



UNIVERSITAT POLITÈCNICA
DE CATALUNYA
BARCELONATECH

Ingeniería de estructuras

S-03

Presas de gravedad de materiales suelos con el núcleo de arcilla

JOSEP JUAN ARIMANY

47845140B

Máster en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos

25/01/2019

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	3
2. PROBLEMA.....	3
3. ANÁLISIS BIDIMENSIONAL.....	4
3.1. TIPO DE PROBLEMA.....	4
3.2. DEFINICIÓN DE LA GEOMETRÍA.....	5
3.3. CONDICIONES DE CONTORNO, CARGAS Y MATERIALES	6
3.4. MALLADO Y CÁLCULO DE LA ESTRUCTURA.....	7
3.5. RESULTADOS OBTENIDOS Y ANÁLISIS DE CONVERGENCIA.....	8
3.6. CASO 1: Peso propio.....	9
3.7. CASO 2: Peso propio + carga hidrostática.....	12
3.8. CONCLUSIONES.....	15
4. ANÁLISIS TRIDIMENSIONAL.....	16
4.1. TIPO DE PROBLEMA, ASPECTOS TEÓRICOS.....	16
4.2. DEFINICIÓN DE LA GEOMETRÍA.....	16
4.3. CONDICIONES DE CONTORNO, MATERIAL Y CARGAS.....	17
4.4. MALLADO Y CÁLCULO DE LA ESTRUCTURA.....	18
4.5. RESULTADOS OBTENIDOS.....	19
4.6. CASO 1: Peso propio.....	20
4.7. CASO 2: Peso propio + carga hidrostática.....	23
4.8. CONCLUSIONES	26
5. REFERENCIAS.....	26

1. INTRODUCCIÓN

El siguiente trabajo requiere poner en práctica los conocimientos adquiridos en el curso de Ingeniería de estructuras. Para ello aplicaremos el Método de los Elementos Finitos (MEF) para el cálculo de estructuras a través del software informático GID.

El MEF se basa en la discretización de la estructura a través de una malla de elementos finitos con una geometría y tamaño determinados y la posterior aplicación del Principio de Trabajos Virtuales para resolver el cálculo. De este modo se obtienen los desplazamientos, deformaciones y tensiones que experimenta la estructura frente a las condiciones de contorno y de carga a las que está sometida.

Durante el curso se ha estudiado la aplicación del MEF para distintas tipologías de estructuras como el análisis bidimensional con tensión y deformación plana, sólidos de revolución, análisis en 3D, vigas, placas, láminas, láminas de revolución y elementos compuestos, entre otros.

2. PROBLEMA

Este caso S-03 se basa en dimensionar y calcular una presa de gravedad de materiales sueltos de 60 m de altura con núcleo de arcilla, anchura en coronación de 6 m y las restricciones geométricas que se indican a continuación:

- Las tracciones máximas en cualquier punto de la presa no deben superar 0.25 MPa.
- El peso específico del terreno y el material de construcción es de 20000 N/m³.
- El Módulo de elasticidad del material a usar es de 9900 KN/m² y el coeficiente de poisson es de 0.285.
- El Módulo de elasticidad de la arcilla es de 8000 KN/m² y el coeficiente de poisson es de 0.4.
- Base empotrada en el terreno.
- Cimentación en terreno homogéneo. Módulo de elasticidad: 35 GN/m² y coeficiente de poisson 0.30.

Cargas actuantes:

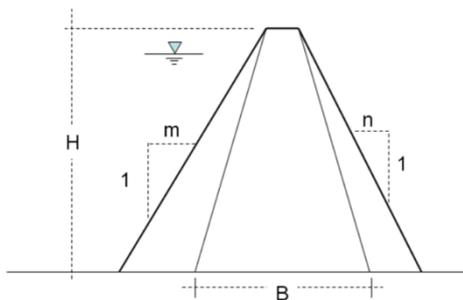
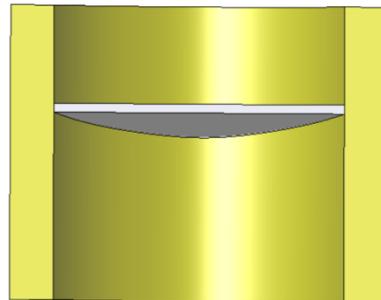
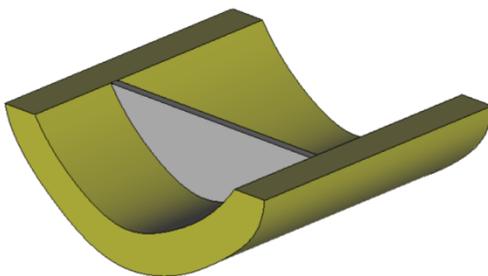
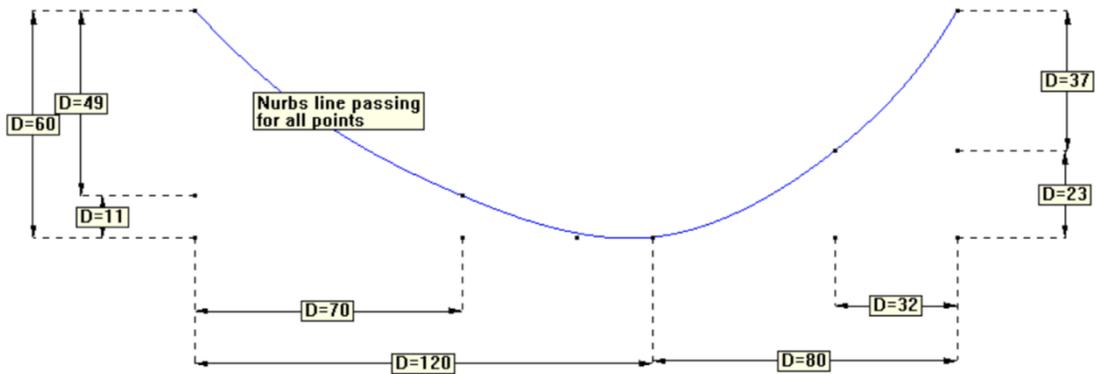
- Peso propio.
- Peso propio + empuje hidrostático en presa y cimentación (altura del agua 58 metros).

El proyecto se realiza mediante un análisis bidimensional y posteriormente en 3D.

La sección de terreno tiene un ancho de 30 metros y un desarrollo de 400 metros.

Para dimensionar la presa y calcularla con las pertinentes cargas, materiales y restricciones, vamos a hacer una suposición inicial de los parámetros de la geometría “m”, “n” y “B”, y iterativamente se irá verificando si se cumplen las restricciones de tracciones indicadas para los materiales de los taludes y del núcleo hasta encontrar la solución óptima para todos los parámetros.

El perfil del emplazamiento es el siguiente:



$$\begin{aligned} 1.5 < m < 2.0 \\ 1.5 < n < 2.0 \\ B > 0.3 H \end{aligned}$$

3. ANÁLISIS BIDIMENSIONAL

3.1. TIPO DE PROBLEMA

Utilizando el análisis bidimensional nos encontramos con un problema de deformación plana, puesto que una de sus dimensiones (longitud) es mucho mayor que las otras dos, y sobre ella actúan cargas uniformemente repartidas a lo largo de toda su longitud.

Bajo las hipótesis de deformación plana, la deformación en el sentido longitudinal se considera nula, de modo que el campo de desplazamientos en el eje Z es nulo. De este modo, los campos de desplazamientos, de deformaciones, y de tensiones para este problema son los siguientes:

$$u(x, y) = [u, v]^T$$

$$\varepsilon = [\varepsilon_x, \varepsilon_y, \gamma_{xy}]^T$$

$$\sigma = [\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}]^T$$

El hecho de analizar únicamente una sola sección supone una importante reducción del coste computacional. Para el cálculo se aplica el Principio de los Trabajos Virtuales:

$$\int \int_A \delta \boldsymbol{\varepsilon}^T \boldsymbol{\sigma} t dA = \int \int_A \delta \mathbf{u}^T \mathbf{b} t dA + \oint_l \delta \mathbf{u}^T \mathbf{t} t ds + \sum_i \delta \mathbf{u}_i^T \mathbf{q}_i$$

Donde A es la superficie del cuerpo sobre el que actúan las fuerzas de masa (b), de superficie (t) y puntuales (qi). Partiendo de esta base se pueden definir:

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{D} \boldsymbol{\varepsilon}$$

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & 0 \\ d_{21} & d_{22} & 0 \\ 0 & 0 & d_{33} \end{bmatrix}$$

$$d_{11} = d_{22} = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)}$$

$$d_{12} = d_{21} = d_{11} \frac{\nu}{1-\nu}$$

$$d_{33} = \frac{E}{2(1+\nu)} = G$$

Al tratarse de materiales isotropos, los coeficientes de la matriz constitutiva o de constantes elásticas se definen mediante el módulo de elasticidad (E) y el coeficiente de Poisson (ν). La reducción del número de componentes en los vectores de deformaciones y de tensiones respecto al problema tridimensional supone una importante reducción del coste computacional. El vector de tensiones definido es el de tensiones significativas, es decir, la que incluye las tensiones que realizan trabajo. Al ser nula la deformación respecto el eje z, así como las tangenciales que involucran a z (por la definición del campo de desplazamientos), las tensiones significativas son las mencionadas.

3.2. DEFINICIÓN DE LA GEOMETRÍA

Con las herramientas de dibujo del software GID, al ser un problema de deformación plana, seleccionaremos la aplicación Ramseries Educational 2D, Problem typePlane State, se dibuja la sección transversal de la presa, con las coordenadas de los puntos de referencia y uniéndolos mediante líneas.

Para ello debemos hacer la primera hipótesis para los taludes. Respetando las restricciones tomaremos: m=1,5; n=1,5; B=18.

