



INGENIERÍA DE ESTRUCTURAS
Máster en Ing. de Caminos, Canales y Puertos

TRABAJO FINAL S-24
PRESA DE HORMIGÓN

Alberto Rodríguez Jiménez

Barcelona, 23 de enero de 2017

Introducción

Se quiere diseñar una presa de hormigón para almacenar agua hasta los 77 metros de altura. Los parámetros de diseño a considerar son que la coronación tenga un ancho de 6 metros, que haya 3 metros de salvaguardo desde la superficie del agua y el final de la presa y las restricciones siguientes:

$$\begin{aligned}2.0 < m < 4.0 \\2.0 < n < 3.5 \\0.1H < B < 0.3H\end{aligned}$$

Que hacen referencia a las dimensiones que muestra la Figura 1. H es dada por la altura de agua más el salvaguardo, con un total de 80 metros. En el diseño se debe tener en cuenta también que las tracciones en cualquier punto de la presa no deben superar los 0.01 MPa.

La presa está empotrada en un terreno homogéneo de 30 metros de ancho, con un perfil como el que muestra la Figura 2. Las propiedades de este suelo y del hormigón usado para la presa se dan en la Tabla 1. El conjunto suelo-presa se estudiará en dos casos de carga: bajo peso propio y con peso propio más la presión hidrostática del agua en la máxima capacidad de la presa. El diseño se hará en 2D, con una posterior verificación de los resultados con una geometría más exacta en 3D.

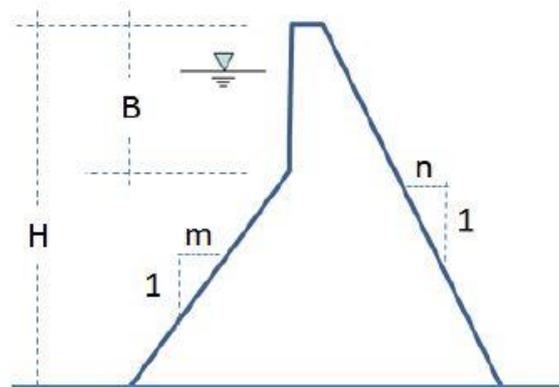


Figura 1. Restricciones geométricas de la presa

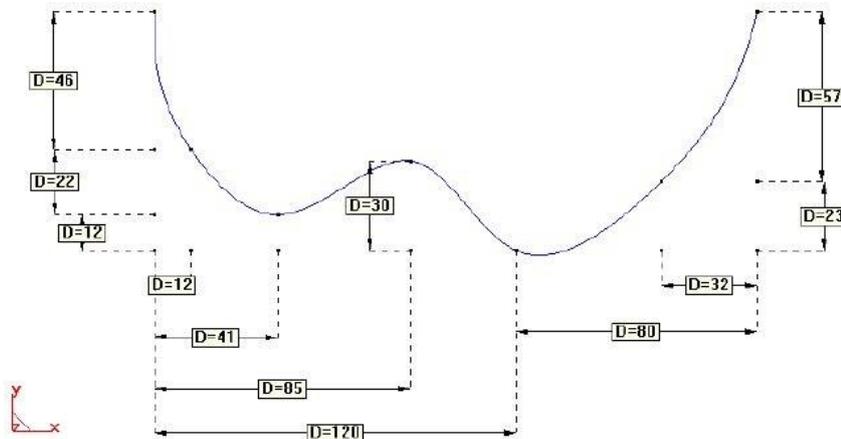


Figura 2. Perfil del terreno

Tabla 1. Propiedades de los materiales

Propiedad	Unidades	Hormigón	Terreno
E	GPa	22	37
ν	-	0.2	0.3
γ	N/m ³	25000	20000

Diseño más económico

El primer intento de diseño se realiza para la menor cantidad posible de hormigón. Entonces, se tiene que:

$$m = 2.0$$

$$n = 2.0$$

$$B = 0.3H$$

Modelado 2D

Con estos parámetros se puede dibujar la presa, lo que se ha hecho primero en 2D. La misma se ha apoyado sobre una capa de terreno de 30 metros de profundidad y longitud tal que haya 60 metros de suelo antes y después de la presa. La Figura 3 muestra el diseño final de esta presa económica. Las condiciones de contorno se imponen en el suelo, bloqueando cualquier movimiento en la línea inferior y los desplazamientos en x en los laterales.

La versión 2D del problema se estudia, como es clásico en los análisis de presas de gravedad, bajo las hipótesis de deformación plana. Éstas imponen que la deformación fuera del plano de dibujo sea nula, aunque no así las tensiones, lo cual es razonable para puntos alejados de los extremos del cuerpo, es decir, por la zona central de la presa. En esta formulación es necesario especificar el ancho de la estructura, que es 200 metros en este caso, como se deduce de la Figura 2.

El comportamiento estructural del conjunto se ha estudiado mallando con elementos triangulares de 3 nodos. El tamaño de los elementos se escoge según un análisis de convergencia del desplazamiento vertical de la corona cuando solo actúa el peso propio, que se muestra en la Figura 4. El último punto del gráfico, que corresponde a un tamaño del elemento de 1 tanto para la estructura como el terreno, mantiene la precisión hasta las centésimas de milímetro respecto al anterior, por lo que se tomará esta última malla para analizar el comportamiento estructural.

