

El comportamiento de las presas de Baserca y Llauset en los nuevos escenarios energéticos

B.Suárez¹, J.Miquel¹, J.M González², L. Gratiela², J.M.Buil³, J.F. Rio³ and M.T. Batlle³

1: ETS de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona, UPC
E-mail: benjamin.suarez@upc.edu

2: Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería, CIMNE
E-mail: josem.gonzalez@cimne.upc.edu

3: ENDESA
E-mail: felipe.rio@endesa.es

Palabras clave: saltos reversibles, embalse y desembalse, temperaturas y efectos térmicos

Resumen: *Las crecientes demandas energéticas están promoviendo nuevas estrategias comerciales en la explotación de las infraestructuras hidráulicas que se materializan aumentando el protagonismo de los saltos reversibles en la producción de energía. Estos nuevos escenarios dan lugar a operaciones, de embalse y desembalse, más bruscas y frecuentes que pueden alterar, entre otros, los efectos que ocasionan en las estructuras las acciones térmicas durante la explotación. Adicionalmente al actuar sobre estructuras con un largo recorrido funcional, se dispone de una información muy completa sobre su comportamiento que complementa y enriquece las hipótesis consideradas en el cálculo durante la fase de proyecto. En esta comunicación se presentan los resultados obtenidos en los análisis realizados en este contexto en las presas bóveda de Baserca y Llauset, el tratamiento de los datos experimentales disponibles después de más de 25 años de funcionamiento satisfactorio y como se han incorporado a los cálculos realizados buscando un equilibrio y una coherencia con las hipótesis utilizadas durante su diseño y construcción.*

1. INTRODUCCIÓN

Las presas de Baserca y Llauset forman parte del Salto Reversible de Moralets, y fueron construidas en la década de los 80 en la cabecera del río Noguera-Ribargozana en las provincias de Huesca y Lérida en España. Ambas presas son prácticamente iguales pues tienen unas dimensiones muy parecidas, dos bóvedas con una altura desde cimientos de 87 y 89 m y longitudes en coronación de 300 y 330 m respectivamente. En los casi 30 años de funcionamiento, ambas presas se han comportado según lo previsto, es decir, sin manifestar anomalía alguna tanto desde el punto de vista estructural como funcional, lo que es una prueba efectiva de un buen diseño, proyecto y construcción.

Para impulsar el plan y las nuevas estrategias de negocio es preciso intensificar los bombeos en el salto con el objetivo de optimizar su explotación. Esta nueva forma de aprovechamiento de los recursos, entre otras muchas cosas, implica incrementar los ciclos relacionados con las operaciones embalse-desembalse, y por tanto incluir con mucha más precisión los efectos térmicos que, como es bien conocido, resultan muy exigentes con las presas bóveda. Este análisis se puede hacer de forma mucho más realista que en la fase de proyecto dada la gran cantidad de información deformacional y térmica existente recogida in situ durante los años de funcionamiento. También es necesario tener en cuenta que el hormigón de ambas presas fue vertido hace aproximadamente 30 años, por lo que sus propiedades resistentes han ido aumentando a lo largo de este tiempo.

En cualquier caso en este tipo de análisis el cálculo es un instrumento necesario, e incluso inevitable, pero no debe introducir incertidumbres espurias en el comportamiento estructural de las bóvedas, especialmente cuando se comprueba que es correcto. El único camino para que no se produzcan incompatibilidades ficticias es mantener las metodologías de cálculo usadas en el proyecto de forma que, aunque se utilicen las más modernas herramientas numéricas disponibles, no se alteren los principios estructurales básicos. Este requerimiento establece que se deben utilizar los mismos principios estructurales, en este caso la elasticidad tridimensional elástica y lineal, y las mismas simplificaciones, método de Stucky para las cargas térmicas, para determinar las acciones que actúan sobre ambas bóvedas, tanto para replicar las situaciones de proyecto como para las que ocasionen las nuevas condiciones de explotación.

En cada presa se han considerado distintos casos de carga debidos a acciones mecánicas (peso propio y embalse lleno o nivel mínimo de explotación) y térmicas (invierno y verano con embalse, lleno, vacío y oscilante). Esta multiplicidad de hipótesis genera una gran cantidad de resultados que es necesario resumir, presentar y analizar de una forma amigable con la ayuda de gestores gráficos, pero en cualquier caso poniendo de manifiesto las cualidades y singularidades de la respuesta estructural que es el objetivo; es decir, los valores máximos de las tensiones de tracción y de compresión, su ubicación y aquellos estudios de detalle que demanden las localizaciones excesivas (2 MPa en situación extraordinaria) de acuerdo con la Instrucción para el Proyecto, Construcción y Explotación de Grandes Presas de 1.967 que fue la considerada en el proyecto para ambas bóvedas.

2. EL MODELO NUMÉRICO

El problema planteado presenta dos vertientes: el problema mecánico y el problema térmico. El método de los Elementos Finitos permite resolver las ecuaciones diferenciales que gobiernan ambos problemas, incorporando las condiciones de contorno adecuadas en cargas y/o temperaturas [2,3]. El método ofrece además una gran versatilidad a la hora de describir la geometría que permite construir modelos numéricos siguiendo las pautas geométricas del proyecto [4].

Las bóvedas de Baserca y Llauset se definen en planta mediante arcos de tres centros. Los arcos centrales son de ángulo constante y sus centros quedan definidos por curvas parabólicas. En alzado, las presas se encuentran divididas en 20 o 17 ménsulas respectivamente mediante juntas verticales de construcción. Al cuerpo de la presa se le añade una porción de suelo, con una altura y un ancho aguas arriba y aguas abajo del orden de la altura de la presa, representativa y suficiente para reproducir los efectos de los contornos.

