Baserca se construyó entre los años 1981 y 1983, tiene una altura máxima de 86 m sobre cimientos y cada paramento se definió con arcos de tres centros (siendo los laterales simétricos).

Se adjunta a continuación una planta general de la presa y las definiciones de su ménsula central y de centros de los paramentos (de intradós y trasdós para la zona central y las laterales), necesarias para la parametrización:

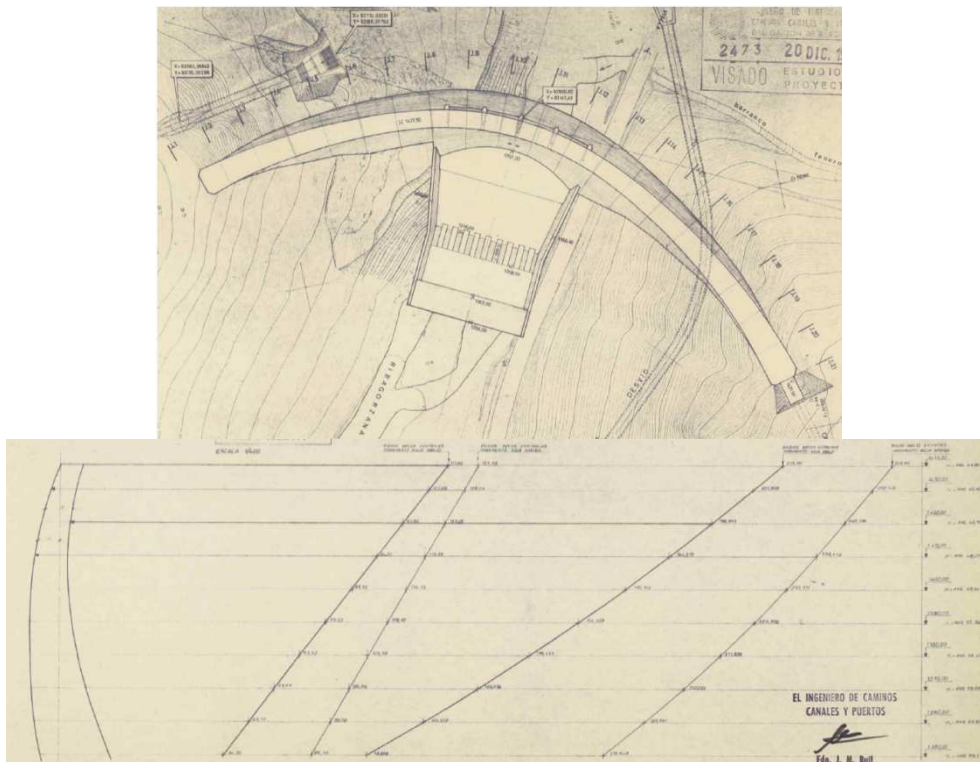


Figura 1: Definición geométrica de la presa bóveda de Baserca

Un aspecto importante de la modelización numérica de presas ya construidas es la interpretación de los datos de auscultación, que permite la calibración del modelo numérico para que el ajuste a la realidad sea el óptimo posible. En el caso de Baserca, la instrumentación instalada para el seguimiento y

control de la evolución térmica y de movimientos durante el hormigonado de los bloques fue muy exhaustiva. La toma de datos se efectuaba tanto de forma manual como automática con softwares y hardwares de la época, que han precisado el volcado manual desde los registros en papel (aunque se ha realizado a partir de la entrada en explotación). Todos estos datos han sido analizados para realizar la comprobación de los distintos modelos que integran el software.

En la actualidad, la herramienta de cálculo está en una fase muy avanzada, como se detalla en el siguiente apartado, si bien en el apartado final se detallan los aspectos que están pendientes de desarrollar.

2. MODELOS INTEGRADOS EN EL SOFTWARE

Se detallan a continuación las funcionalidades que integrará el programa ACOMBO.

2.1. GENERACIÓN AUTOMÁTICA DE MODELOS DE PRESAS BÓVEDAS

La compleja definición geométrica de las presas arco y principalmente, de las de doble curvatura (bóvedas) implica que el encaje previo de las formas precise de una parametrización de las dimensiones características de los arcos a distintas cotas para agilizar los sucesivos ajustes a la forma óptima de la presa.