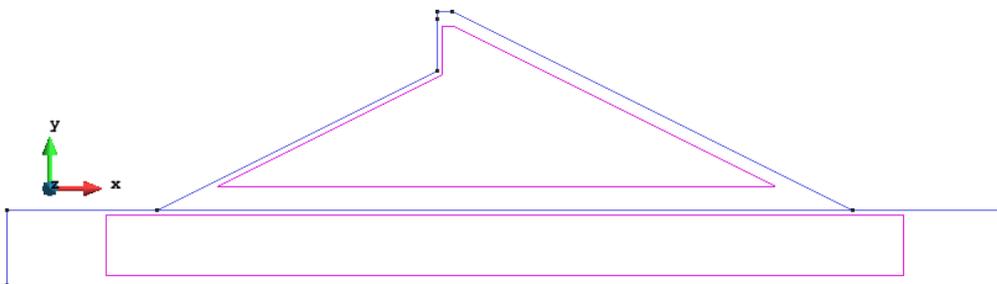


Figura 3. Geometría 2D

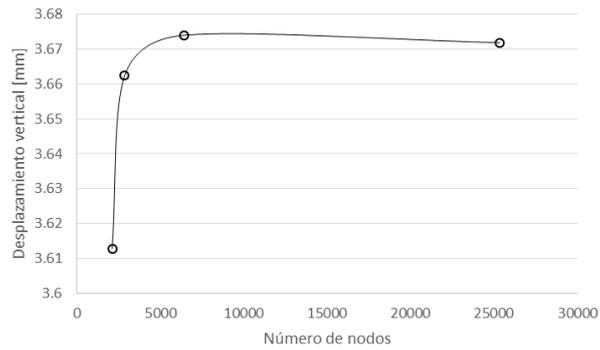


Figura 4. Análisis de convergencia

Comportamiento bajo peso propio

En primer lugar se estudia el problema cuando aún no hay agua arriba de la presa. Las Figura 5 y Figura 6 muestran ambas componentes de los desplazamientos tanto en el terreno como en la presa. Vemos que en la frontera entre ambos los resultados son compatibles, y que los mayores desplazamientos están en la corona, como era de esperar. Ésta se desplaza hacia la izquierda y hacia abajo, pero aun siendo el mayor desplazamiento su orden de magnitud es de milímetros.

Las tensiones principales mayores y menores se muestran en las Figura 7 y Figura 8, respectivamente. Todas las menores corresponden a compresiones, por lo que son de mayor interés las mayores. Las únicas tracciones en la presa se dan cerca de la corona, pero son de pequeña entidad. Para la única carga de peso propio, se satisface la condición de no sobrepasar los 0.01 MPa. Debe estudiarse ahora el caso con la carga hidrostática para ver si el diseño es satisfactorio.

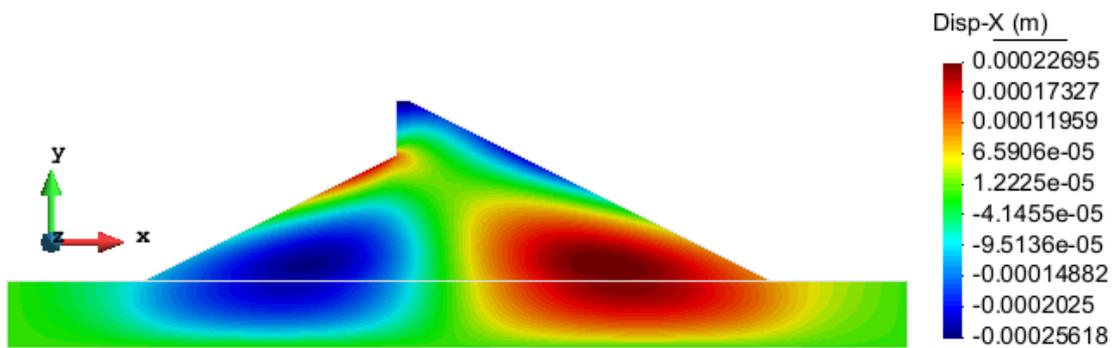


Figura 5. Desplazamientos horizontales. Solo peso propio

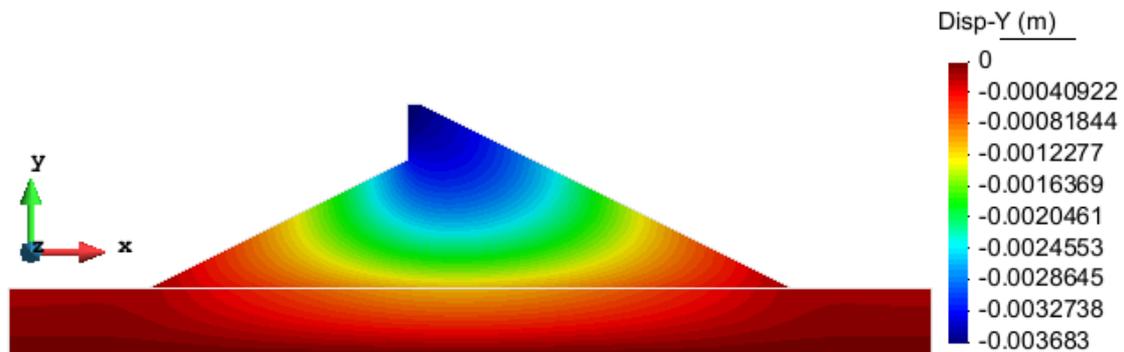


Figura 6. Desplazamientos verticales. Solo peso propio

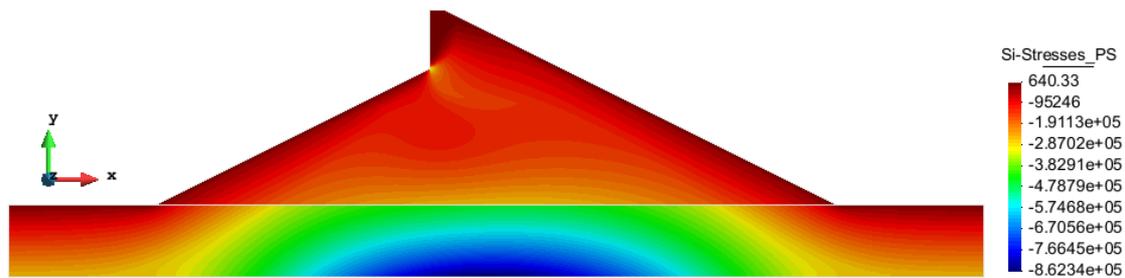


Figura 7. Tensiones principales mayores. Solo peso propio

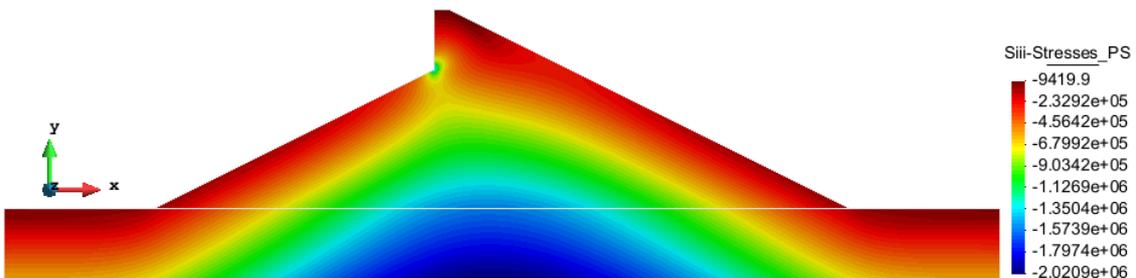


Figura 8. Tensiones principales menores. Solo peso propio

Comportamiento bajo peso propio y carga hidrostática

Añadiendo una carga extra al modelo anterior podemos considerar los efectos que el agua almacenada ejerce sobre la presa y el terreno. Ésta se modeliza como una carga distribuida lineal q en las paredes y una carga uniforme sobre la línea superior del terreno. Los valores de estas cargas se hallan con la expresión:

$$q = \gamma_{agua} \cdot h$$

Con h la altura de la columna de agua sobre el punto considerado y γ_{agua} el peso específico del agua.