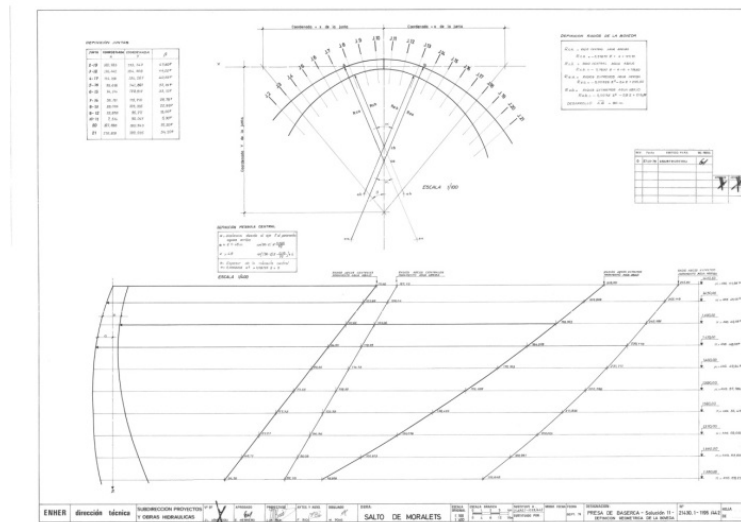


Figura 1.- Plano de la definición geométrica de Baserca

Las bóvedas se modelan como un sólido tridimensional mediante un conjunto de elementos hexaédricos serendípticos de 27 nodos de eficacia probada para los tipos de análisis que se realizan. La geometría incluye las juntas verticales de la presa que definen cada uno de los bloques de forma que alternativamente se generan con facilidad dos modelos bien diferenciados: el de bloques alternados aislados y un modelo continuo.

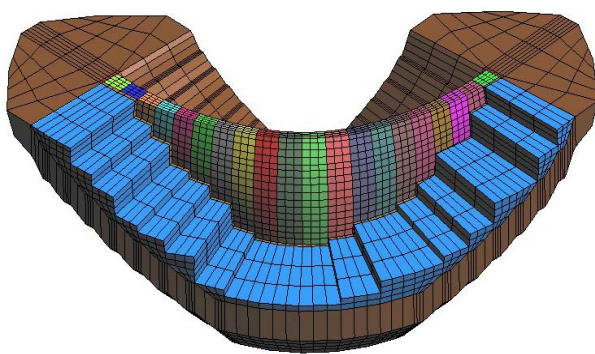


Figura 2: Vista general de la presa de Baserca

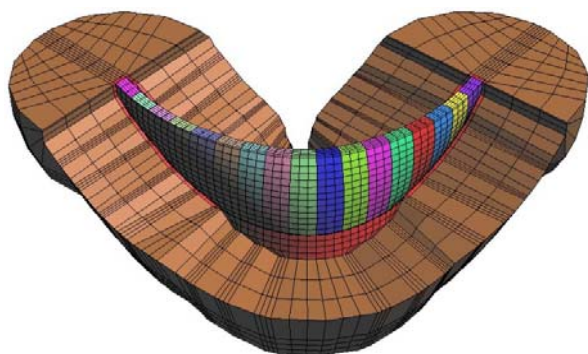


Figura 3: Vista general de la presa de Llauset

En la bóveda de Baserca se ha incorporado aguas arriba una capa de terreno en la base, que

cumple la función de muleta, en realidad un apoyo horizontal que actúa durante la fase de construcción (carga de peso propio). Se supone que esta capa se comporta como un muelle elástico con coeficientes elásticos diferentes a compresión y tracción. El modelo resultante está formado por 9.492 elementos con 45.214 nodos. En la bóveda de Llauset se ha añadido aguas arriba un apoyo de hormigón que actúa como muleta durante la fase de construcción. El modelo numérico resultante está formado por 9.852 elementos con 46.413 nodos.

3. CASOS DE CARGA BÁSICOS

Se consideran tres casos de carga denominados básicos: el peso propio, la presión hidrostática y los efectos térmicos. La modelización coherente de cada uno de ellos precisa de modelos numéricos definidos en función del proceso constructivo y de las implicaciones estructurales en cada caso. Los casos de carga de cálculo se obtienen superponiendo estos casos básicos.

Para el cálculo del peso propio se utiliza un modelo que reproduce la situación física antes y después de la inyección de las juntas, de acuerdo con el proceso constructivo. Para ello se calcula considerando que los bloques actúan separadamente, al no estar inyectadas las juntas.

Para las demás situaciones de cálculo de servicio y excepcionales, las juntas entre los bloques se consideran inyectadas de forma que el modelo geométrico, y por tanto también el modelo numérico, cambia. Se suponen por tanto dos etapas claramente diferenciadas: un primer cálculo en el que cada bloque no interactúa con el bloque contiguo y un segundo en el que los bloques se consideran solidarios.

3.1 Peso Propio

El peso propio se analiza utilizando dos modelos de cálculo. El primero definido por las ménsulas pares y el terreno, y un segundo que considera las ménsulas impares. Para obtener los resultados finales se superponen todas las ménsulas, sin que exista contacto entre los bloques. Por ello en la interface de las ménsulas hay dos valores tensionales asociados con los dos nodos que comparten las mismas coordenadas.