Además, es preciso modelizar elementos que influyen en su comportamiento tensional como las juntas de construcción (ya que su posterior inyección hace trabajar a la presa de una forma totalmente distinta desde ese momento), elementos como los estribos que acortan los arcos de coronación, aliviaderos si es preciso, etc.

Por tanto, el primer objetivo del software a desarrollar es integrar en una misma herramienta utilidades para el encaje geométrico de presas bóveda, la definición automática de un dominio de cálculo adecuado y el mallado con elementos finitos de ese dominio. El resultado de ese proceso es un modelo listo para su cálculo tenso-deformacional con el nuevo solver en desarrollo. El entorno GiD (desarrollado en CIMNE) es el seleccionado para la integración de estas utilidades y el solver.

La descripción de versiones preliminares de la aplicación ha sido publicada previamente [2], [3], incluyendo el detalle de las opciones disponibles y ejemplos de aplicación. La aplicación está basada en el software de pre y post proceso GiD [4]. Los principales pasos a seguir, una vez cargada la topografía del emplazamiento, son los siguientes:

1. Definición de la cota de coronación y del punto más bajo de la cimentación
2. Selección de una curva de base para el cilindro de referencia, que puede ser una elipse o una parábola.
3. Introducción de la profundidad de excavación a lo largo del eje de la presa.
4. Generación del cilindro de referencia y su intersección con el terreno.

5. Definición de la ménsula central. Por defecto, se utiliza el criterio del USBR [5], si bien se puede modificar posteriormente.
6. Selección de las líneas de focos de las curvas que definen los paramentos de aguas arriba y aguas abajo, y generación de las curvas correspondientes.
7. Creación del cuerpo de presa en tres dimensiones, considerando la profundidad de excavación definida previamente.
8. Definición de los taludes de excavación a lo largo del eje de la presa.
9. Análisis del desplome de las ménsulas y ajuste, en su caso.
10. Opcionalmente, se pueden definir elementos adicionales como las juntas entre ménsulas, los estribos, el aliviadero y los desagües de fondo.
11. Generación de la malla de elementos finitos para el cálculo.

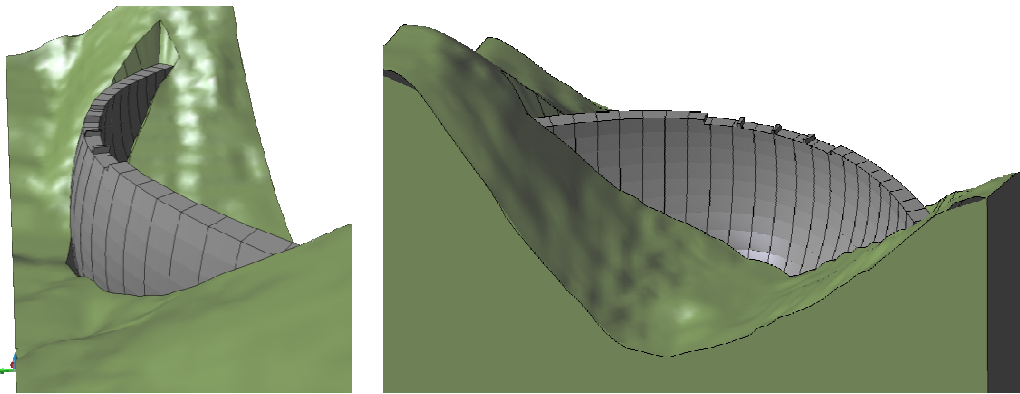


Figura 2. Modelo de la presa de Baserca generado con la aplicación.

2.2 MODELO TÉRMICO DURANTE LA CONSTRUCCIÓN

Los estudios térmicos de las presas de hormigón se realizan en dos momentos diferentes: durante la fase de construcción y durante la fase de explotación. Durante la fase de construcción, el objetivo del estudio es evitar la fisuración provocada por los gradientes térmicos ocasionados por el calor de fraguado. Adicionalmente, estos gradientes se dan en las fases tempranas del proceso de fraguado, cuando las propiedades mecánicas se encuentran en desarrollo. En cambio, durante la fase de explotación de la presa los estudios térmicos se centran en los esfuerzos ocasionados por la variación de las variables medioambientales.