Los desplazamientos en este caso se muestran en las Figura 9 y Figura 10. Éstos son prácticamente iguales a los vistos en el caso anterior; el agua no tiene un gran efecto sobre ellos. Sin embargo, es de mayor importancia por sus restricciones en el diseño estudiar las tensiones. La Figura 11 muestra las tensiones principales mayores y la Figura 12, las menores. En la Figura 11 se han destacado dos valores para mostrar que el límite de tracciones se sobrepasa únicamente en la esquina inferior de la presa, donde se alcanzan los 0.15 MPa.

Según estos resultados, este diseño de la presa no es válido. Sin embargo, el hecho de que estas tracciones mayores se concentren en una esquina hace dudar de la validez del modelo en esa zona. Para estudiar esto, se procede a un desarrollo 3D del problema.

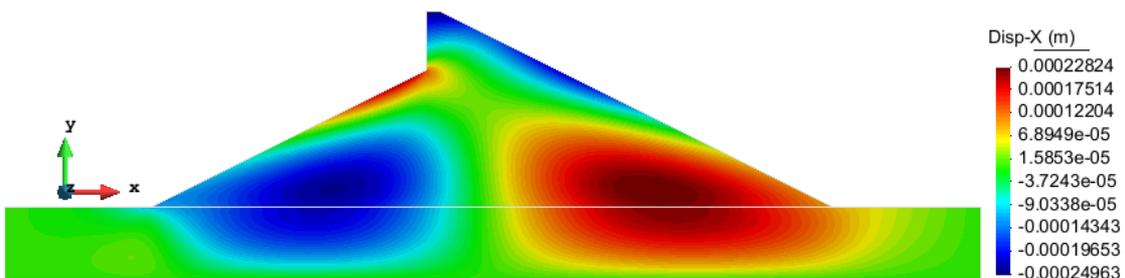


Figura 9. Desplazamientos horizontales. Peso propio y carga hidrostática

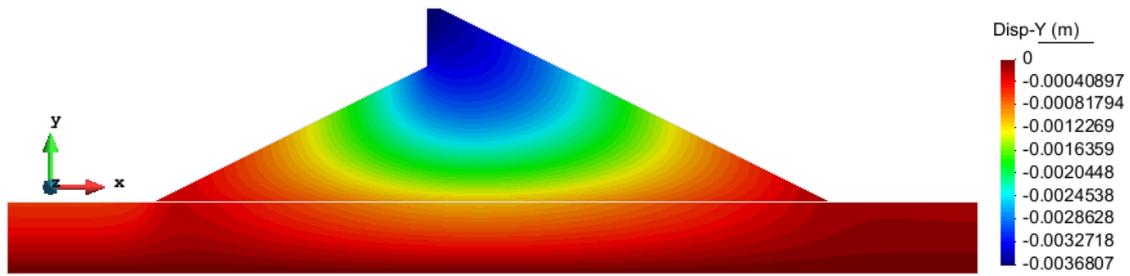


Figura 10. Desplazamientos verticales. Peso propio y carga hidrostática

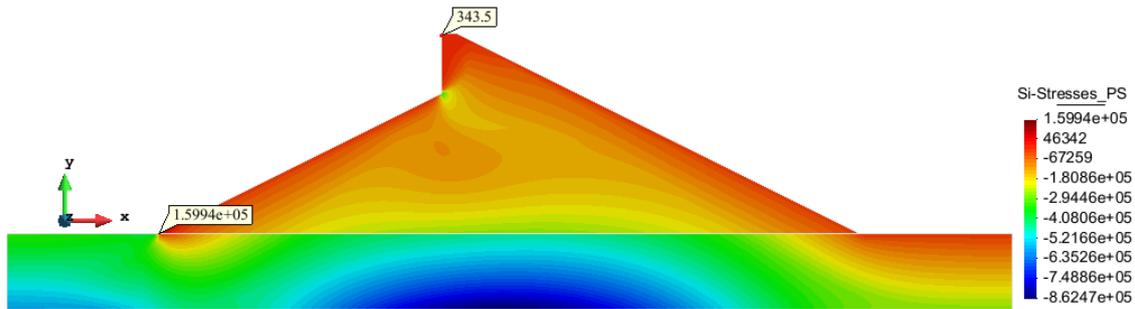


Figura 11. Tensiones principales mayores. Peso propio y carga hidrostática

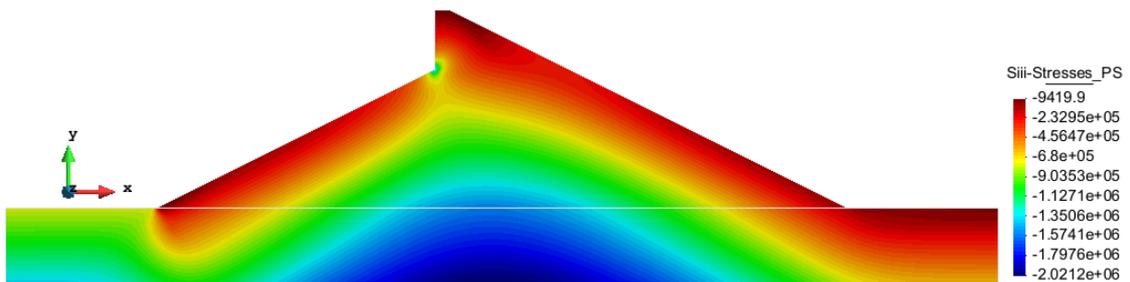


Figura 12. Tensiones principales menores. Peso propio y carga hidrostática

Modelado 3D

La versión 3D del problema se afronta bajo las hipótesis de sólido elástico lineal. De este modo puede tenerse una visión más clara del comportamiento de la estructura en puntos más cercanos al suelo.

El modelado de la presa en 3D requiere un proceso mayor que en el caso 2D, por lo que a continuación se detallarán los pasos seguidos para hacerlo. En primer lugar se ha generado una sección de terreno según la Figura 2 con los 30 metros de ancho, los cuales se han generado como un *offset* de la primera línea. La separación entre las dos paralelas se ha completado con una vertical, con un resultado que se muestra en la Figura 13. Esta sección se extruye y, paralelamente al terreno, se dibuja una sección de la presa, que también se extruye perpendicularmente al terreno. El resultado se muestra en la Figura 14.