Además para representar el terreno tomaremos un espesor de 30 m y un desarrollo de 400 m. La geometría obtenida es la siguiente:

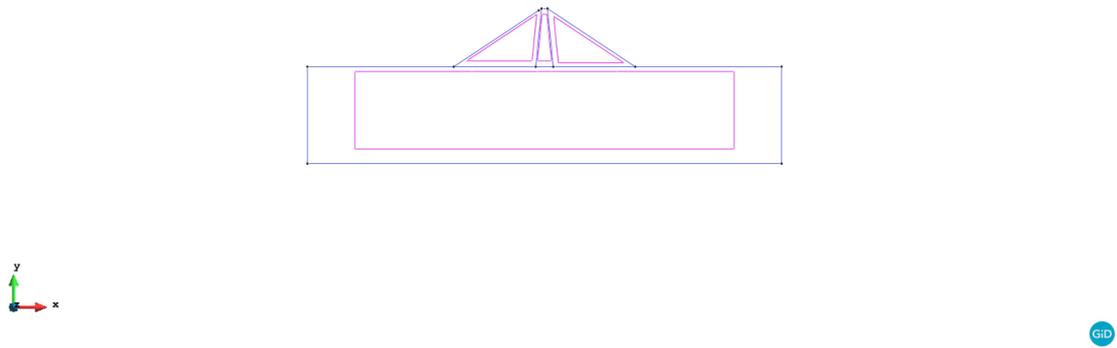


Figura 1. Definición de la geometría.

3.3. CONDICIONES DE CONTORNO, CARGAS Y MATERIALES

Una vez definido el tipo de problema como bidimensional y de deformación plana (Plane Strain), se introducen las condiciones de contorno: la base de la presa se encuentra empotrada en el terreno, por lo que restringimos los desplazamientos en ambas direcciones X, Y.

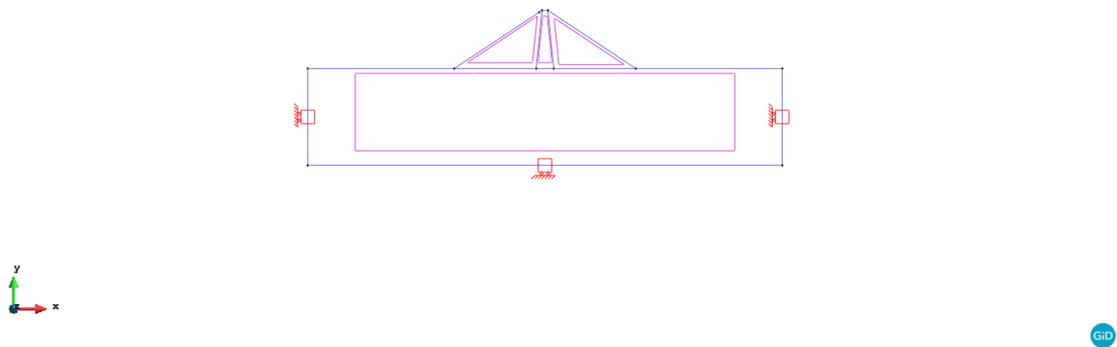


Figura 2. Condiciones de contorno

En lo que respecta a los materiales, el núcleo de la presa es de arcilla, y los espaldones de un material para construcción de presas. También nos son dados los parámetros del terreno con lo que podemos definirlo todo en el GID:

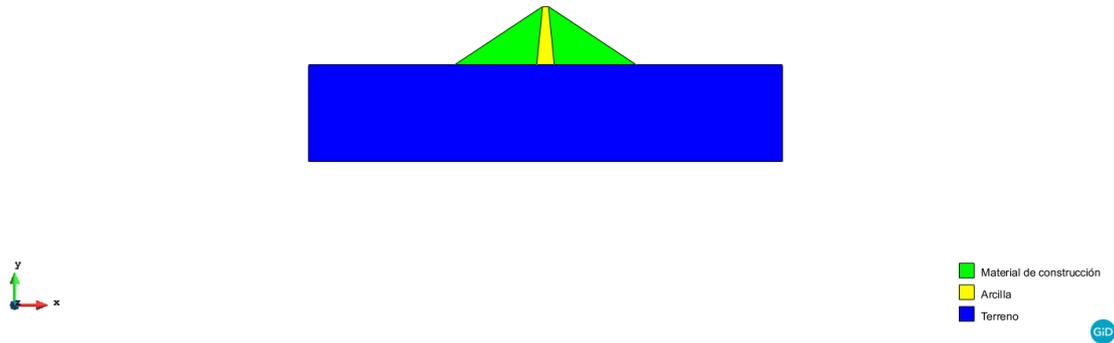


Figura 3. Materiales

Para las cargas, estudiamos dos casos distintos, en el primero solo consideraremos el peso propio de la presa, y en el segundo vamos a añadir la carga hidrostática del agua que consideramos uniforme en la dirección vertical y sobre el terreno, y lineal en la normal de la pared de la presa. El agua llega hasta los 58 metros de altura, dato a partir del cual calculamos el respectivo valor de la carga considerando peso propio del agua 10000 N/m^3 .

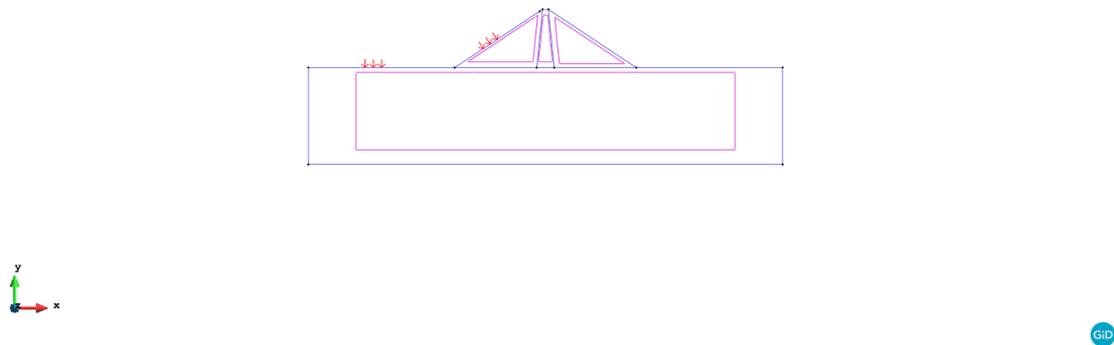


Figura 4. Carga hidrostática

3.4. MALLADO Y CÁLCULO DE LA ESTRUCTURA

Después de definir las condiciones en las que se encuentra la presa, se procede a la aplicación en sí del MEF. Para ello, se ha definido la malla con la que se discretiza la estructura y se realizan los cálculos. Con el fin de poder comparar resultados obtenidos y poder realizar un análisis posterior de su convergencia, se han realizado los cálculos con mallas de elementos triangulares de 3 nodos y de 6 nodos.

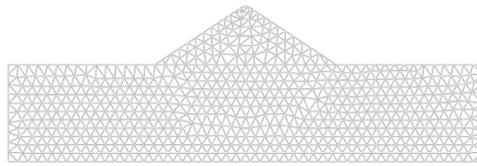


Figura 5. Mallado con elementos triangulares

3.5. RESULTADOS OBTENIDOS Y ANÁLISIS DE CONVERGENCIA

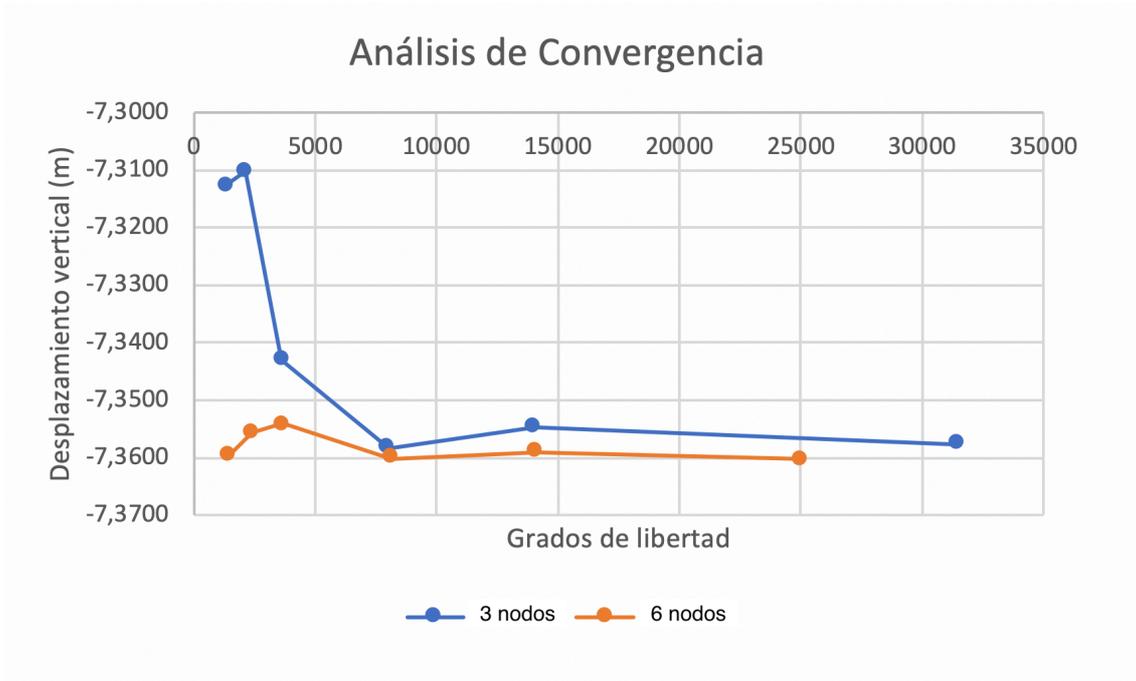
Después de realizar los cálculos con todas las mallas indicadas anteriormente y para el caso del empuje del agua, que es más restrictivo, se realiza el análisis de convergencia, con el fin de elegir cual es el elemento más adecuado para realizar los posteriores cálculos de la presa teniendo en cuenta la precisión de los resultados obtenidos frente al coste computacional que cuesta llegar a ellos. En este caso el análisis de convergencia se ha realizado tomando como variable de decisión el desplazamiento vertical de los elementos de la presa, dado que la convergencia en tensiones a menudo converge a resultados distintos dependiendo del tipo de malla, ya que se pueden dar puntos de acumulación de esfuerzos que nos hagan variar los resultados, por tanto, se consideraran los desplazamientos verticales, concretamente los máximos que se sitúan en la coronación de la presa.