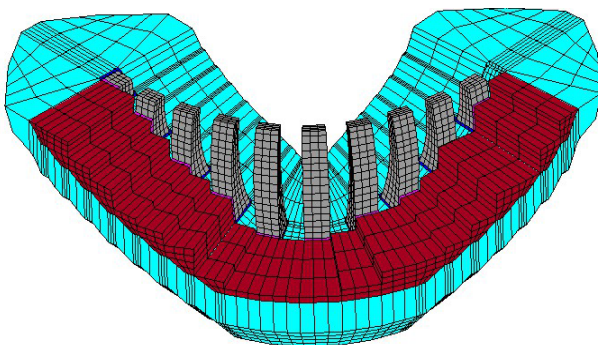


Figura 4: Vista bloques impares en la presa de Baserca

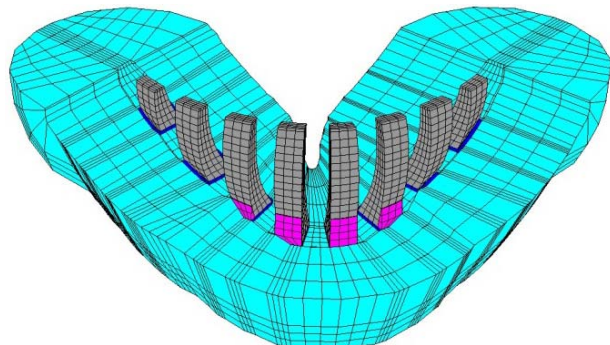


Figura 5: Vista bloques pares en la presa de Llauset

3.2 Carga Hidrostática

La carga hidrostática se calcula sobre un modelo que contiene todos los bloques solidariamente unidos (figuras 2 y 3). Se considera el empuje hidrostático actuando normal en cada punto sobre la superficie del paramento aguas arriba. En los análisis realizados se han considerado tres niveles de referencia, el máximo ordinario (NMO), el mínimo de explotación (NME) y el correspondiente a la cota de coronación asociada con la avenida extrema (NAE).

3.3 Efectos Térmicos

Dado que ambas presas llevan en explotación, de forma satisfactoria, más de veinticinco años, y teniendo en cuenta que las bóvedas alcanzaron hace ya tiempo su temperatura estable de funcionamiento, con un comportamiento térmico que responde de forma directa a las variaciones de la temperatura media ambiente, se considera en este trabajo unas distribuciones de temperatura en el cuerpo de la presas basadas en temperaturas medias ambiente estacionales.

La empresa responsable de la explotación del conjunto dispone de una serie de datos físicos sobre las presas provenientes del proceso de auscultación. En concreto las lecturas diarias, mensuales o estacionales registradas durante los años 1988–2011 en los teletermómetros situados a diferentes alturas en cada ménsula. Estos datos forman parte de este trabajo y permiten determinar los incrementos térmicos en relación con la temperatura de inyección de las juntas que son la base de la respuesta tensional térmica. Para evitar que la distribución de temperaturas ambientales resultantes seas fruto de una variación diaria o de variaciones muy puntuales se han suavizado los extremos haciendo un promedio mensual, que además tendría en cuenta la inercia térmica del hormigón.

Estas medias mensuales se han agrupado en torno a tres conjuntos de valores de temperatura estacionales

- Distribución media en invierno definida como el valor medio, máximo y mínimo de los promedios de las medias mensuales para los meses diciembre–mayo.
- Distribución mínima en invierno definida como el valor medio, máximo y mínimo de los mínimos de las medias mensuales para los meses de diciembre-mayo
- Distribución máxima en verano definida como el valor medio, máximo y mínimo de los máximos de medias mensuales en los meses de junio-noviembre.

La distribución de temperatura en el cuerpo de la presa a partir de los valores ambientales se realiza a través del método de Stucky [1]. Este método permite determinar la distribución de temperaturas en el interior del hormigón partiendo de las variaciones de la temperatura ambiental, estacionales o anuales, en los paramentos. Esta distribución se normaliza mediante una recta que se define a partir de la amplitud de la variación media y de la diferencia máxima en los paramentos.

T Hormigonado	promedios de medias mensuales				
Mínima invierno	0,99	Máxima invierno	9,74	Media invierno	3,90
T mínima invierno	mínimas de medias mensuales				
Mínima invierno	-4,30	Máxima invierno	7,19	Media invierno	0,56
T máxima verano	máximas de medias mensuales				
Mínima verano	9,08	Máxima verano	19,95	Media verano	15,95

Tabla 1: Variación de temperatura en el paramento aguas abajo en la bóveda de Baserca

Siguiendo esta técnica se han definido y analizado los siguientes casos térmicos

- Embalse vacío en invierno y verano, con la misma variación de temperatura en los dos paramentos
- Embalse vacío en verano con insolación en el paramento aguas abajo considerando un incremento de la temperatura en el paramento expuesto.
- Embalse lleno en invierno y verano, con la variación de la temperatura del agua en el paramento aguas arriba y de la temperatura ambiente aguas abajo.
- Embalse lleno en verano con insolación en el paramento aguas abajo considerando la variación de la temperatura del agua en el paramento aguas arriba
- Embalse oscilante considerando el nivel mínimo de explotación aguas arriba y un promedio de la temperatura de embalse lleno y vacío en el resto de los paramentos.

En las figuras 6 y 7 se muestran las peculiaridades de alguno de los escenarios térmicos calculados para cada presa. Uno de ellos, para la presa de Baserca, durante la inyección de las juntas y el otro, en Llauset, en la situación denominada de embalse oscilante que considera un embalse-desembalse rápido.