Seguidamente, se intersecan ambos cuerpos y se definen los volúmenes separadamente del terreno y de la presa. Por conveniencia, se han separado ambos volúmenes en capas distintas para facilitar la visualización de resultados. La Figura 15 muestra un *render* del resultado final. Las condiciones de contorno se imponen equivalentemente al caso 2D: la superficie inferior del terreno tiene todos sus movimientos bloqueados y las secciones laterales no pueden moverse en la dirección del eje y.

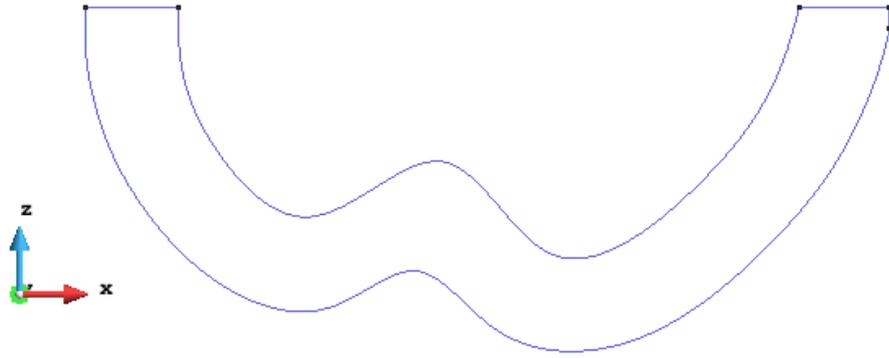


Figura 13. Sección de terreno

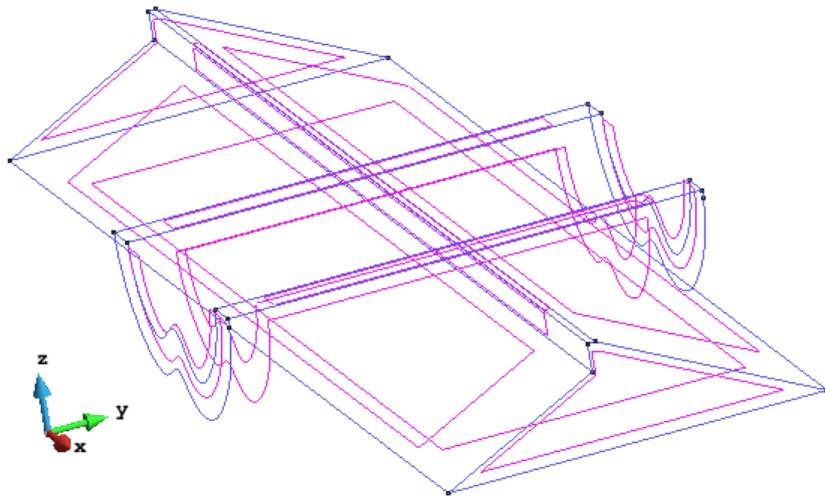


Figura 14. Figuras extruidas

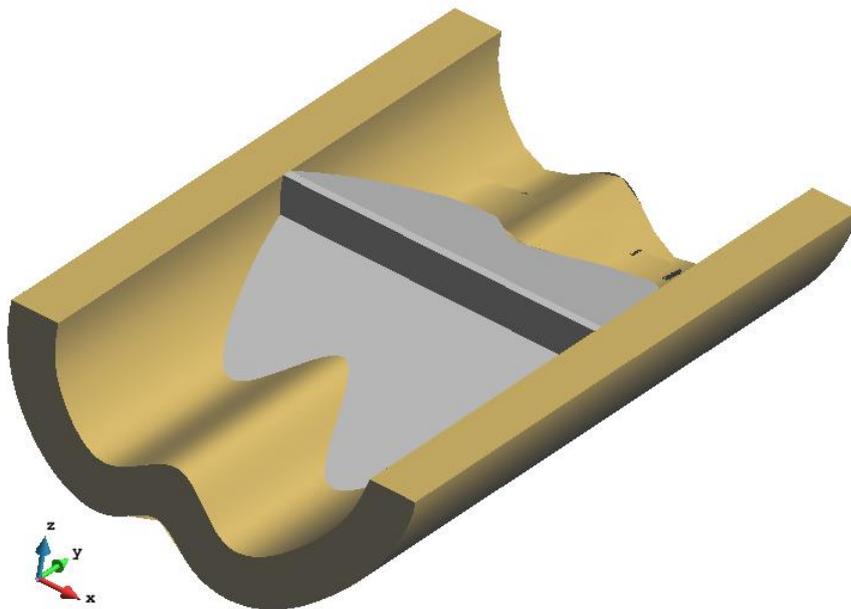


Figura 15. Render 3D del conjunto presa-terreno

La estructura se ha resuelto tanto para su peso propio como para éste más la carga hidrostática. Esta última se introduce como un grupo de cargas independiente al peso propio con cota de referencia 0.0 metros, que coincide con la parte alta de la presa, según el menú ya incorporado en RamSeries para definir este tipo de cargas. La aplicación de esta carga se ha hecho sobre superficies con la normal exterior.

En este informe se presentan únicamente los resultados relativos al segundo caso de carga, con el agua ya almacenada, al ser el único que ha demostrado problemas en el análisis bidimensional. Debido a que este análisis se realiza como suplemento al estudio en 2D y al incremento de la dimensión del problema, se malla la estructura en modo más grosero que en el caso bidimensional. Se usan elementos tetraédricos de 4 nodos y tamaño máximo de elemento de 11 en el terreno y 5 en la presa, sin un análisis de convergencia del mallado. No obstante, se ha comprobado para tener una idea de la precisión de la solución el desplazamiento máximo de esta malla con una que tiene tamaño máximo de 11 también para la presa, con una diferencia del 2.1% entre ellos.

La Figura 16 muestra la deformada tanto de la presa como del terreno. Como podría esperarse, los máximos desplazamientos están en la coronación de la presa, pero no en el centro de la misma, debido a que la geometría del terreno no es simétrica. Cabe decir que esta figura representa los desplazamientos totales. Para comparar con el caso 2D es necesario dar los valores del desplazamiento en z e y, que se muestran en las Figura 17 y Figura 18. Vemos que el comportamiento es similar en los casos 3D y 2D, con desplazamientos algo menores en 3D. La diferencia entre los desplazamientos verticales máximos es del 19%.