- 3 nodos:

Tamaño	Elementos	Nodos	GL	Vmax
10	1215	671	1342	-7,3126
8	1958	1058	2116	-7,3102
6	3419	1812	3624	-7,3430
4	7720	4013	8026	-7,3583
3	13624	7014	14028	-7,3546
2	30818	15712	31424	-7,3576

- 6 nodos:

Tamaño	Elementos	Nodos	GL	Vmax
20	334	737	1474	-7,3595
15	554	1197	2394	-7,3557
12	863	1834	3668	-7,3541
8	1958	4073	8146	-7,3601
6	3419	7042	14084	-7,3590
4,5	6111	12490	24980	-7,3602



A partir de aproximadamente 4000 nodos la solución converge como vemos en el gráfico, por lo que nos quedamos con triángulos de 6 nodos (tamaño 8 con 1958 elementos, 4073 nodos y 8146 grados de libertad). Con el elemento seleccionado procedemos a calcular las tensiones en la presa, para ver si cumple los requisitos establecidos en el enunciado del problema: tracciones máximas en cualquier punto de la presa no deben superar 0.25 MPa.

3.6. CASO 1: Peso propio

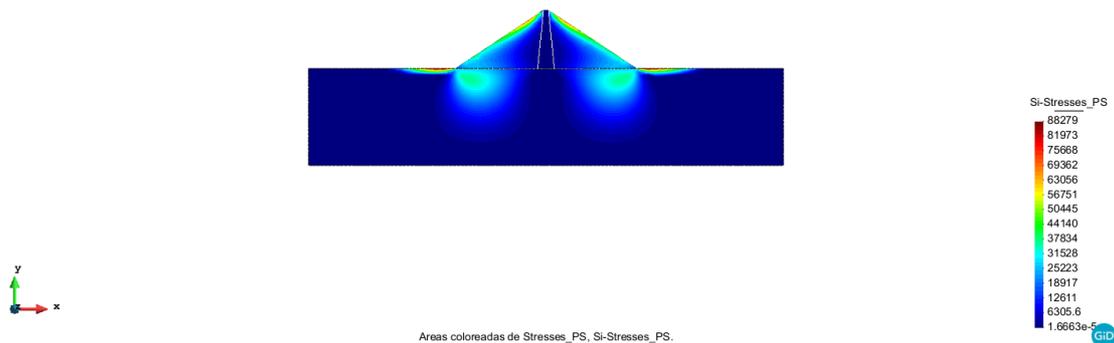


Figura 6. Tensiones Si

Una vez comprobado que las tracciones son menores a las establecidas como límite, damos como buena la geometría de la presa, mantenemos los taludes elegidos y además al haber elegido los de menor pendiente estamos utilizando la mínima cantidad posible de material.

El resto de resultados obtenidos son los siguientes:

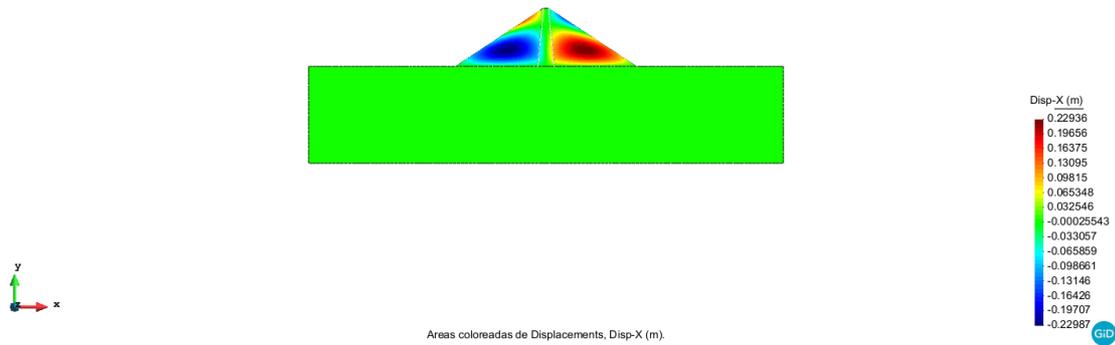


Figura 7. Desplazamientos Horizontales

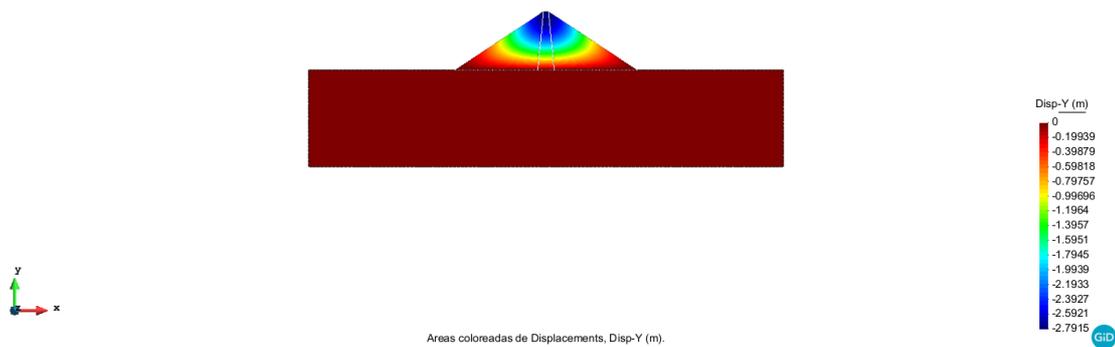


Figura 8. Desplazamientos Verticales

Observamos que los puntos que más asientan son los de la coronación, y que el terreno no sufre asentamiento, debido a su elevado módulo de Young y que en este primer caso solo se está considerando el peso propio.

Tensiones:

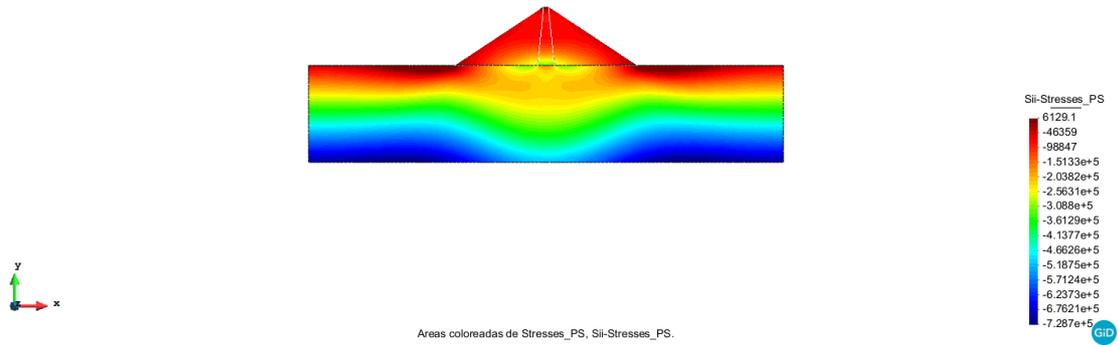


Figura 9. Tensiones Sii

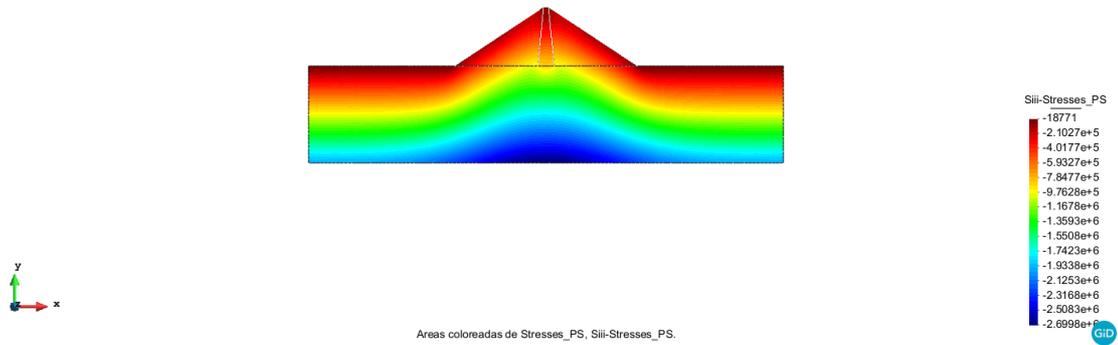


Figura 10. Tensiones Siii

Se observa que prácticamente toda la presa está a compresión.

3.7. CASO 2: Peso propio + carga hidrostática

Comprobamos nuevamente las tracciones para confirmar que los taludes elegidos también cumplen las restricciones:

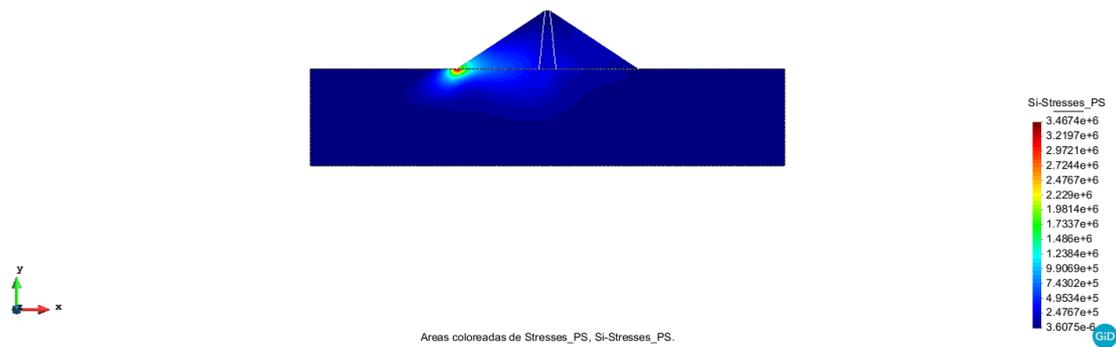


Figura 11. Tensiones Si

Efectivamente vuelven a cumplir los requisitos de tracciones máximas en todos los puntos de la presa. Por tanto, concluimos que el dimensionamiento es bueno con los taludes elegidos.