4. CASOS DE CARGA ANALIZADOS

Teniendo en cuenta los estados de carga básicos el estudio planteado en las presas de Baserca y Llauset supone cuatro situaciones de cálculo bien diferenciadas:

- **Peso propio + Temperatura embalse vacío.** Este estado de carga representa la situación antes del llenado del embalse cuando el paramento aguas arriba ha estado expuesto a las condiciones ambientales durante una temporada larga.

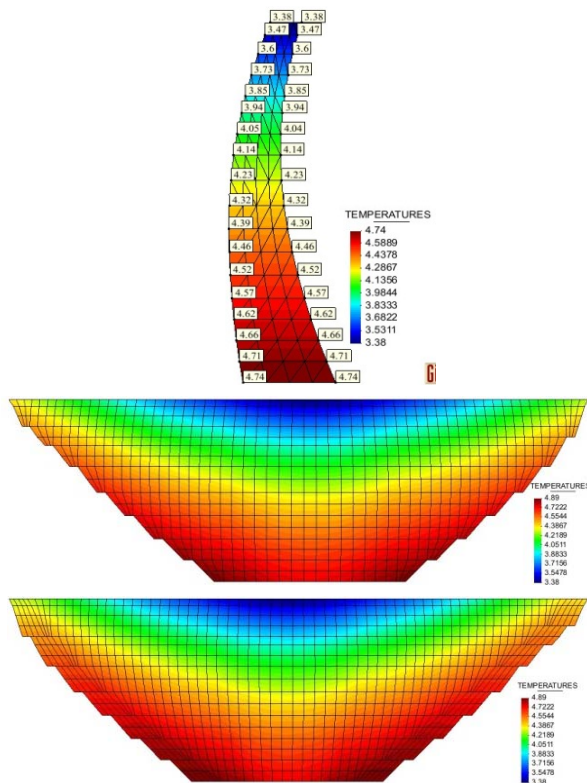


Figura 6: Distribución de temperaturas en el momento de la inyección de las juntas (presa de Baserca)

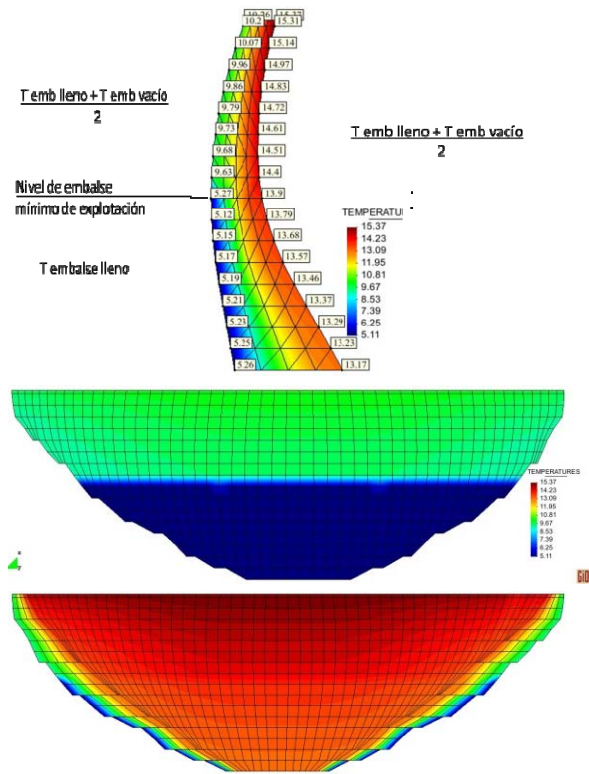


Figura 7: Distribución de temperatura en verano en el caso de embalse oscilante (presa de Llauset).

- **Peso propio + Carga hidrostática embalse lleno + Temperatura embalse lleno.** La combinación describe el estado de la presa durante la explotación con embalse lleno.
- **Peso propio + Carga hidrostática nivel mínimo de explotación + Temperatura embalse oscilante.** Esta combinación describe una situación oscilante entre embalse lleno y embalse mínimo cuando el periodo de oscilación es tal que el paramento de aguas arriba se encuentra en una situación intermedia en los extremos embalse lleno o vacío.
- **Peso propio + Carga hidrostática nivel de avenida extrema**

Para las dos primeras combinaciones se debe tener en cuenta el efecto térmico que da lugar a tres situaciones de cálculo:

- Temperatura mínima en invierno.
- Temperatura máxima en verano.
- Temperatura máxima en verano con insolación aguas abajo.

En el caso de embalse oscilante se han tenido en cuenta los escenarios térmicos de invierno y de verano.

5. RESULTADOS

Los resultados finales se han obtenido para los distintos escenarios de cálculo aplicando el principio de superposición combinando los estados de carga básicos, aprovechando las facilidades que proporciona el cálculo elástico lineal. La superposición de los resultados se ha realizado en ambas presas en los modelos monolíticos pero manteniendo las peculiaridades del peso propio que actúa antes de inyectar las juntas.

En cada caso los resultados tensionales tanto de tracción como de compresión se muestran en el sentido arco σ_x o verticales σ_z en los dos paramentos. En algunos escenarios se obtienen concentraciones de tensiones debido a singularidades del modelo geométrico y de los contactos. En estos casos si la concentración se produce en un dominio muy pequeño se desprecia, pero cuando tiene una cierta dimensión se redistribuye mediante un promediado en arcos y ménsulas según corresponda, más próximos reproduciendo el comportamiento de la estructura en la práctica.