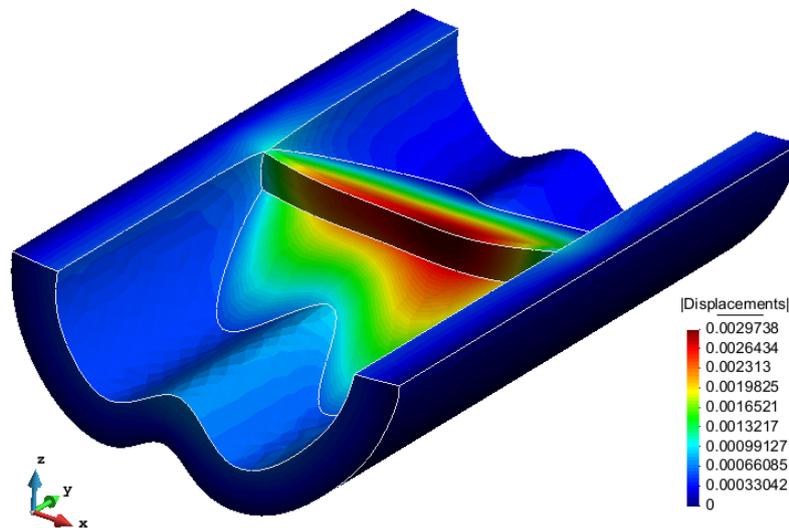


Figura 16. Deformada 3D de terreno y presa

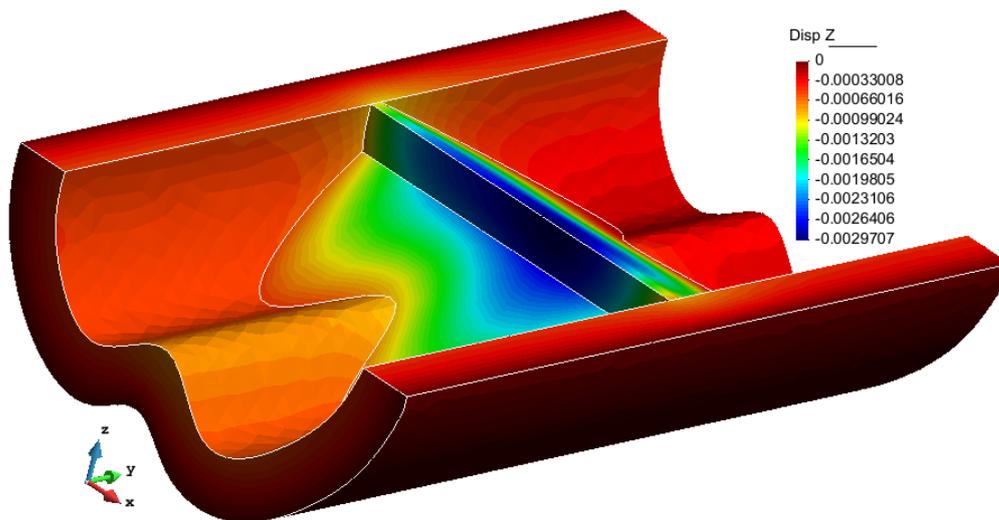


Figura 17. Desplazamientos verticales

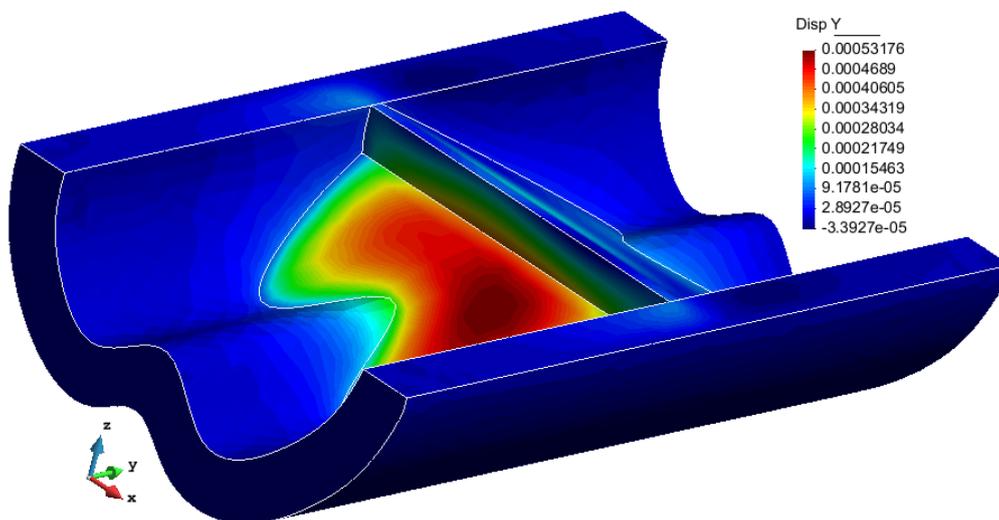


Figura 18. Desplazamientos en y

De mayor relevancia para el diseño son las tensiones en la presa. En primer lugar se muestran, en la Figura 19, las tensiones principales mayores, donde aparecen las mayores tracciones. Como se aprecia allí, éstas se dan en el terreno, aunque la presa también tiene zonas a tracción. Por este motivo, en la Figura 20 se elimina la capa del terreno para visualizar correctamente las de la presa, donde están las restricciones de diseño. Además, se marcan algunos valores que toman las tensiones cerca de la unión con el terreno. Se aprecia que se pasa de los 0.15 MPa en el modelo 2D a 0.8 MPa en el 3D. Sin embargo, sigue habiendo valores cercanos al 0.15 MPa en los puntos equivalente del modelo 3D, donde antes estaban las tracciones mayores. Se asume por tanto que este diseño no es apto para su ejecución. Los nuevos máximos del entorno de 0.8 MPa vuelven a aparecer en esquinas de contacto presa-terreno. Cabe preguntarse si estos valores son reales o se corresponden a concentraciones ficticias. Para comprobarlo, se ha diseñado una nueva presa, con el diseño más abundante en hormigón, que debería reducir esas tracciones.