Durante la fase de construcción, las acciones térmicas a considerar son:

- El calor desprendido en la reacción exotérmica de fraguado del hormigón.
- La refrigeración artificial que se instala en su interior con el objetivo de disipar ese calor de fraguado, si existiera.
- La temperatura ambiental.
- La radiación procedente del sol.
- La evaporación del agua.

La lucha contra la fisuración se aborda fundamentalmente de dos modos. El primer método es la sustitución de parte del cemento por cenizas volantes. Las cenizas favorecen una lenta liberación del calor de fraguado por efecto puzolánico, sin mermar las propiedades mecánicas del hormigón a largo plazo. La segunda técnica es la refrigeración de la masa de hormigón, ya sea mediante el enfriamiento de los materiales previa su puesta en obra o la sustitución de parte del agua necesaria para el fraguado por escamas de hielo.

Los estudios térmicos de presas de hormigón en fase de construcción se pueden clasificar en dos categorías, según el procedimiento para resolver la ecuación diferencial que rige el fenómeno físico:

- Aquellos que asumen hipótesis simplificadoras de la geometría o de las condiciones de contorno, de modo que la ecuación se puede resolver analíticamente.
- Los modelos que obtienen una solución aproximada mediante métodos numéricos, con el fin de modelar un problema con menos hipótesis simplificadores y, en consecuencia, más parecido a la realidad, pero más complejo de resolver.

Los actuales medios físicos computacionales permiten resolver el problema con técnicas numéricas[13][14][15][16].

Las formulaciones matemáticas que describe el fenómeno de generación de calor durante el proceso de fraguado del hormigón se pueden clasificar, a grandes rasgos, en dos grupos [11]:

- Aquellas formulaciones cuya función de generación de calor depende exclusivamente del tiempo. Se denominan modelos de hidratación adiabáticos.
- Los modelos donde la generación de calor depende del campo de temperaturas. Se denominan modelos de hidratación no adiabáticos.

2.3 MODELO TÉRMICO DURANTE LA EXPLOTACIÓN

Durante la fase de operación el calor procedente de las reacciones de fraguado es prácticamente despreciable y, en consecuencia, no se refrigera artificialmente la presa [12]. Por tanto, se encontrará sometida únicamente a las acciones térmicas procedente del medio que la rodea:

- La temperatura ambiental.
- La temperatura del agua que sumerge a los paramentos.
- La radiación procedente del sol.
- La evaporación del agua.

La respuesta térmica de la presa en términos de temperaturas es un problema térmico transitorio de transmisión de calor por conducción con una formulación de ecuaciones diferenciales. La adopción de hipótesis simplificadoras permite que, en determinados casos, la ecuación anterior tenga una solución analítica. Sin embargo, la potencia de cálculo de los actuales microprocesadores posibilita el uso de métodos numéricos de resolución de ecuaciones diferenciales, lo que permite una reducción del número de hipótesis simplificadoras adoptadas y resultados más acordes con la realidad [18][18][19][20].

La aplicación permite considerar la temperatura real del agua a lo largo del tiempo para modelos transitorios mediante la prescripción del valor conocido. Esto puede ser útil en caso de disponerse de termómetros a distintas profundidades.

Para otros casos, se ha implementado la ecuación de Bofang, que da una estimación de la variación temporal y espacial (en profundidad) de la temperatura del agua en función de las características climáticas del emplazamiento de la presa. El modelo identifica automáticamente qué parte del paramento queda sumergida, e impone la temperatura previamente calculada con la expresión citada.