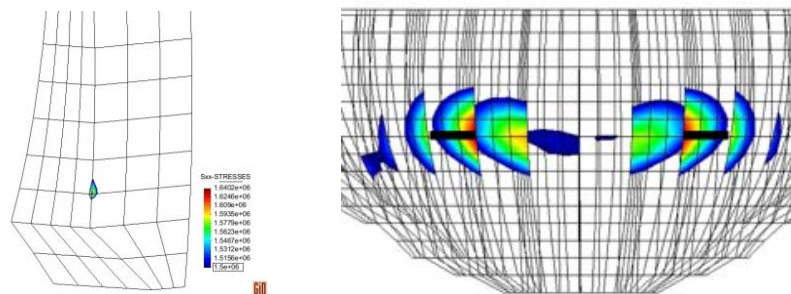


Figura 8: Concentraciones tensionales tipo

Los resultados obtenidos se procesan en modo relleno sólido con la ayuda de diagramas de colores. Los diagramas de tensiones van acompañados de una leyenda que debe interpretarse como tracción cuando el valor es positivo y compresión cuando es negativo, en ambos casos vienen dadas en N/m^2

5.1 Presa de Baserca

Teniendo en cuenta la cantidad de información obtenida en el análisis de los 9 escenarios de cálculo definidos para cada presa, los resultados se agrupan en torno a criterios relacionados con la explotación, es decir embalse vacío, lleno u oscilante o con la avenida extrema.

Embalse Vacío

En este escenario de cálculo actúa la carga de peso propio en las diferentes situaciones térmicas consideradas. La máxima tensión de tracción es de 1,47 MPa, en sentido arco y se

obtiene en el paramento aguas abajo para la temperatura mínima en invierno. La tensión máxima de tracción vertical es de 1,4 MPa y se obtiene en el paramento de aguas abajo para la temperatura máxima en verano. Se obtienen tensiones algo mayores en una junta del estribo izquierdo del paramento aguas arriba muy localizadas y concentradas que se redistribuyen verticalmente entre los arcos más próximos resultando valores inferiores al máximo.

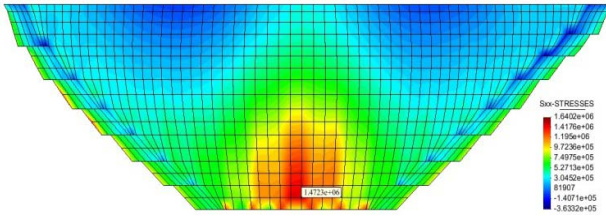


Figura 9: Máximas tensiones de tracción en el sentido arco en el paramento aguas abajo

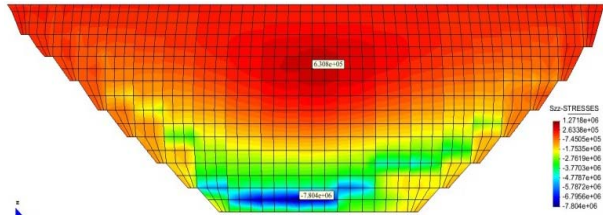


Figura 10: Máximas tensiones de compresión verticales en el paramento aguas arriba

La máxima tensión de compresión es de 7,8 MPa vertical y se obtiene en el paramento de aguas arriba para la temperatura máxima en verano con insolación. La máxima tensión de compresión en sentido arco es de 4,9 MPa y se obtiene en el paramento de aguas abajo para la temperatura máxima en verano con insolación.

Embalse Lleno

En este escenario de cálculo actúa la carga de peso propio y la presión hidrostática en las diferentes situaciones térmicas consideradas. La máxima tensión de tracción es de 1,46 MPa en sentido arco y se obtiene en el paramento de aguas abajo para la temperatura mínima en invierno. Prácticamente se obtiene el mismo valor para la máxima tracción vertical en el mismo escenario térmico pero en el paramento de aguas arriba. Se obtienen algunas tensiones de tracción tanto en sentido arco como verticales algo superiores muy concentradas en coronación y en alguna junta que redistribuidas vertical y horizontalmente en los arcos y ménsulas más próximas resultan ser iguales o inferiores al valor máximo anterior.

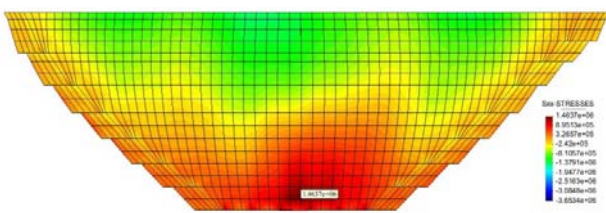


Figura 11: Máximas tensiones de tracción en el sentido arco en el paramento aguas abajo

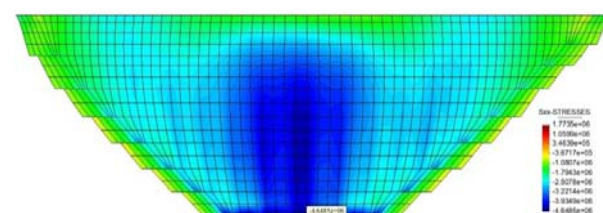


Figura 12: Máximas tensiones de compresión en el sentido arco en el paramento aguas abajo

La máxima tensión de compresión es de 4,6 MPa en el sentido arco y se obtiene en el paramento de aguas abajo para la temperatura máxima en verano con insolación. La tensión máxima de compresión vertical es de 4 MPa y se obtiene en el mismo paramento y escenario térmico.