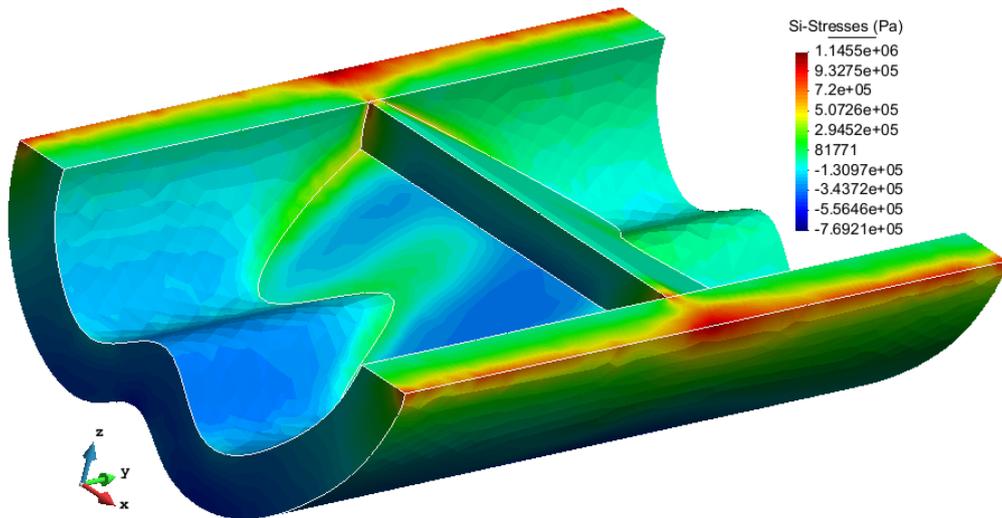


Figura 19. Tensiones principales mayores

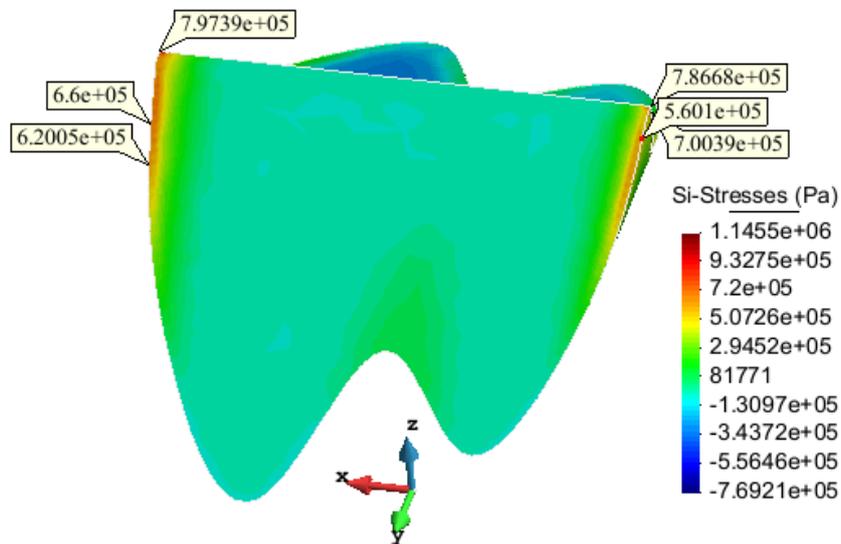


Figura 20. Tensiones principales mayores en la presa

Diseño más conservativo

Modelado 2D

La nueva propuesta de diseño cumple, respecto a los parámetros definidos en la Figura 1, que:

$$m = 4.0$$

$$n = 3.5$$

$$B = 0.1H$$

El resultado es una geometría como la que se muestra en la Figura 21. Se ha extendido el suelo 150 metros respecto a los extremos de la presa en lugar de los 60 metros del caso anterior, ya que el nuevo diseño es más largo. Se mantienen las mismas condiciones de contorno y propiedades del material que en el caso anterior, mientras que la malla cambia a tamaño 2 por no tener suficiente memoria el ordenador para mantener el tamaño 1 del diseño anterior.

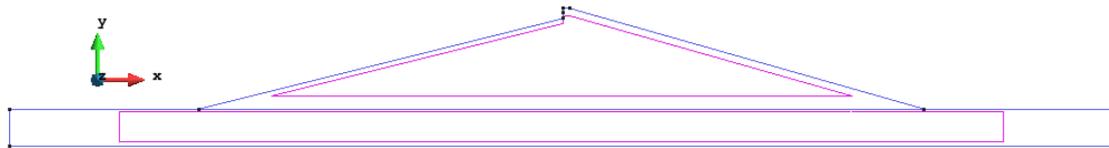


Figura 21. Geometría plana de la presa con el terreno

Comportamiento bajo peso propio

El nuevo diseño provoca mayores desplazamientos de la corona de la presa, como se ve en la Figura 22 para el desplazamiento vertical y en la Figura 23 para los horizontales. En cualquier caso, el orden de magnitud se mantiene en los pocos milímetros.

Respecto a las tensiones, centrándonos directamente en las principales mayores para estudiar tracciones, vemos en la Figura 24 que prácticamente no aparecen tracciones y que, en cualquier caso, éstas están fuera de la presa.

Comportamiento bajo peso propio y carga hidrostática

Los desplazamientos, como ya pasaba en el diseño anterior, no varían prácticamente cuando se añade la acción del agua. Sus componentes vertical y horizontal se muestran en las Figura 25 y Figura 26, respectivamente. Las tensiones principales mayores se muestran en la Figura 27. También en este caso se concentran las tensiones en el mismo punto que con el diseño anterior, alcanzando un valor de 0.1 MPa, aún lejos del límite de 0.01 MPa.