2.4 MODELOS CONTACTO CIMIENTO Y JUNTAS ENTRE BLOQUES

Las discontinuidades, tanto entre ménsulas como en el contacto presa-cimiento constituyen otro aspecto importante que sin embargo en ocasiones se desprecia por la complejidad que implica. Es cierto que en el caso general, con juntas inyectadas correctamente, en un momento en el que la temperatura del cuerpo de presa es suficientemente baja, la estructura tiene un comportamiento monolítico y por tanto esta aproximación es adecuada. Sin embargo, en determinados casos es necesario tener la posibilidad de considerar estos fenómenos, como en el análisis de estados de carga accidentales o extremos, en presas con ciertas singularidades, o al estimar la probabilidad condicionada de determinados modos de fallo, en el marco del análisis de riesgos [10].

Para ello, se está desarrollando también un modelo de “elemento junta” que permite representar distintos modos de funcionamiento: con diferente valor de resistencia a tracción, con o sin desplazamiento, o con coeficiente de fricción variable.

Se parte de la base teórica desarrollada por Pouplana [7], que emplea una ley constitutiva de tipo bilineal cohesivo con fractura, basada a su vez en el criterio de fallo de Camacho y Ortiz [8] y Song et al. [9].

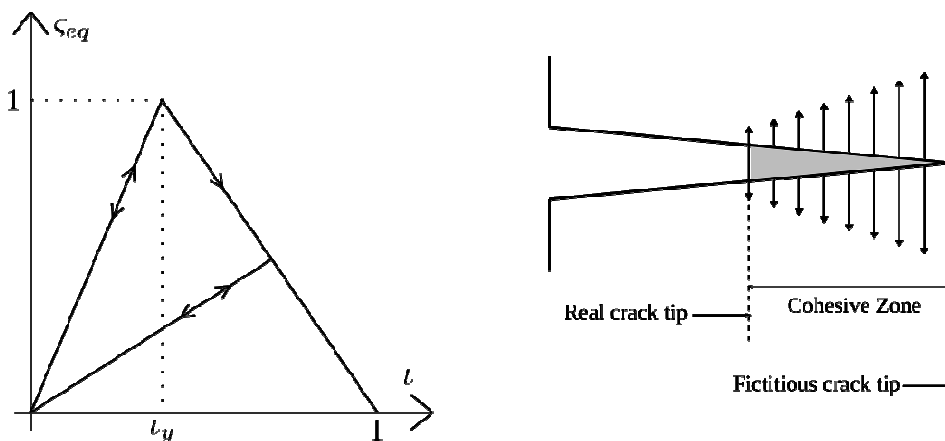


Figura 3. Modelo de fractura bilineal cohesivo, empleado en la formulación del elemento junta.

El modelo de partida es muy versátil, y permite considerar fenómenos complejos como la propia generación de la fractura por inyección de un fluido a presión. Actualmente se está trabajando para su adaptación al caso de las presas bóveda, donde suele ser suficiente con representar adecuadamente la resistencia a tracción de la junta, el daño en caso de que dicho valor se supere, y el comportamiento friccional posterior.

No obstante, se prevé utilizar este mismo enfoque para otros fenómenos complejos en ingeniería de presas, como son:

1. La inyección de las juntas de construcción, considerando la presión de inyección y el efecto térmico de forma acoplada.
2. El resultado de inyecciones de consolidación del terreno, que son un ejemplo paradigmático de fenómeno acoplado de flujo (fluido de inyección) y geomecánica (respuesta tenso-deformacional del macizo).
3. El efecto de planos de debilidad en la cimentación sobre modos de fallo potencial.

2.5 MODELO PARA SIMULAR LA FASE DE PUESTA EN OBRA DEL HORMIGÓN

Uno de los aspectos importantes a considerar en el análisis termomecánico de presas bóveda es el estado tensional inicial. Estas estructuras sufren un cambio de comportamiento relevante con la inyección de las juntas entre bloques, pasando de funcionar como ménsulas independientes a hacerlo como una estructura monolítica. Esto implica que cambie por completo el estado tensional, al activarse el funcionamiento como arco.

Con anterioridad a la inyección de juntas, la principal carga actuante suele ser el peso propio, además de los efectos térmicos, que están presentes en todo momento. Es bien conocido que considerar la carga de peso propio como carga instantánea introduce una distorsión importante en los resultados. El procedimiento más habitual consiste en calcular por separado el peso propio de ménsulas pares e impares, y posteriormente superponer los resultados. Ello implica suponer que el funcionamiento es lineal, y que no hay interacción entre las ménsulas durante la construcción.