Embalse Oscilante

En este escenario de cálculo actúa la carga de peso propio y la presión hidrostática asociada con el nivel mínimo de explotación en las diferentes situaciones térmicas consideradas. El valor máximo de la tensión de tracción es 1,9 MPa obtenida en el paramento de aguas arriba para la temperatura de embalse oscilante en verano. Esta tensión está muy localizada y concentrada en coronación en el paramento de aguas arriba. En cualquier caso esta tensión muestra que la hipótesis de carga es demasiado exigente con la estructura que, a pesar de no haber sido diseñada con este criterio, la soporta razonablemente teniendo en cuenta la metodología conservadora utilizada para determinar los diferentes escenarios térmicos. La tracción vertical máxima es de 0,8 MPa y se obtiene en el mismo paramento para la misma situación térmica.

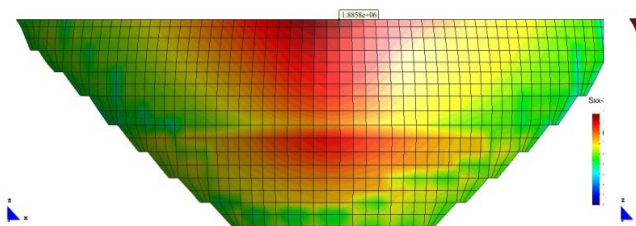


Figura 13: Máximas tensiones de tracción en el sentido arco en el paramento aguas arriba

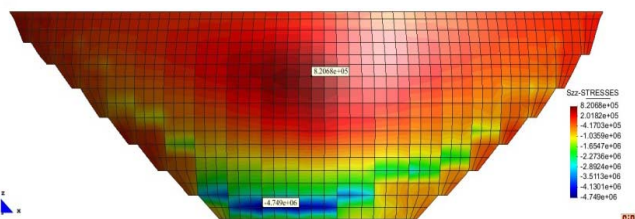


Figura 14: Máximas tensiones de compresión verticales en el paramento aguas arriba

La máxima tensión de compresión es de 4,7 MPa vertical y se obtiene en el paramento aguas arriba para la temperatura de embalse oscilante en verano. La máxima compresión en el sentido arco es de 3,7 MPa y se obtiene en el paramento aguas abajo para la misma situación térmica.

Avenida Extrema

En este escenario de cálculo actúa la carga de peso propio y la presión hidrostática asociada con el vertido por coronación. La máxima tensión de tracción es vertical de 1,4 MPa (muy localizada en la parte inferior de una de las juntas centrales) y se obtiene en el paramento de aguas arriba. La tensión de tracción máxima en el sentido arco es de 0,5 MPa y se obtiene en el mismo paramento.

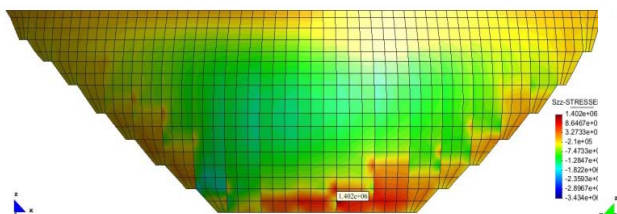


Figura 15: Máximas tensiones de tracción verticales en el paramento aguas arriba

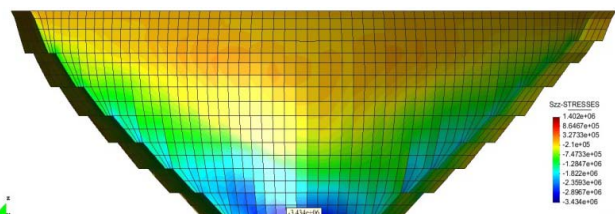


Figura 16: Máximas tensiones de compresión verticales en el paramento aguas abajo

La máxima tensión de compresión es vertical con un valor de 3,4 MPa y se obtiene en el paramento de aguas abajo. La tensión de compresión en el sentido arco máxima es de 3,1 MPa y se obtiene en el paramento de aguas arriba.

5.2 Presa de Llauset

Embalse Vacío

En este escenario de cálculo actúa la carga de peso propio en las diferentes situaciones térmicas consideradas. La máxima tensión de tracción es vertical de 1,6 MPa y se obtiene en el paramento aguas abajo para la temperatura máxima en verano con insolación. Esta tensión máxima está muy localizada y concentrada muy superficialmente en el estribo derecho del paramento de aguas abajo. La máxima tensión en el sentido arco alcanza el valor de 1,3 MPa y se obtiene en el paramento aguas arriba para la temperatura mínima en invierno. Este valor se obtiene después de redistribuir verticalmente en los arcos vecinos una concentración de tensiones muy localizada aguas arriba.

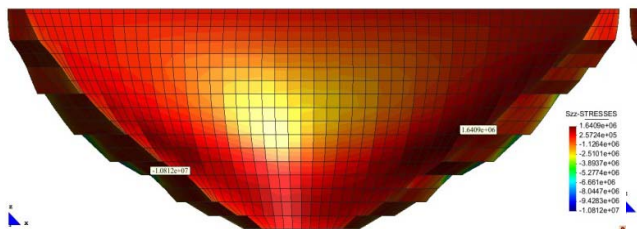


Figura 17: Máximas tensiones de tracción verticales en el paramento aguas abajo

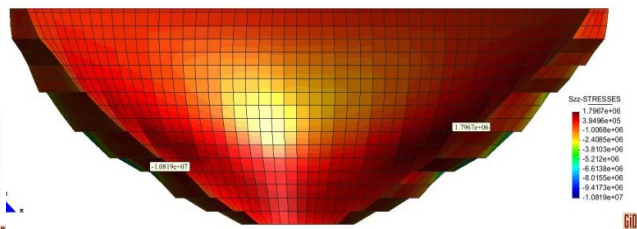


Figura 18: Máximas tensiones de compresión verticales en el paramento aguas arriba