Desplazamientos:

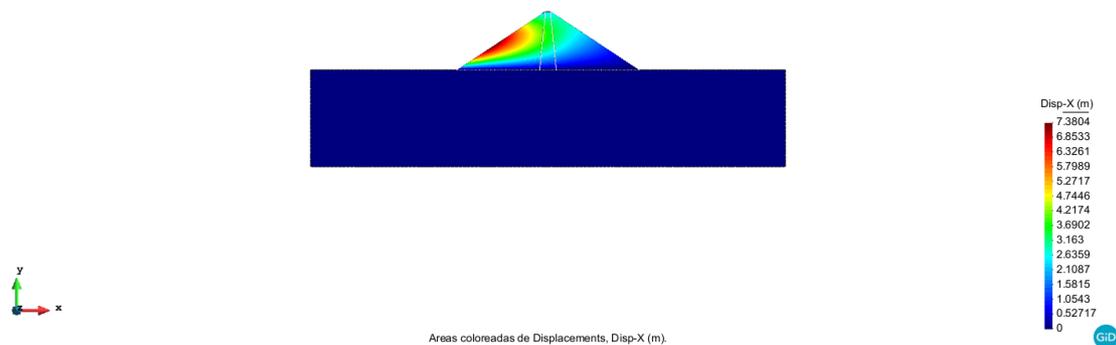


Figura 12. Desplazamientos Horizontales

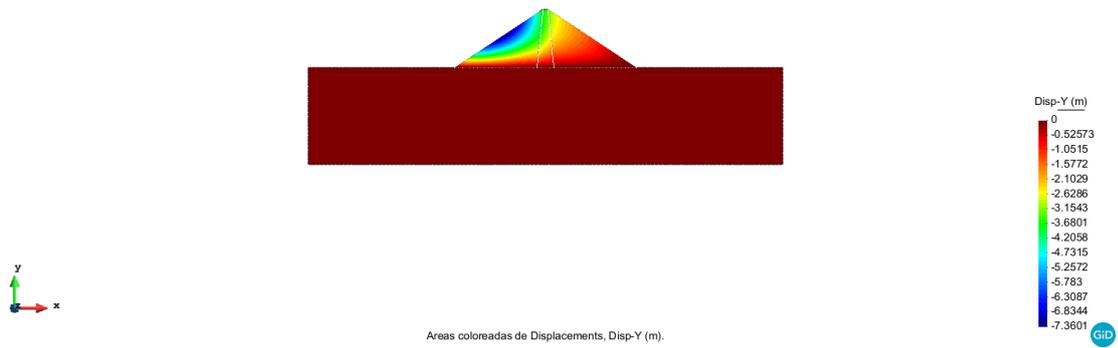


Figura 13. Desplazamientos Verticales

El resto de tensiones principales:

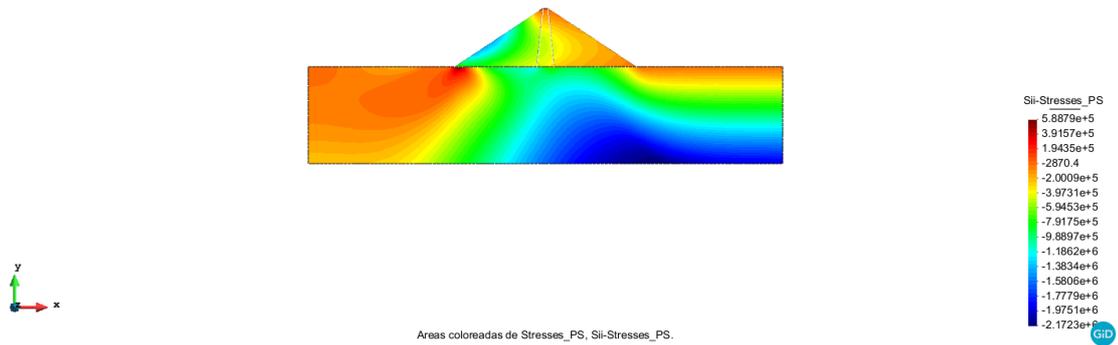


Figura 14. Tensiones Sii

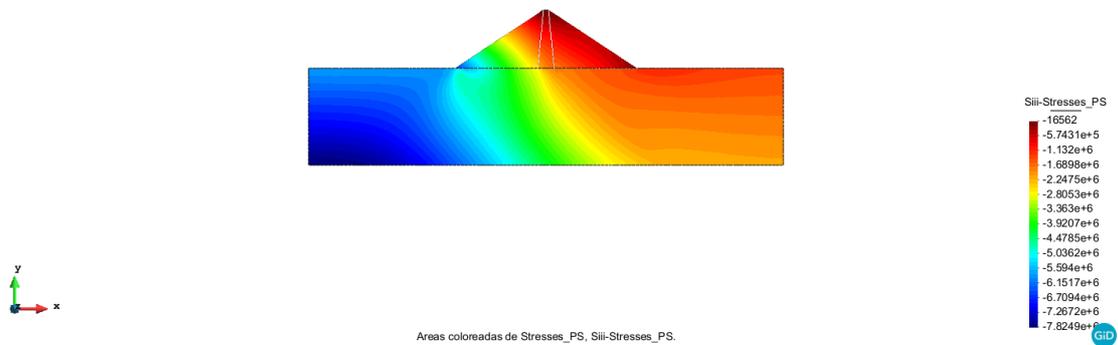


Figura 15. Tensiones Siii

Como se puede observar, cuando el embalse está lleno, el empuje del agua provoca que toda la presa esté en compresión, excepto en el punto de contacto con el terreno y algunas zonas aguas abajo. Este punto de contacto entre presa y terreno, representa una zona de acumulación de tensiones, y no es representativo a la hora de considerar los esfuerzos. A pesar de ello, la tensión generada en este punto sigue siendo inferior al máximo permitido de 0.25 Mpa, lo que nos indica que el dimensionamiento realizado de la presa es válido.

Los desplazamientos verticales máximos se dan en la zona inclinada aguas arriba, cerca de la base. Son algo superiores que en el caso inicial, sin embargo se trata de un desplazamiento ínfimo en relación a las dimensiones de la presa. Los desplazamientos horizontales máximos se experimentan en la misma zona, pero su magnitud es aún inferior.

Tal y como sucede en el caso anterior, las tensiones principales S_{ii} y S_{iii} máximas no se dan en la presa, sino en el terreno. Cómo es de suponer, la zona aguas arriba, al recibir el peso del agua, soporta tensiones más elevadas que la zona aguas abajo de la presa.

En cuanto a las tracciones máximas la situación es también similar a la del caso anterior. El valor máximo se focaliza justo en el apoyo entre la pendiente aguas arriba de la presa y el terreno.

En ambos casos, al concentrarse las tracciones máximas en puntos tan localizados, y justamente en una zona con cambios en la geometría, se puede presuponer que se tratará de puntos singulares. Para verificarlo se procede a refinar las mallas alrededor de estas zonas críticas y recalcular las tracciones máximas.

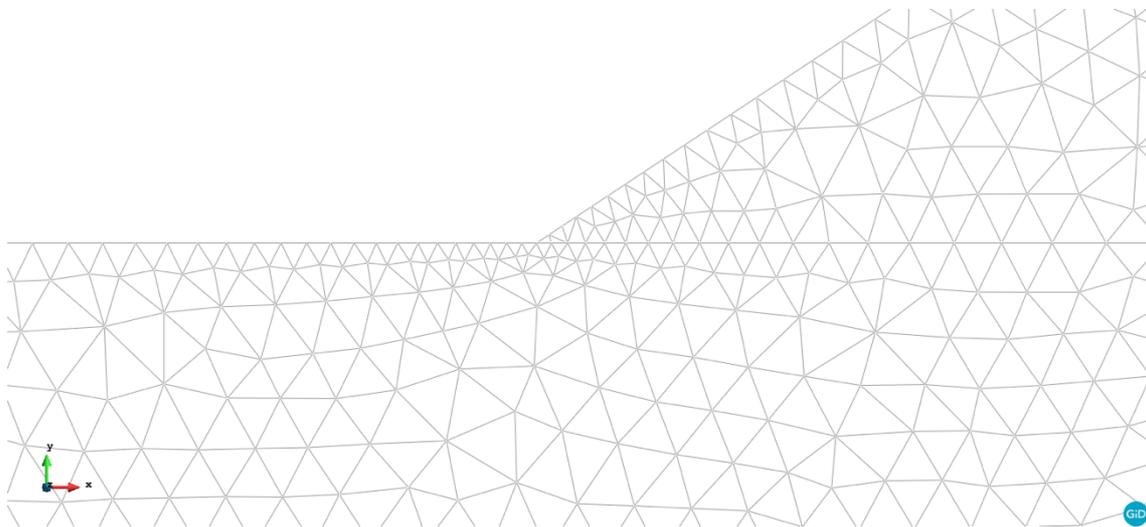


Figura 16. Malla más refinada alrededor del punto de tracciones máximas

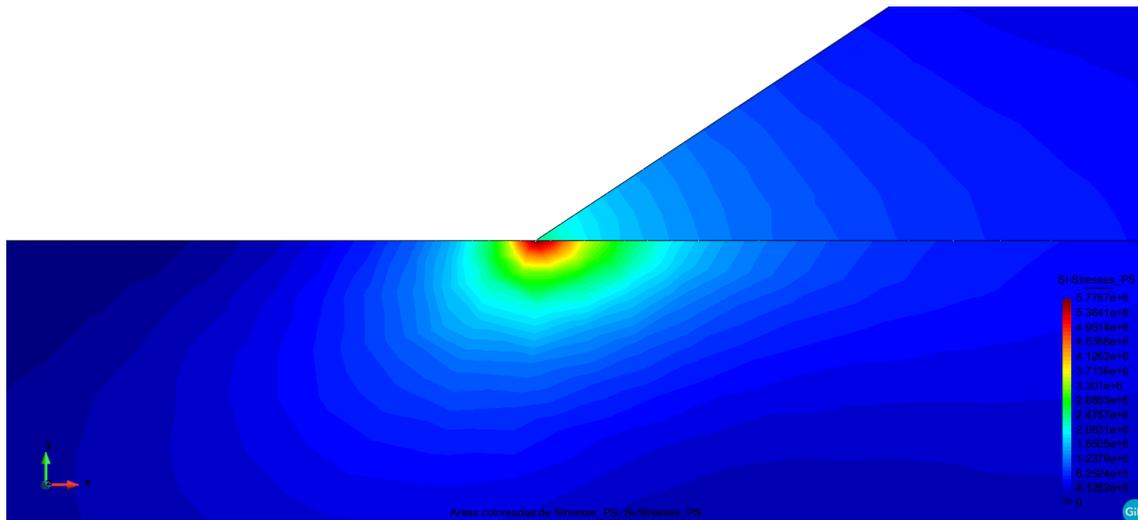


Figura 17. Tracciones bajo peso propio y empuje hidrostático con malla refinada

Se puede ver que con el uso de la malla refinada, la zona de grandes tracciones es aún más reducida. De este modo se puede confirmar que se tratan de puntos singulares.