En realidad, sin embargo, la presencia de las ménsulas contiguas tiene cierta influencia en el comportamiento general, y en particular en el estado tensional al final de la construcción [6].

Por otra parte, los efectos térmicos son más importantes durante la construcción, por la liberación del calor de hidratación, que hace que se incremente la temperatura del hormigón por encima de los valores habituales durante la explotación. La disipación de este calor depende del valor de la temperatura exterior, pero también del proceso constructivo, que determina qué superficies están en contacto con el exterior en cada momento.

Para tener una buena estimación del estado tensional del cuerpo de presa es necesario también utilizar un modelo térmico transitorio que tenga en cuenta estos aspectos. Ello implica que la geometría del dominio de análisis cambie a lo largo del cálculo, activándose las tongadas a medida que se construyen.

En la definición del proceso constructivo de una presa bóveda intervienen un conjunto importante de factores sobre los que se puede ejercer un control, como, por ejemplo: el rendimiento de los equipos de puesta del hormigón, el tamaño máximo de bloque, el tiempo de fraguado, la altura máxima de tongada, la duración y número de turnos de trabajo, el tiempo de encofrado y desencofrado, la separación máxima entre tongadas en bloques contiguos o los días hábiles de trabajo en el mes. Existen otros factores que vienen sobrevenidos ante los que sólo se puede reaccionar durante la construcción como la temperatura ambiente, por ejemplo.

En el caso de la presa de Baserca, considerada como modelo, la información de su construcción está disponible por lo que se puede simular y evaluar los resultados obtenidos con las medidas registradas. Para los casos de presas nuevas, o de las que no se disponga de esta información, se está desarrollando una herramienta que considera todos estos aspectos y determina la secuencia de hormigonado más adecuada para la optimización de una función objetivo determinada como puede ser el plazo de construcción o el coste, por ejemplo.

Esta posibilidad de incorporar al modelo la secuencia de hormigonado de los bloques también ha sido implementada en el marco del proyecto. Se muestra en la Figura 4 un ejemplo de aplicación.

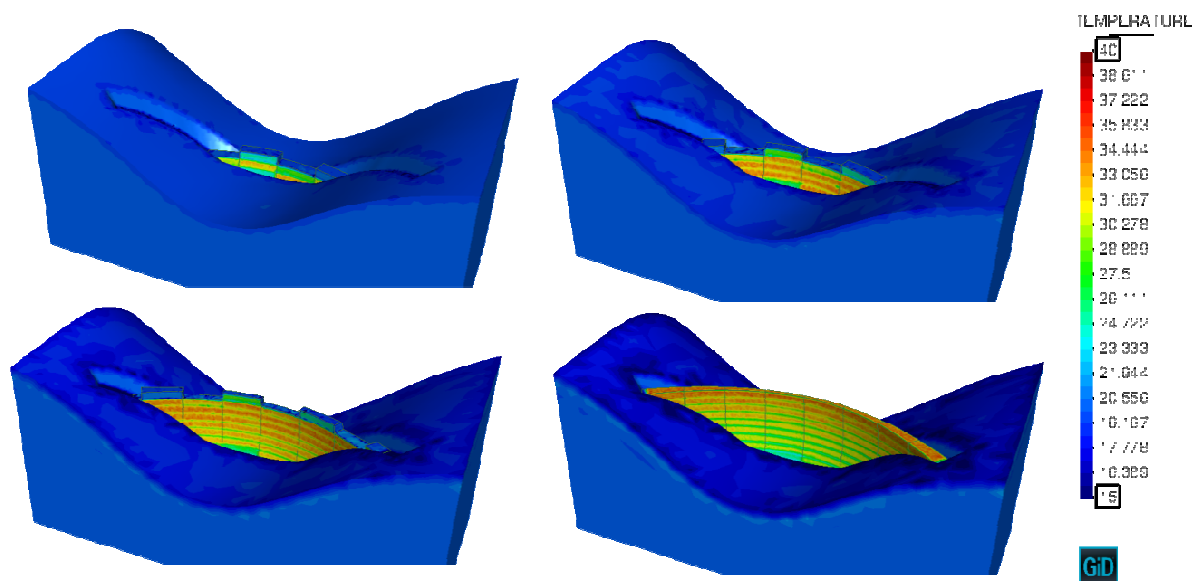


Figura 4. Ejemplo de cálculo térmico considerando el proceso constructivo.

3. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

Como se adelantaba en el resumen, el objetivo principal es disponer de una herramienta de cálculo numérico que permita conocer el estado tensional de una presa bóveda (por ser la de comportamiento más complejo) teniendo en cuenta todos los fenómenos relevantes involucrados desde el inicio de su construcción y de un modo abordable desde el conocimiento del estado del arte actual. Es importante no perder de vista que, siendo fenómenos tan complejos, es tan necesario mejorar su modelización, como acotar su alcance para que sea práctico para aplicar a un proyecto real.

En la actualidad, los modelos estructurales utilizados en los cálculos de presas de esta tipología, responden a simplificaciones o a combinación de modelos independientes (principalmente en lo relativo a las cargas térmicas o al funcionamiento distinto de las juntas de construcción antes y después de la inyección) que implican que el cálculo no se realice de una manera global.

El programa ACOMBO engloba ya factores que permiten una gran rapidez en la modelización (parametrización de la geometría ligada a la forma de definir geométricamente la presa de doble curvatura), factores de geometría ligados al cálculo (como la simulación de la puesta en obra del hormigón) y factores que tienen gran influencia en el estado tensional de la estructura (modelos térmicos durante la construcción y la explotación, en este caso teniendo en cuenta de modo automático la influencia del agua en el paramento de trasdós), etc.

Por ejemplo, los modelos térmicos actuales en fase de construcción, rara vez son tridimensionales, ni suelen modelizar la construcción por etapas de la presa.

Como se citaba en el apartado 2.4 la modelización de las discontinuidades en el cimiento (fallas principalmente) permitiría realizar una comprobación geomecánica que antiguamente se llevaba a cabo en los propios modelos reducidos; también se pretende automatizar mediante la parametrización geométrica de los planos de debilidad.

Finalmente, está previsto incorporar la comprobación tensional para cada elemento (de modo gráfico) según las zonas de esfuerzos admisibles, determinadas a partir de distintos coeficientes de seguridad dados por las correspondientes normativas.

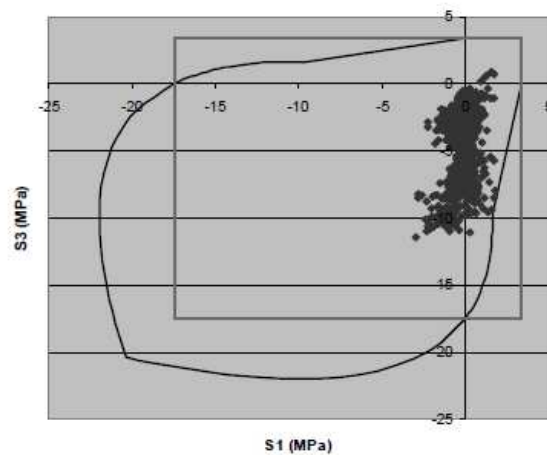


Figura 5. Ejemplo de comprobación tensional a partir de tensiones principales.

4. COLABORADORES

Dada la entidad del proyecto, aparte de los autores son numerosas personas las que están colaborando:

CIMNE: Javier San Mauro, David Vicente, Joaquín Irazábal, Ignasi de Pouplana, Lorenzo Gracia y Eugenio Oñate.

ENDESA: María Chacón, Judit Segarra, David García y Felipe Río.

JGIC: Pilar Cabrera y Carlos Granell.

UPM: Miguel Ángel Toledo, Miguel Ángel Fernández y David Santillán.