La máxima tensión de compresión es vertical de 10,8 MPa, y se obtiene en el paramento de aguas abajo, muy concentrada en la zona inferior del estribo izquierdo, para la temperatura máxima en verano. La tensión de compresión en el sentido arco máxima vale 7,6 MPa y se obtiene en el paramento de aguas bajo, muy concentrada en la zona superior del estribo izquierdo, para la temperatura máxima en verano con insolación

Embalse Lleno

En este escenario de cálculo actúa la carga de peso propio y la presión hidrostática en las diferentes situaciones térmicas consideradas. La tensión máxima de tracción es en sentido arco de 1,4 MPa y se obtiene en el paramento de aguas arriba para la temperatura máxima en verano con insolación. Esta tensión es el resultado de redistribuir una tensión algo mayor pero muy localizada y concentrada en coronación relajándose en una distancia pequeña.

La tensión de tracción vertical máxima es de 1,5 MPa y se obtiene en el paramento de aguas abajo para la temperatura mínima de invierno. La tensión máxima de compresión es vertical

de 6.2 MPa y se obtiene para la temperatura máxima en verano en el paramento de aguas abajo, concentrada en la zona inferior del estribo izquierdo. La tensión máxima de compresión en el sentido arco es de 5,5 MPa y se obtiene en el paramento de aguas arriba, muy localizada en coronación-estribo derecho, para la temperatura máxima en verano con insolación.

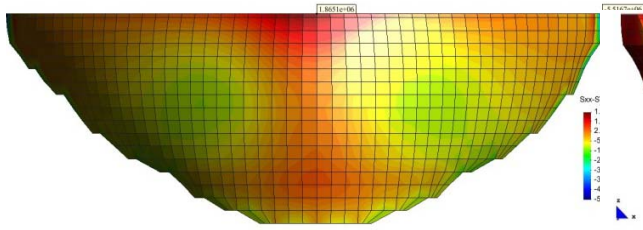


Figura 19: Máximas tensiones de tracción en el sentido arco en el paramento aguas arriba

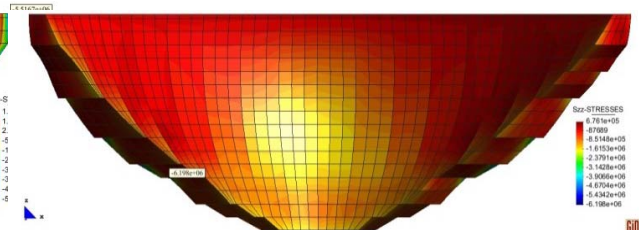


Figura 20: Máximas tensiones de compresión vertical en el paramento aguas abajo

La tensión máxima de compresión es vertical de 6.20 MPa y se obtiene para la temperatura máxima en verano en el paramento de aguas abajo, concentrada en la zona inferior del estribo izquierdo. La tensión máxima de compresión en el sentido arco es de 5,5 MPa y se obtiene en el paramento de aguas arriba, muy localizada en coronación-estribo derecho, para la temperatura máxima en verano con insolación.

Embalse Oscilante

En este escenario de cálculo actúa la carga de peso propio y la presión hidrostática asociada con el nivel mínimo de explotación en las diferentes situaciones térmicas consideradas. El valor máximo de la tensión de tracción es vertical de 1,6 MPa y se obtiene en el paramento de aguas abajo para la temperatura de embalse oscilante en invierno. El valor máximo de la tensión de tracción en el sentido arco vale 1,5 MPa y se obtiene en el paramento de aguas arriba, muy concentrada en coronación, para la temperatura de embalse oscilante en verano.

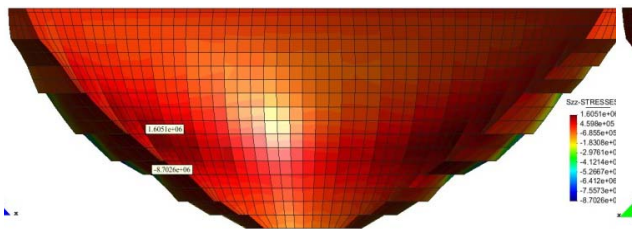


Figura 21: Máximas tensiones de tracción verticales en el paramento aguas abajo

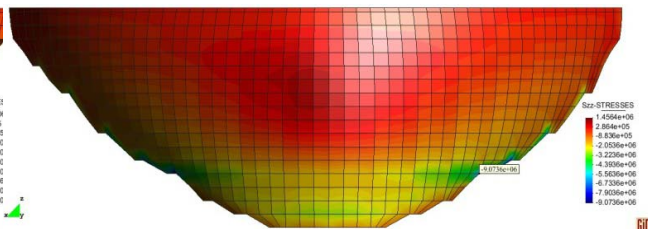


Figura 22: Máximas tensiones de compresión verticales en el paramento aguas arriba

La tensión máxima compresión es vertical de 9 MPa y se obtiene en el paramento de aguas arriba, muy localizada y concentrada en la zona baja del estribo derecho, para la temperatura de embalse oscilante en verano. La tensión máxima de compresión en el sentido arco vale 5,2 y se obtiene en el mismo paramento muy concentrada, y localizada en la zona alta del estribo

derecho, para el mismo escenario térmico.