3.8. CONCLUSIONES

Después de realizar los cálculos y analizar su convergencia, se han sacado las siguientes conclusiones relacionadas al análisis bidimensional de la presa:

- La tipología de malla que ofrece una mejor convergencia de los resultados es la malla de elementos triangulares de 6 nodos, tanto para el caso con carga hidrostática como sin ella.
- A causa de las propiedades del terreno, este apenas se deforma bajo las cargas impuestas, esto nos indica que podríamos realizar un mallado más simple para ahorrar coste computacional sin que esto influyera en los resultados.
- El análisis de convergencia es mejor realizarlo para desplazamientos, ya que proporciona un criterio más uniforme. Sin embargo, para las tensiones pueden no obtenerse resultados significativos, debido a la existencia de puntos en los que se acumulan esfuerzos.
- Se considera pues que, los taludes de $m=1,5$; $n=1,5$; $b=18$; son los definitivos para la presa, ya que con ellos se cumplen todas las restricciones prescritas en el problema bidimensional y además es la solución más económica puesto que es la que utiliza menos material.

4. ANÁLISIS TRIDIMENSIONAL

4.1. TIPO DE PROBLEMA, ASPECTOS TEÓRICOS

Teniendo en cuenta la presa propuesta en el enunciado, y cuyo dimensionamiento ya se ha realizado bidimensionalmente, se calcula ahora realizando el análisis tridimensional.

El procedimiento de análisis en 3D por el Método de Elementos Finitos es el mismo que en el caso bidimensional, pero en este caso, no se desprecia ninguna componente en los campos de deformación, lo que provoca un aumento en el tiempo de cálculo, ya que las matrices son mayores. Sin embargo, a efectos de la resolución del problema, esta variación apenas se notará, ya que la resolución no se lleva a cabo analíticamente, sino con el software GID, que permite obtener los resultados en poco tiempo.

Los campos de desplazamientos, deformaciones y tensiones para el análisis en 3D de la presa son los siguientes:

$$u(x, y, z) = [u, v, w]^T$$
$$\varepsilon = [\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \gamma_{xy}, \gamma_{xz}, \gamma_{yz}]^T$$
$$\sigma = [\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yz}]^T$$

4.2. DEFINICIÓN DE LA GEOMETRÍA

En el caso tridimensional, el procedimiento de definición de la geometría es mucho más complejo. También se han utilizado las herramientas de traza que incorpora GID. Los taludes elegidos para el dimensionamiento de la presa han sido los mismos que en el caso bidimensional ($m=1,5$; $n=1,5$; $B=18$).

El primer paso en la definición de la geometría ha consistido en realizar la traza del terreno, cuyo perfil se indica en el enunciado, y su posterior extrusión para darla la profundidad adecuada. En el enunciado se proponía un desarrollo de 400 metros, pero lo hemos aumentado unos metros para comprobar que las tensiones obtenidas en el terreno tuviesen el espacio adecuado para disiparse homogéneamente en él y así conocer su comportamiento de la forma más representativa posible.

Con el terreno trazado, se ha procedido a la introducción de la presa. Para ello, se ha dibujado a partir de la coronación en el extremo del terreno y posteriormente se ha extruido a lo largo hasta el otro extremo.

Posteriormente se ha procedido a realizar la intersección de la presa con el terreno, y finalmente se han creado las superficies y volúmenes para la presa y para el terreno, obteniéndose la siguiente geometría definitiva

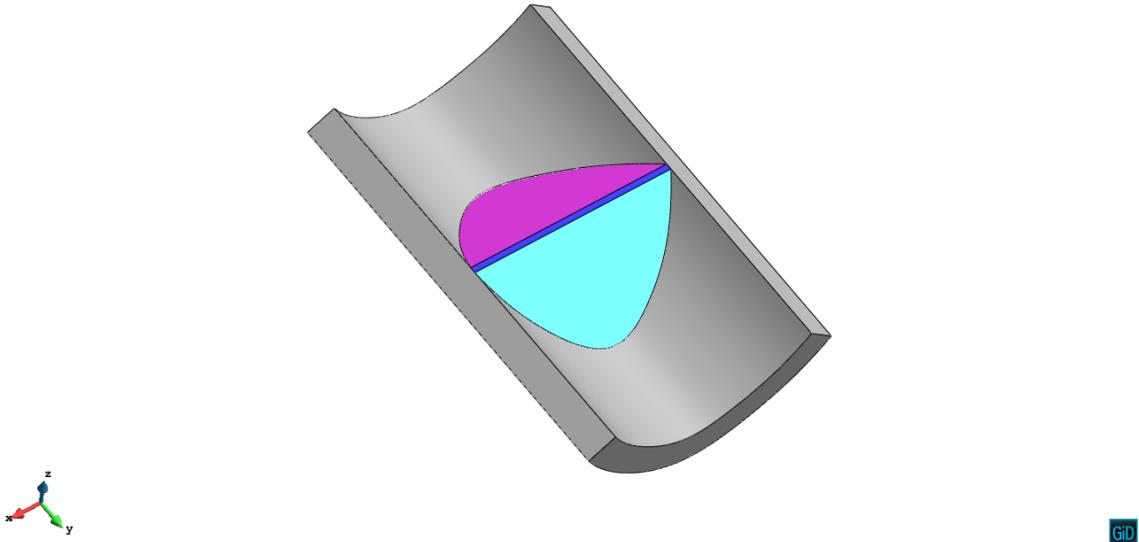


Figura 18. Renderizado final del problema

4.3. CONDICIONES DE CONTORNO, MATERIAL Y CARGAS

Como en el análisis bidimensional realizado, en primer lugar, se ha definido en el programa GID el tipo de problema a resolver. En este caso, al ser un problema en SD, se activa la aplicación de Ramses Educational 3D.

Condiciones de contorno: Las condiciones de contorno son las mismas que en la resolución del caso bidimensional (base del terreno empotrado, y movimiento horizontal impedido en los contornos laterales del dominio):

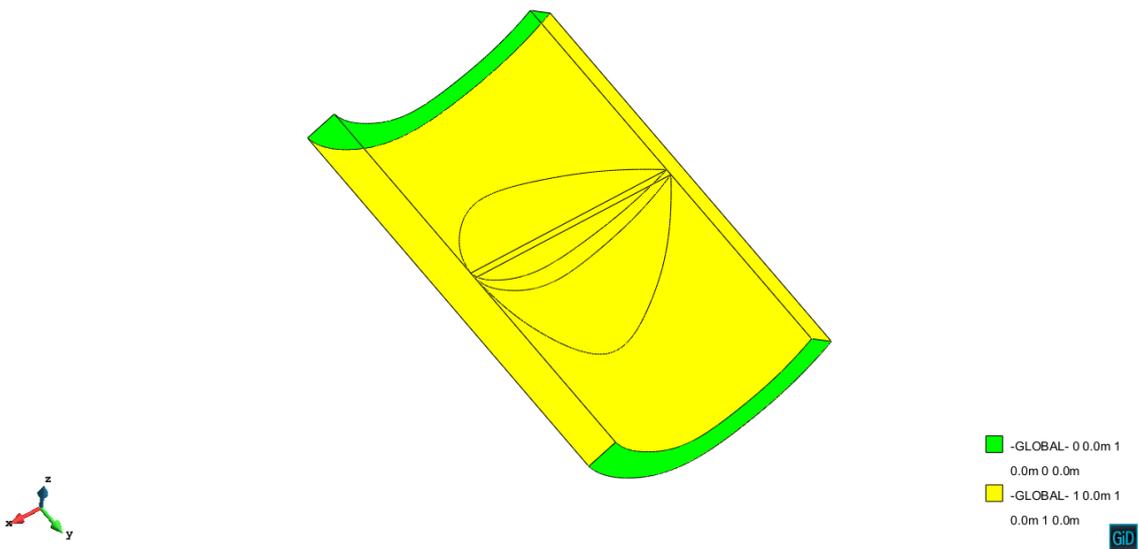


Figura 19. Condiciones de contorno en el terreno

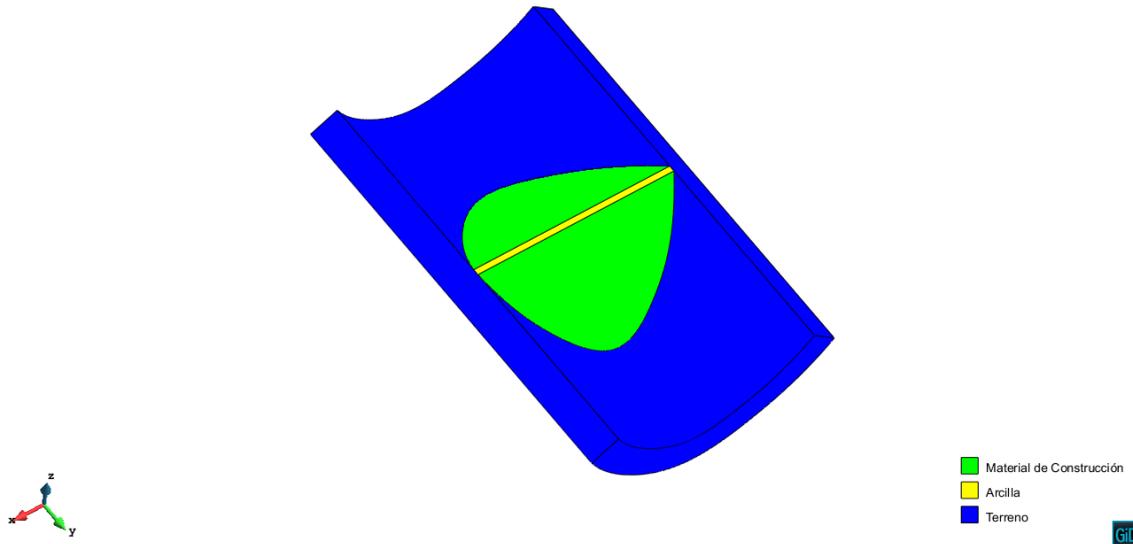


Figura 20. Materiales

Material: Los parámetros del material de construcción de la presa, de la arcilla y del terreno son los mismos que para el caso de análisis bidimensional, indicados anteriormente.

Cargas: Se han realizado los cálculos, como en el análisis bidimensional, para los dos casos de carga propuestos en el enunciado

1. Peso Propio
2. Peso propio + carga hidrostática del agua

Para considerar el peso propio de la estructura en los cálculos, se ha configurado la opción en GID a través del menú Problem Data.