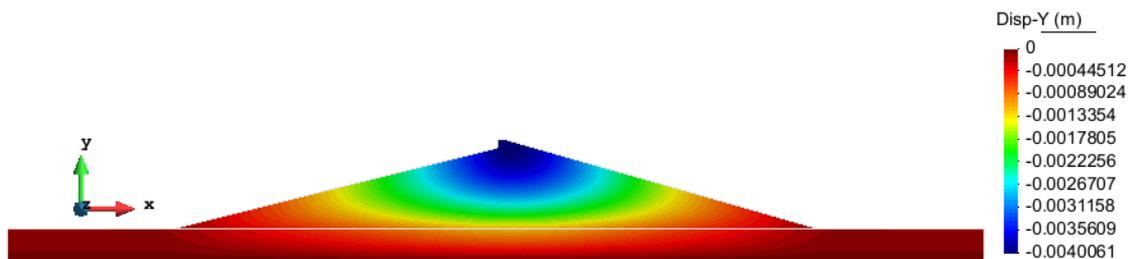


Figura 22. Desplazamientos verticales bajo el propio peso

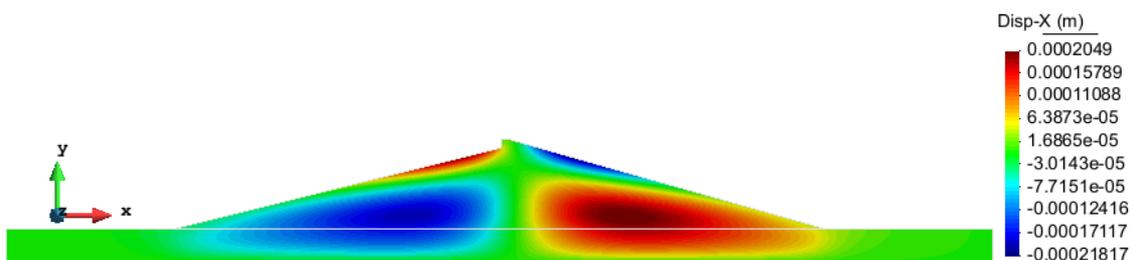


Figura 23. Desplazamientos horizontales bajo el propio peso

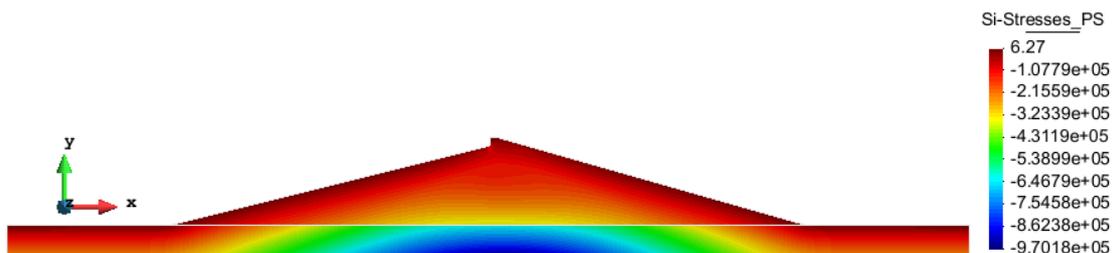


Figura 24. Tensiones principales mayores bajo peso propio

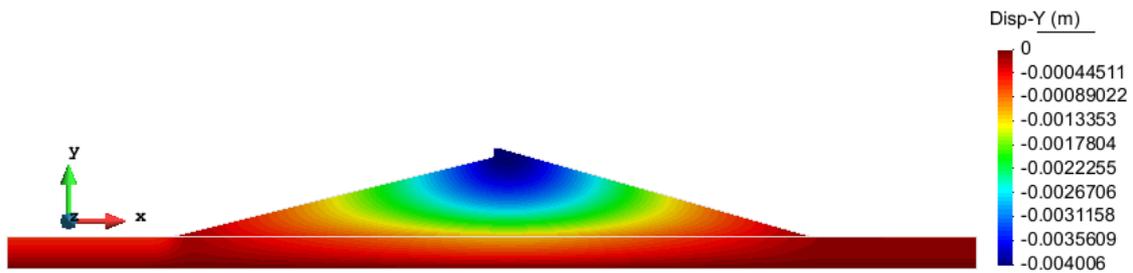


Figura 25. Desplazamientos verticales bajo el propio peso y carga hidrostática

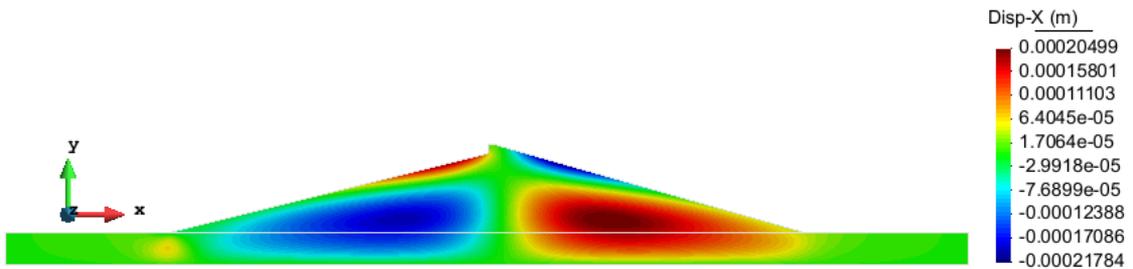


Figura 26. Desplazamientos horizontales bajo el propio peso y carga hidrostática

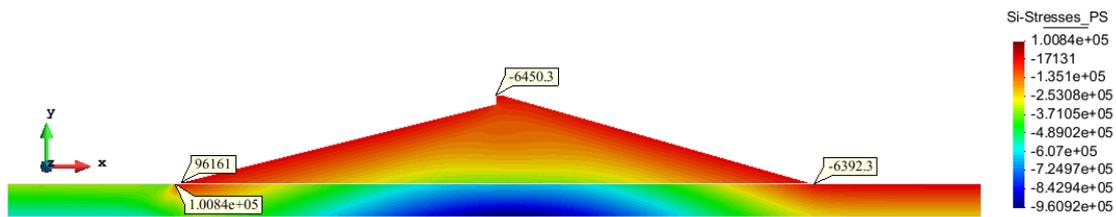


Figura 27. Tensiones principales mayores bajo el propio peso y carga hidrostática

Modelo 3D

Nuevamente es necesario ejecutar una simulación 3D del comportamiento de la presa al no haberse cumplido el requisito de las tracciones en el 2D. Este nuevo modelo se ha producido en modo del todo similar al del diseño anterior, siendo el resultado el mostrado en la Figura 28, por lo que nos centraremos únicamente en presentar los resultados cuando ya hay agua almacenada aguas arriba de la presa. En primer lugar, se muestra la deformada del conjunto presa-terreno en la Figura 29. Como ya pasaba antes, los desplazamientos son menores aquí que en el modelo 2D, aunque son consistentes en la distribución, con el máximo en la corona.