Avenida Extrema

En este escenario de cálculo actúa la carga de peso propio y la presión hidrostática asociada con el vertido por coronación. La máxima tensión de tracción es en sentido arco de 0,9 MPa y se obtiene en el paramento de aguas arriba, concentrada en la zona alta del estribo izquierdo. La tensión de tracción vertical máxima es de 0,75 MPa y se obtiene en el paramento de aguas abajo.

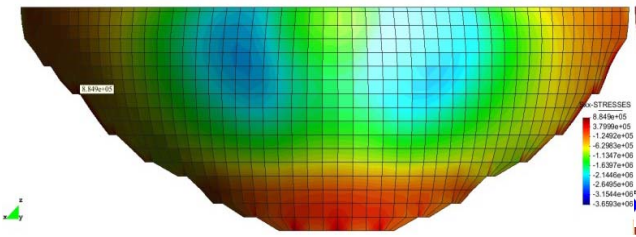


Figura 23: Máximas tensiones de tracción en el sentido arco en el paramento aguas arriba

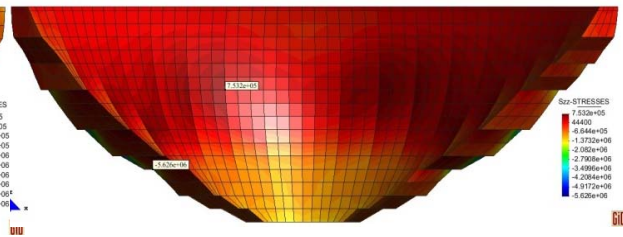


Figura 24: Máximas tensiones de compresión en el sentido arco en el paramento aguas abajo

La máxima tensión de compresión es vertical de 5,6 MPa y se obtiene en el paramento de aguas abajo. La tensión de compresión en el sentido arco máxima es de 3,7 MPa en coronación en el paramento de aguas abajo

6. CONCLUSIONES

Se han obtenido los resultados en ambas presas para los distintos estados y combinaciones de carga, peso propio antes de la inyección trabajando cada ménsula de forma independiente, carga hidrostática, con las ménsulas solidarizadas por la inyección, para los distintos niveles de embalse, Máximo Ordinario, Mínimo de Explotación y Avenida Extrema y diferentes Efectos Térmicos definidos y cuantificados a partir de los datos medidos in situ en varios puntos de las dos presas desde 1.988 hasta la actualidad.

Todos los valores obtenidos en los cálculos realizados resultan admisibles, ya que, aunque en zonas muy localizadas las tensiones de tracción alcanzan valores elevados, se encuentran muy concentradas, actúan en zonas muy superficiales y en muchos casos están provocadas por las propias peculiaridades del modelo numérico. Esta afirmación se complementa con los resultados obtenidos de los ajustes y redistribuciones realizadas mediante cortes longitudinales y verticales en las zonas más solicitadas que atenúan notablemente los valores máximos.

Como es bien conocido la carga térmica resulta muy exigente con las presas bóveda. Por ello y para eliminar alguna de las incertidumbres que razonablemente pudieran surgir durante el análisis y la interpretación de los resultados obtenidos en los cálculos realizados, se utiliza la

metodología propuesta por Stucky, aceptada técnicamente como una buena práctica en este tipo de análisis. Esta metodología se despliega con una serie de datos térmicos reales medidos en ambas presas, lo que permite particularizar la carga térmica tanto de referencia (temperatura de inyección) como de explotación en invierno y en verano. El escenario de embalse oscilante, embalse-desembalse rápido, considerando en ambos paramentos una temperatura media en cada escenario térmico entre la de embalse lleno y embalse vacío es una novedad en este tipo de análisis y constituye una prueba de stress para ambas bóvedas que soportan razonablemente.

En los dos casos la avenida extrema no es determinante pues proporciona unas tensiones de tracción y de compresión máximas del mismo orden que las obtenidas en otras combinaciones de carga, aunque en ambos casos en el sentido vertical y en paramentos opuestos, aguas arriba y aguas abajo respectivamente.

Las dos presas siendo muy parecidas geométrica y funcionalmente, tienen sus propias peculiaridades que se manifiestan en la respuesta estructural. Posiblemente ello sea debido a la diferente forma en que se han tratado las cuestiones más significativas relacionadas por ejemplo con el peso propio considerando ménsulas aisladas. También es importante indicar que el hormigón de ambas presas fue vertido hace aproximadamente 30 años, por lo que su resistencia ha ido aumentando a lo largo de este tiempo.

También se ha podido comprobar, in situ y sin ningún tipo de duda, que ambas presas han soportado con éxito durante años estados de carga similares a los que se prevé actúen en el futuro, presentando un comportamiento excelente según se desprende de la inspección visual realizada y del análisis de los resultados obtenidos con la auscultación diseñada para facilitar su seguimiento.

REFERENCIAS

- [1] Stucky, A., Derron, M. H., “Problèmes thermiques posés par la construction des barrages-réservoirs”. Science & Technique. Lausanne (1957)
- [2] Salet, E., Lancha, J. Carlos., “Presas de hormigón. Problemas térmicos evolutivos”. Colegio de Caminos, Canales y Puertos de Madrid. Madrid (1998)
- [3] Zienkiewicz O.C., Taylor, R.L., Zhu, J.Z., “*The finite element method: Its basis and fundamentals*”. Sixth edition. Elsevier (1995)
- [4] “GiD. The personal pre and postprocessor”. CIMNE (2010)