El cálculo de la carga hidrostática del agua se realiza automáticamente con el programa GID (no es necesario configurar la sobrecarga repartida en el terreno y la lineal sobre la presa), indicándole que actúa dicha carga y el contorno donde lo hace. Así, se ha asignado la aplicación de esta carga en la zona que queda aguas arriba de la presa.

4.4. MALLADO Y CÁLCULO DE LA ESTRUCTURA

En el análisis en 3D, los elementos con los que se discretiza el elemento no son planos, sino que forman volúmenes. Se ha intentado mantener la analogía de la tipología de elementos utilizado en el caso bidimensional, con el fin de comparar los resultados obtenidos para diferentes tipologías de elementos.

Sin embargo, no ha sido posible discretizar la estructura con elementos hexaédricos (analogía de los cuadriláteros) ya que el programa GID lo impedía. Esto se debe a la geometría irregular que tiene el terreno en 3D, que no permite definir una malla correctamente con este tipo de elementos y solo nos permite trabajar con tetraedros.

Así pues, el análisis lo hemos realizado con tetraedros, variando el tamaño de los elementos.

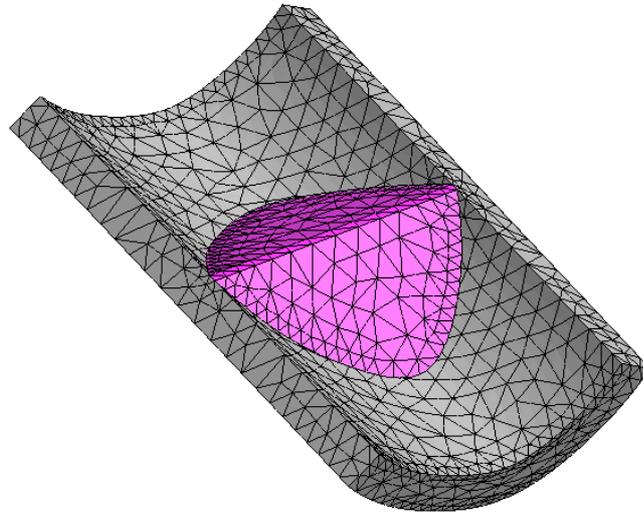


Figura 21. Mallado

Finalmente, se ha decidido trabajar con 17808 elementos con 4142 nodos y 12426 Grados de Libertad. Además, la malla está refinada en la zona de contacto entre la presa y el terreno con el fin de obtener unos mejores resultados.

4.5. RESULTADOS OBTENIDOS

Se presentan a continuación los resultados obtenidos después de realizar los cálculos con las mallas de elementos tetraédricos indicadas anteriormente. Como en el análisis bidimensional realizado, se han obtenido resultados de desplazamientos y de tracciones máximas, con el fin de poder analizar posteriormente su convergencia y elegir la malla más representativa.

4.6. CASO 1: Peso propio

Desplazamientos en las distintas direcciones:

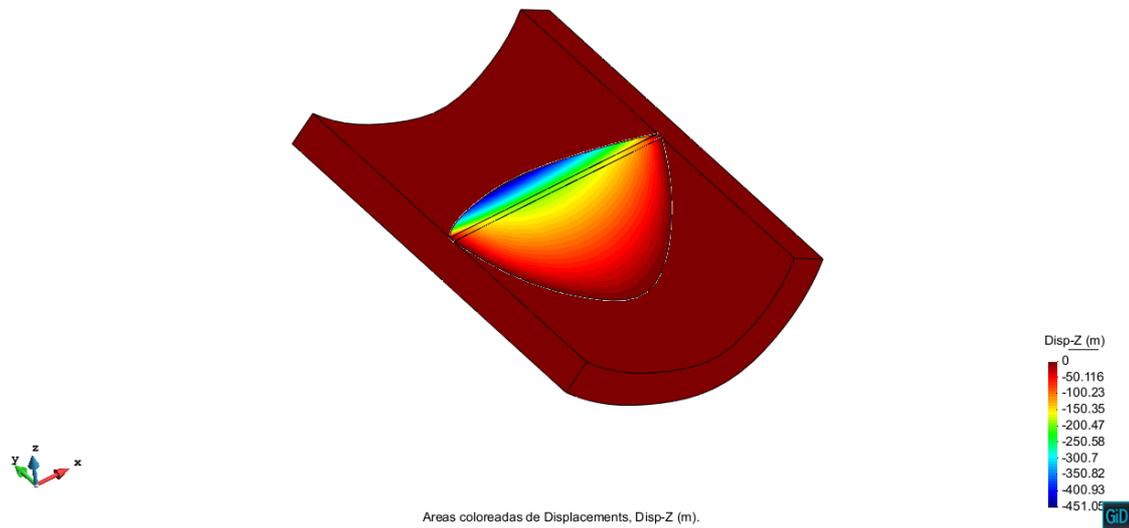


Figura 22. Desplazamientos Verticales

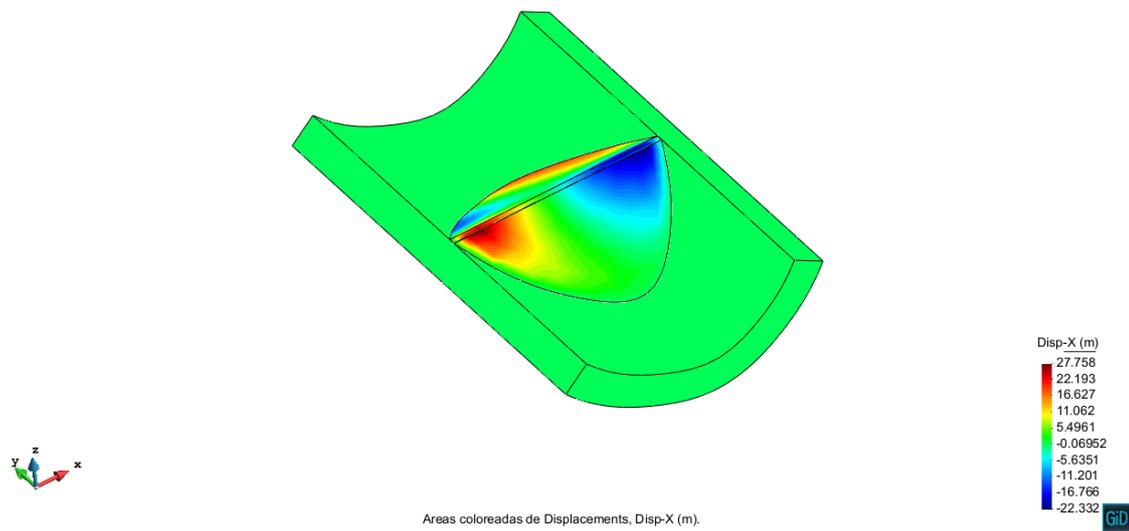


Figura 23. Desplazamientos en X de los puntos

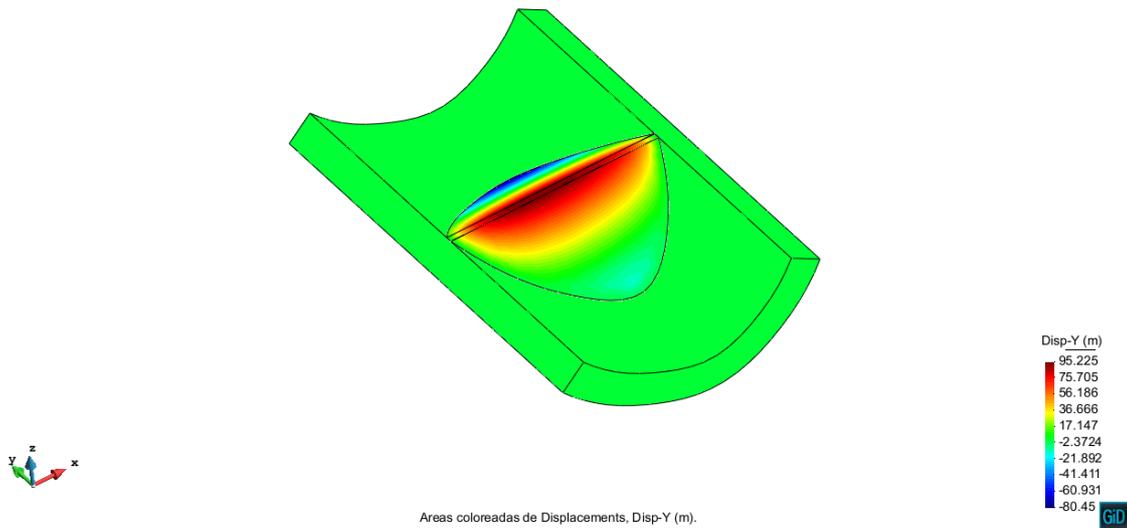


Figura 24. Desplazamientos en Y de los puntos

Observamos que, el punto de desplazamiento máximo de la presa se da en la coronación, lo que coincide con los resultados obtenidos en el caso bidimensional. Las tensiones en los puntos equivalentes al caso bidimensional también son parecidas, lo que nos es útil para confirmar que el orden de magnitud de los resultados es el adecuado y que por tanto se está trabajando bien.