5. REFERENCIAS

- [1] A. Alvarez, E. Herrero, J.M. Buil. Las presas de Baserca y Llauset componentes del salto de bombeo de Moralets. ROP, 1979
- [2] Salazar F., San Mauro, J., Vicente D.J., Baena, C.M., Gracia, L. de-Pouplana, I. and Oñate, E. Computer-aided design and analysis of arch dams. 14 Benchmark ICOLD. Stockholm. 2017
- [3] D. J. Vicente, J. San Mauro, F. Salazar, and C. M. Baena (2017). An Interactive Tool for Automatic Predimensioning and Numerical Modeling of Arch Dams. *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2017, Article ID 9856938, 12 pages, 2017. doi:10.1155/2017/9856938
- [4] GiD the personal pre and post processor. <http://www.gidhome.com>, June 2017.
- [5] US Bureau of Reclamation (2013). Design of Double-Curvature Arch Dams Planning, Appraisal, Feasibility Level. Technical Memorandum No. EM36-86-68110.
- [6] Goldgruber M (2015): Nonlinear Seismic Modelling of Concrete Dams. Tesis Doctoral, Graz Technical University
- [7] Pouplana Sarda, I. D. (2018). Development of new computational methods for fluid-structure interaction analysis of multi-fractured media. Tesis Doctoral, UPC
- [8] Camacho G. T.; Ortiz M. (1996) Computational modelling of impact damage in brittle materials. *International Journal of Solids and Structures*, 33(20):2899–2938
- [9] Song S. H., Paulino G. H., Buttlar W. G. (2006). A bilinear cohesive zone model tailored for fracture of asphalt concrete considering viscoelastic bulk material. *Engineering Fracture Mechanics*, 73(18):2829–2848
- [10] Altarejos, L., Escuder, I., Serrano, A., de Membrillera, M. G. (2012). Methodology for estimating the probability of failure by sliding in concrete gravity dams in the context of risk analysis. *Structural Safety*, 36, 1-13
- [11] Jaafar, M., Bayagoob, K., Noorzaei, J., Thanoon, W. A. (2007). Development of finite element computer code for thermal analysis of roller compacted concrete dams. *Advances in Engineering Software*, 38(11):886-895
- [12] Santillán, D. (2014). Mejora de los modelos térmicos de las presas bóveda en explotación: Aplicación al análisis del efecto del cambio climático. PhD thesis, EI de Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Madrid, España
- [13] Santillán, D., Juanes, R., Cueto-Felgueroso, L. (2017a). Phase field model of fluid driven fracture in elastic media: Immersed-fracture formulation and validation with analytical solutions. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 122(4):2565-2589
- [14] Santillán, D., Juanes, R., Cueto-Felgueroso, L. (2017b). Phase field model of hydraulic fracturing in poroelastic media: Fracture propagation, arrest and branching under fluid injection and extraction. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 123. <https://doi.org/10.1002/2017JB014740>
- [15] Santillán, D., Mosquera, J. C., Cueto-Felgueroso, L. (2017c). Fluid-driven fracture propagation in heterogeneous medium: Probability distributions of fracture trajectories. *Physical Review E*, 96(5)053002
- [16] Santillán, D., Mosquera, J. C., Cueto-Felgueroso, L. (2017d). Phase-field model for brittle fracture. Validation with experimental results and extension to dam engineering problems. *Engineering Fracture Mechanics*, 178:109-125
- [17] Santillán, D., Saleté, E., Toledo, M. (2015a). A methodology for the assessment of the effect of climate change on the thermal-strain-stress behaviour of structures. *Engineering Structures*, 92:123-141
- [18] Santillán, D., Saleté, E., Toledo, M. (2015b). A new 1D analytical model for computing the thermal field of concrete dams due to the environmental actions. *Applied Thermal Engineering*, 5:160-171
- [19] Santillán, D., Saleté, E., Toledo, M., Granados, A. (2015c). An improved 1D-model for computing the thermal behaviour of concrete dams during operation. Comparison with other approaches. *Computers and Concrete*, 15(1):103
- [20] Santillán, D., Saleté, E., Vicente, D., Toledo, M. (2014). Treatment of solar radiation by spatial and temporal discretization for modeling the thermal response of arch dams. *Journal of Engineering Mechanics*, 140(11):05014001