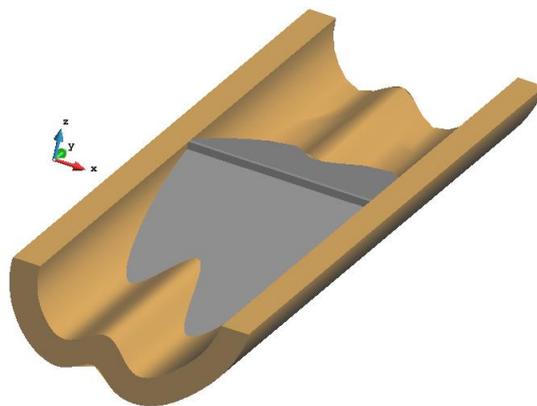


Figura 28. Render 3D del nuevo diseño

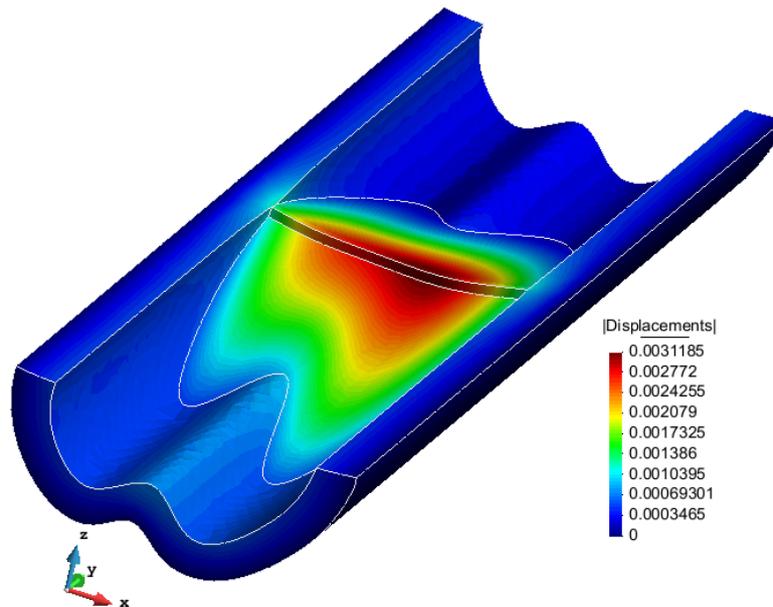


Figura 29. Deformada 3D de la estructura

Las mayores tracciones están en el terreno, como se aprecia en la Figura 30, por lo que es conveniente remover la correspondiente capa y centrarnos en la presa. La Figura 31 muestra en mayor detalle las tensiones principales mayores en la presa, con algunos puntos marcados para indicar zonas donde efectivamente se tienen tracciones. Como se aprecia allí, éstas aparecen únicamente en zonas de interacción suelo terreno y con grandes curvaturas o cambios de geometría. Hay dos zonas donde no se cumplen las restricciones de diseño en tracción: los hombros de la presa y la parte baja del centro, que ya estaba indicada en el modelo 2D. La magnitud de las mismas se ha reducido respecto al diseño anterior, pero el diseño más conservativo posible sigue sin eliminar las tracciones en la presa. Estos resultados se explican con mayor probabilidad porque efectivamente estas concentraciones son ficticias, lo cual es posible también para el primer diseño, más económico que éste.

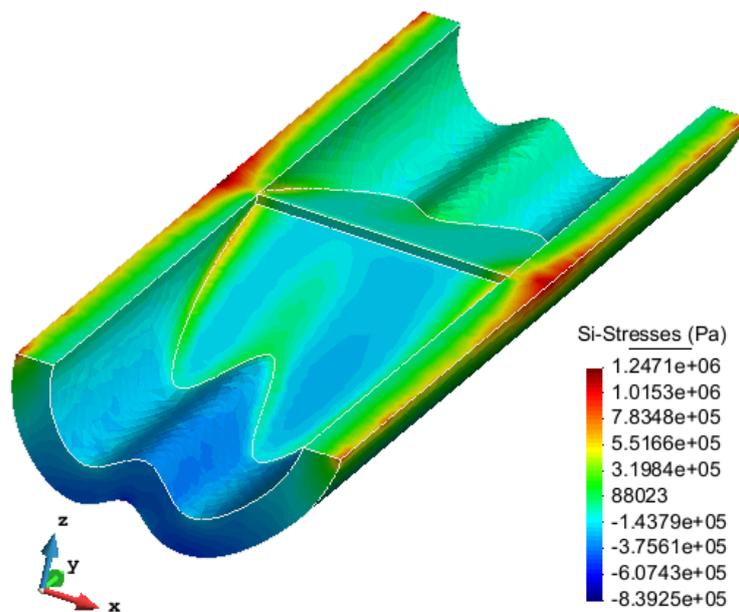


Figura 30. Tensiones principales mayores en presa y terreno

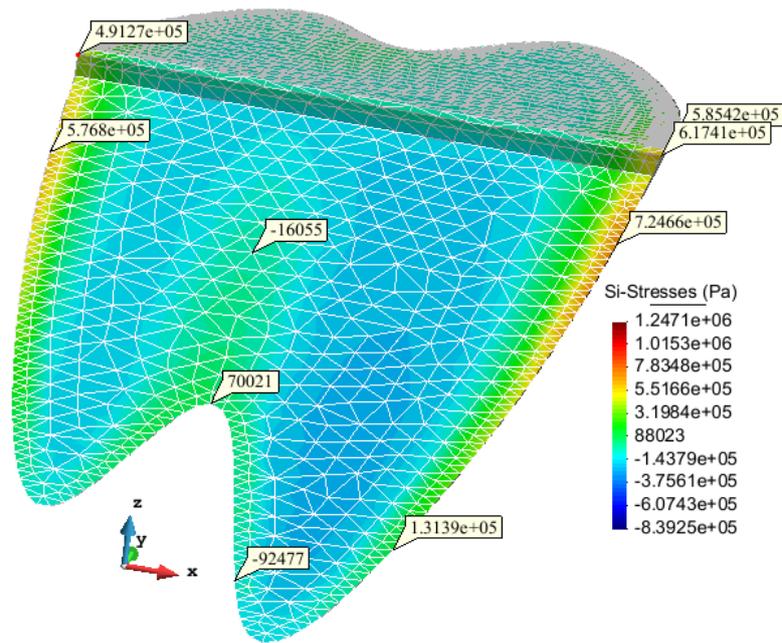


Figura 31. Detalle de las tensiones principales mayores en la presa

Conclusiones

Se ha visto en este informe la imposibilidad de satisfacer el requisito de tracción máxima en la presa con ninguno de los dos diseños planteados, siendo uno de ellos el más económico y el segundo el más conservador. Sin embargo, las tracciones aparecen solo puntualmente en los modelos 2D y mayormente en los hombros de la presa en los modelos 3D, lo que lleva a pensar que probablemente éstas sean concentraciones ficticias. En cualquier caso, dada la incerteza en la determinación de esas tracciones, se elige el diseño conservativo como el más adecuado por presentar tracciones menores que el diseño económico.

Hay que tener en cuenta también que los resultados obtenidos son únicamente para las cargas de gravedad e hidrostática. En ningún momento se ha tenido en cuenta el efecto térmico del fraguado del hormigón, que es de especial relevancia sobre todo en el diseño conservador, donde hay más hormigón. La inclusión del efecto térmico podría variar la distribución de tensiones en modo tal que este diseño no fuera el más atractivo.