Tensiones en las direcciones principales:

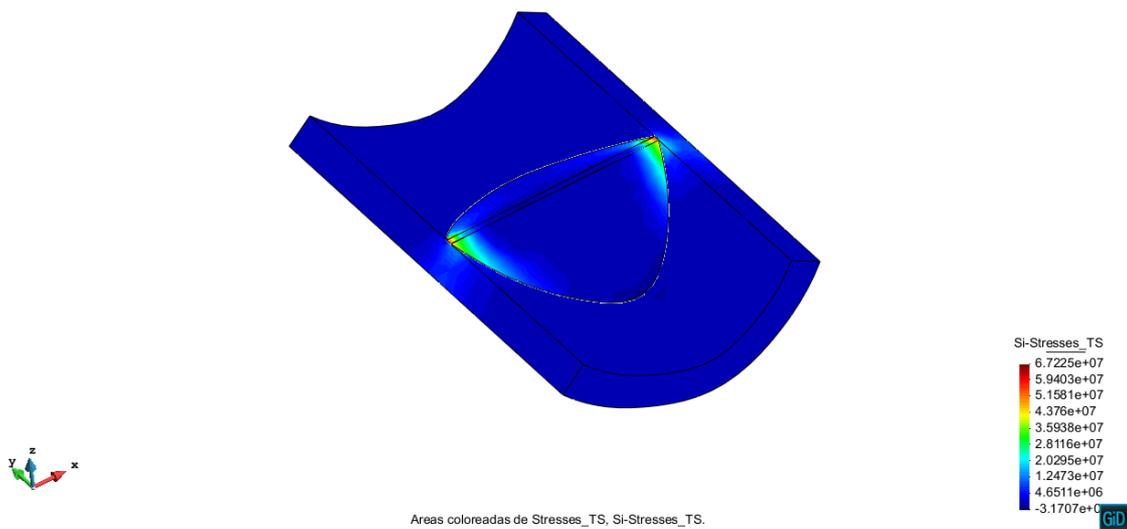


Figura 25. Tracciones en la presa considerando peso propio

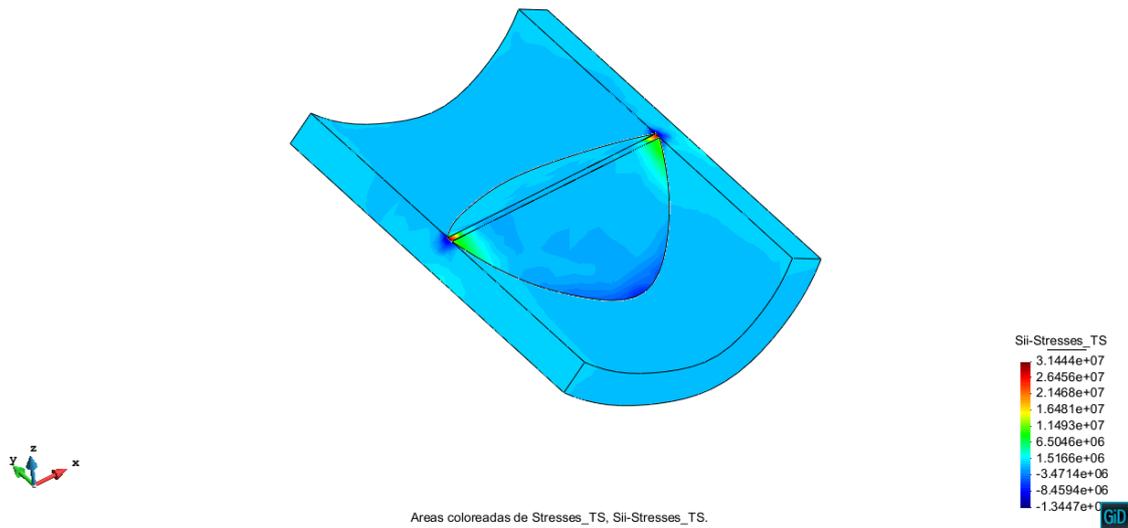


Figura 26. Tensiones Sii

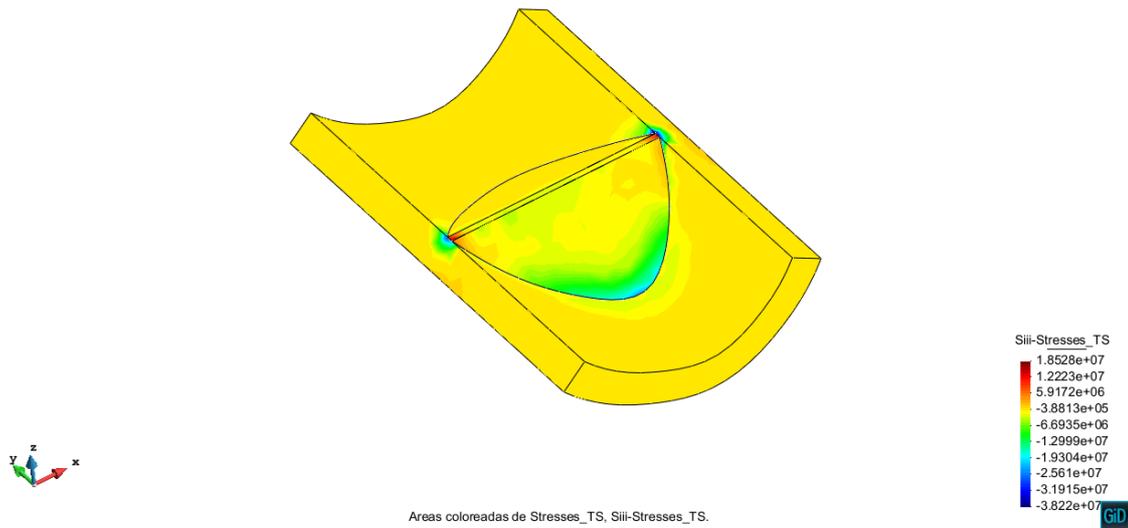


Figura 27. Tensiones Siii

Por otro lado, en relación a la imagen referente a las tracciones experimentadas en la presa, se observa que, como en el caso bidimensional, los puntos de máximas tracciones se dan en la junta de la presa y el terreno, siendo este un punto claro de acumulación de tensiones, que se podría despreciar a la hora de realizar los cálculos estructurales.

4.7. CASO 2: Peso propio + carga hidrostática

Cuando consideramos además el efecto del agua:

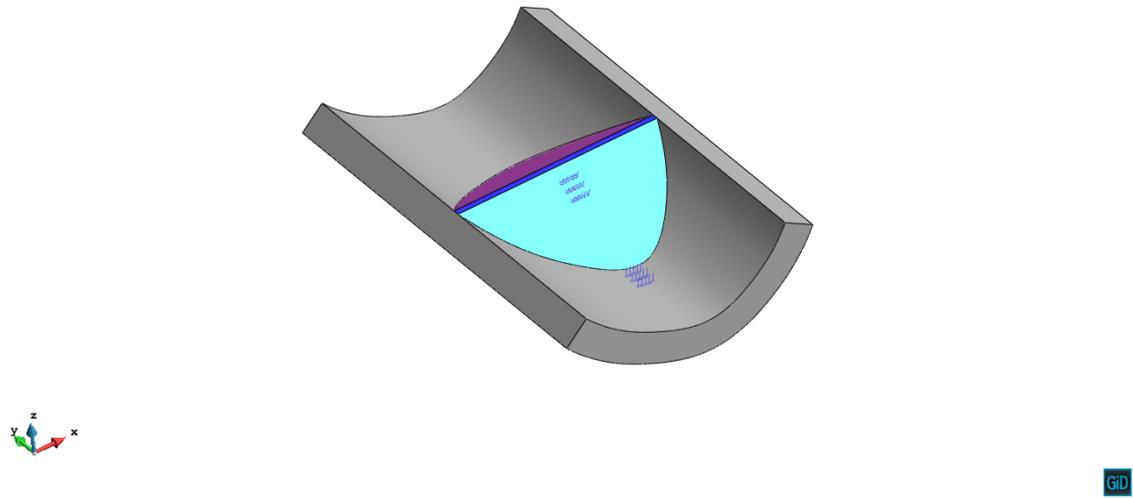


Figura 28. Renderizado con el empuje hidrostático

Desplazamientos en las distintas direcciones:

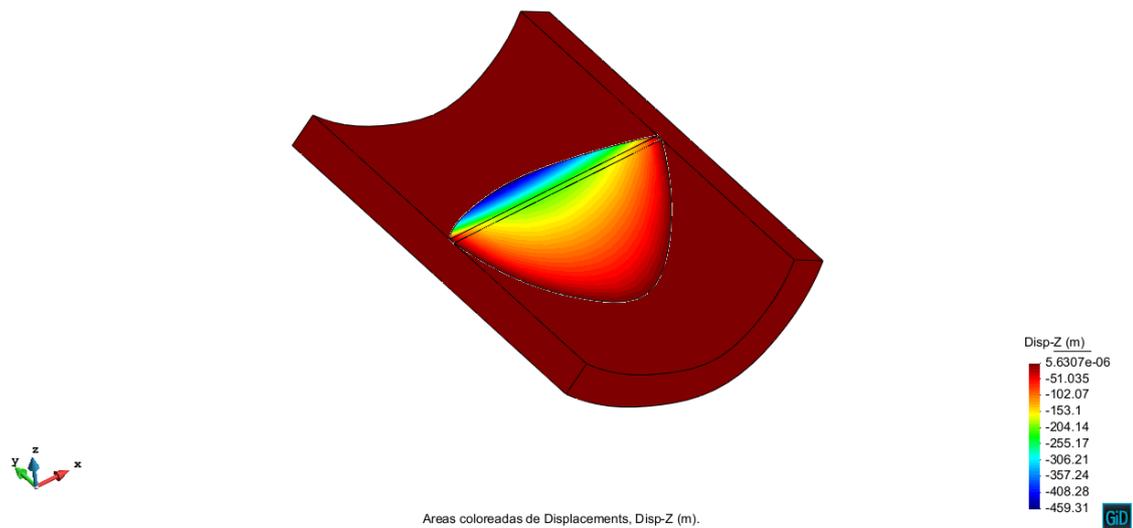


Figura 29. Desplazamientos Verticales

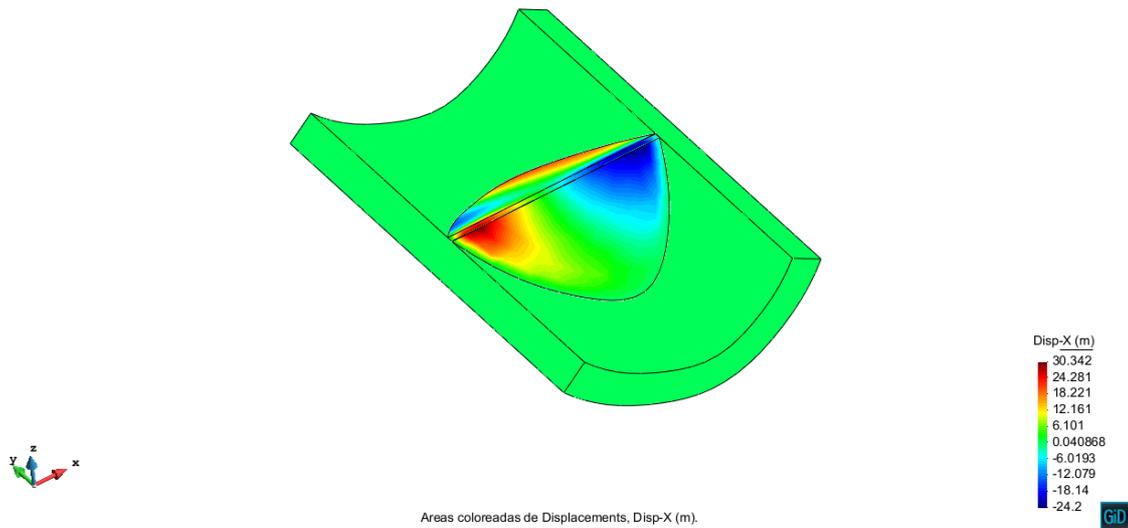


Figura 30. Desplazamientos en X de los puntos

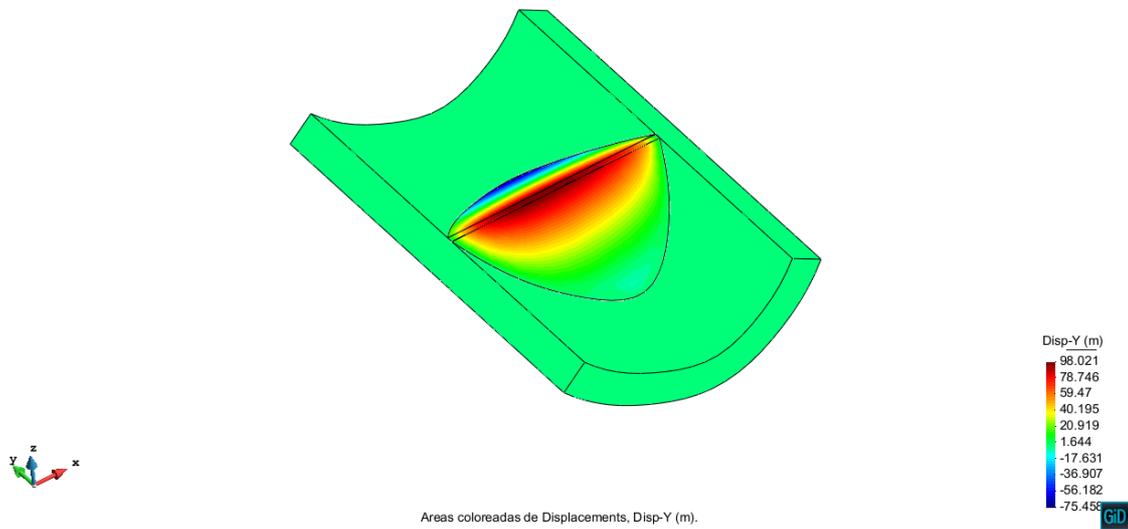


Figura 31. Desplazamientos en Y de los puntos

Observamos que, el punto de desplazamiento máximo de la presa se da en la coronación, lo que coincide con los resultados obtenidos en el caso bidimensional. Las tensiones en los puntos equivalentes al caso bidimensional también son parecidas, lo que nos es útil para confirmar que el orden de magnitud de los resultados es el adecuado y que por tanto se está trabajando bien.

Tensiones en las direcciones principales:

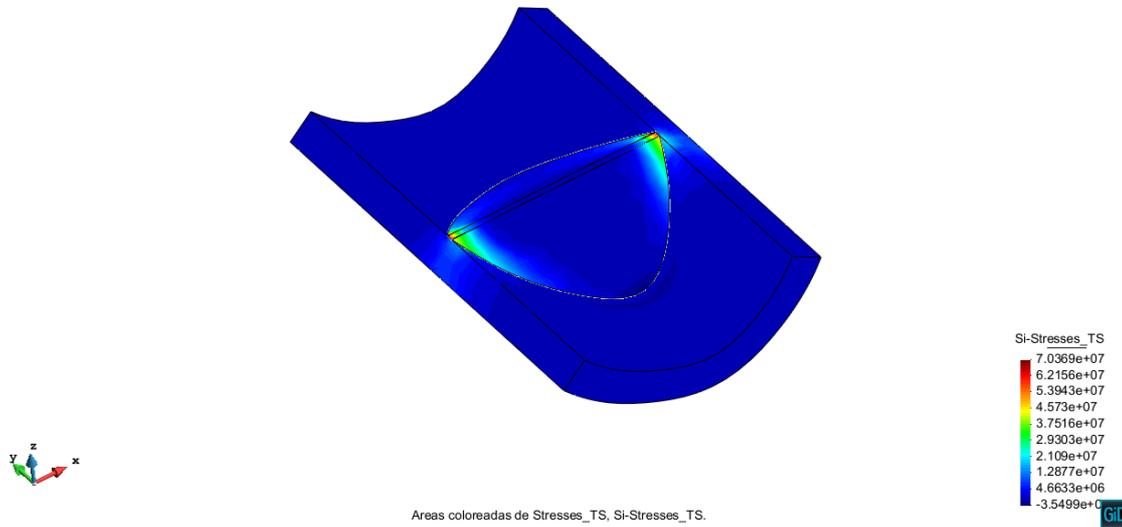


Figura 32. Tracciones en la presa considerando peso propio + carga hidrostática

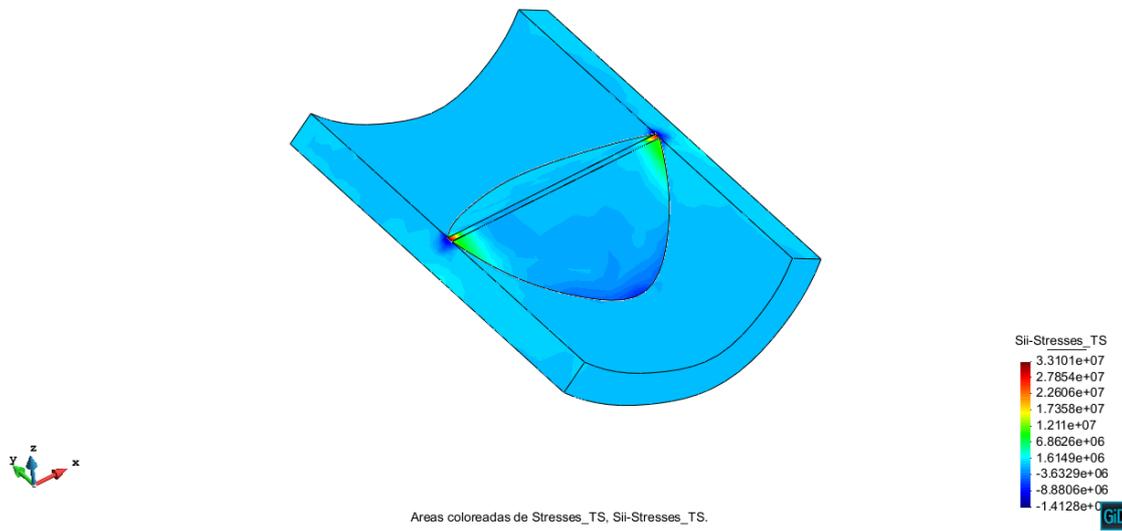


Figura 33. Tensiones Sii

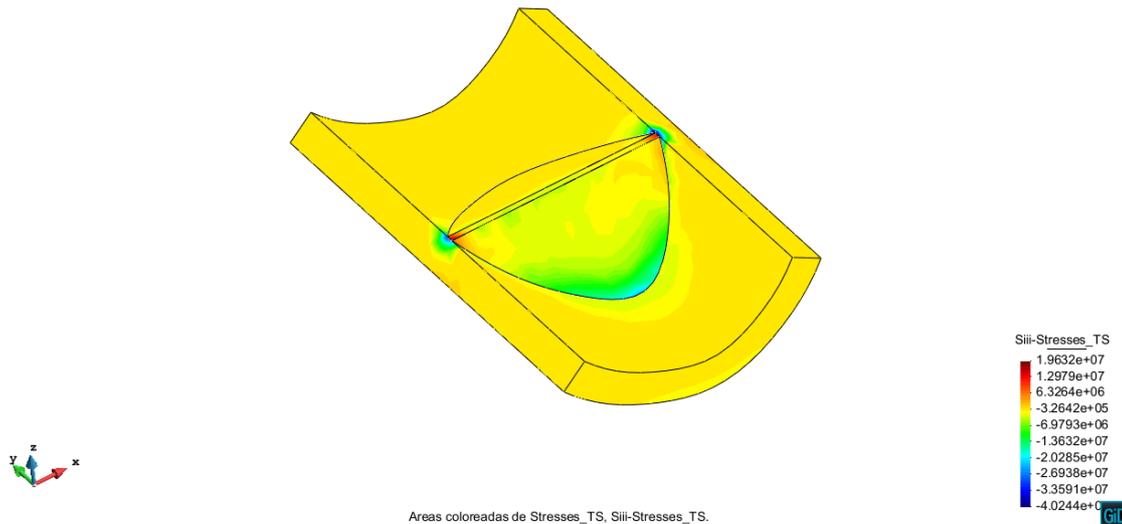


Figura 34. Tensiones Siii

Por otro lado, en relación a la imagen referente a las tracciones experimentadas en la presa, se observa que, como en el caso bidimensional, los puntos de máximas tracciones se dan en la junta de la presa y el terreno, siendo este un punto claro de acumulación de tensiones, que se podría despreciar a la hora de realizar los cálculos estructurales.

4.8. CONCLUSIONES

Después de realizar los cálculos, se han sacado las siguientes conclusiones relacionadas al análisis tridimensional de la presa:

- Los taludes con los que hemos dimensionado la presa son los más adecuados puesto que cumplen con las restricciones del enunciado de tracciones máximas y además nos proporcionan la solución más económica
- En un análisis en 3D, no todas las tipologías de elementos son factibles.
- El análisis de convergencia es mejor realizarlo para desplazamientos, ya que proporciona un criterio más uniforme.
- El tiempo computacional si mallamos del modo adecuado no es mucho mayor que en el caso 2D.
- A veces el software GID da problemas para calcular determinadas geometrías o puntos donde se acumulan tensiones.

5. REFERENCIAS

Apuntes del curso de “Ingeniería de Estructuras” del “Máster en Ingeniería de Caminos, Canales y Puentes” (Universitat Politècnica de Catalunya, primer cuatrimestre del curso 2018-19).