

S-06 PRESA HOMOGÉNEA DE MATERIALES SUELTOS

INGENIERÍA DE ESTRUCTURAS

Carlos Gomáriz Gayá

ÍNDICE

1. ENUNCIADO	2
2. INTRODUCCIÓN	3
3. ANÁLISIS BIDIMENSIONAL	3
3.1. Implementación en el programa	4
3.2. Solución con peso propio	8
3.3. Solución con carga hidrostática	10
4. ANÁLISIS TRIDIMENSIONAL	12
4.1. Implementación en el programa	13
4.2. Solución con peso propio	17
4.3. Solución con carga hidrostática	18
5. CONCLUSIONES	20

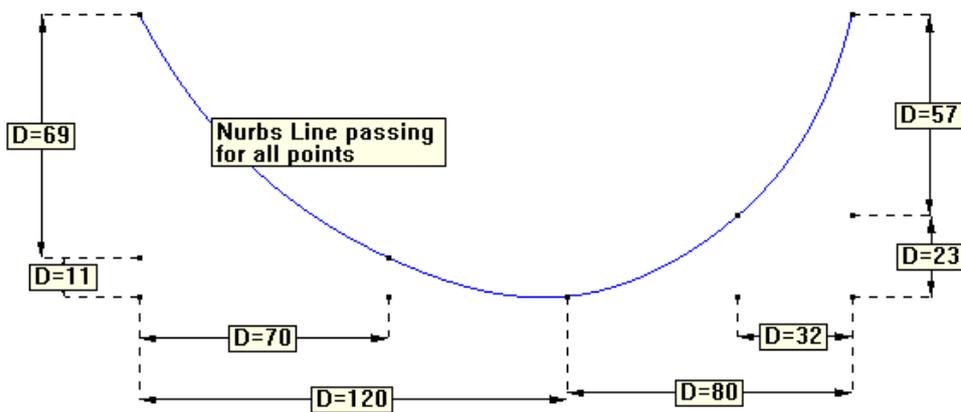
1. ENUNCIADO

Dimensionar y calcular una presa homogénea de materiales sueltos de 80 m de altura. La anchura en coronación debe ser de 6 m. con las restricciones geométricas que se indican.

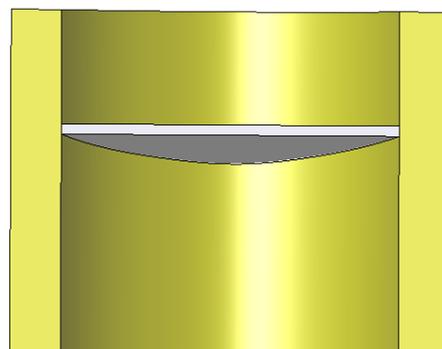
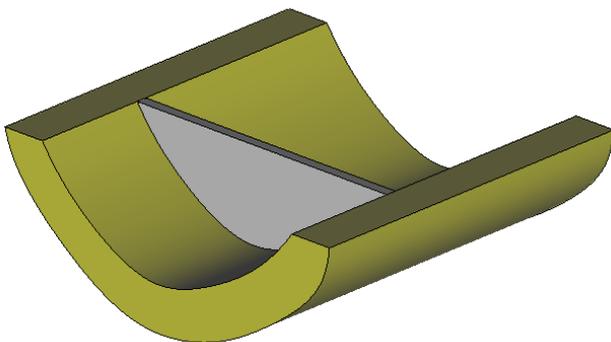
Realizar el proyecto mediante un análisis bidimensional y posteriormente en 3D para verificar el diseño utilizando en ambos casos las siguientes hipótesis:

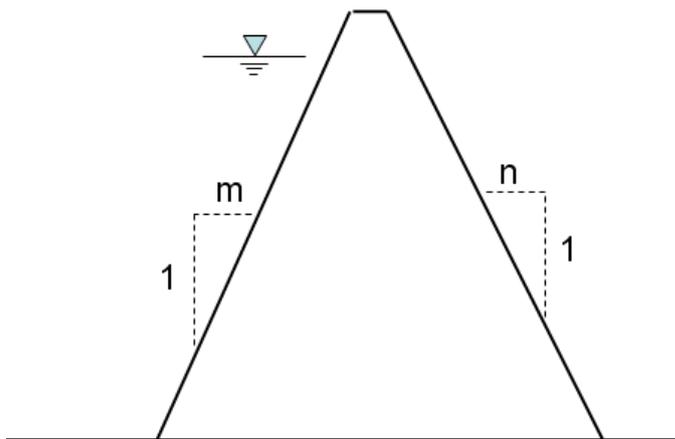
- 1) Las tracciones máximas en cualquier punto de la presa no deben superar 0.1 MPa
- 2) El peso específico del terreno y el material de construcción es de 20000 N/m³
- 3) El Modulo de elasticidad del material a usar es de 9900 K N/m² y el coeficiente de Poisson es de 0,285
- 4) Base empotrada en el terreno
- 5) Cimentación en terreno homogéneo. Módulo de elasticidad: 35 G N/m² y coeficiente de poisson 0,30.
- 6) Cargas actuantes:
 - a) Peso propio
 - b) Peso propio + empuje hidrostático en presa y cimentación (altura del agua 77 metros)

El perfil del emplazamiento es el que se muestra:



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





$$2.0 < m < 3.5$$
$$2.0 < n < 3.5$$

2. INTRODUCCIÓN

El objetivo de este trabajo es el de realizar un análisis tensional de una presa de materiales sueltos sometida a peso propio con y sin carga hidrostática. Para llevarlo a cabo se escogerán dos modelos de análisis, elasticidad bidimensional y finalmente un análisis de sólido 3D. El modelo de tensión plana es aplicable a nuestra presa debido a que una de sus dimensiones (el ancho) es mucho mayor que las otras dos. El objetivo es comparar las soluciones que obtenemos con cada uno de los modelos y comentar su fiabilidad.

En primer lugar vemos que tenemos que determinar las pendientes de las dos caras de la presa, por lo que inicialmente se supondrá un valor para las dos y posteriormente se realizarán iteraciones para ver cuál es el valor óptimo para cada una de ellas, ya que se tienen que cumplir requerimientos de tracciones máximas en cualquier punto de la presa.

Para realizar dichos modelos se empleará el programa GID, mediante el cual aplicaremos el principio de trabajos virtuales y mediante la discretización del dominio con una malla de elementos finitos obtendremos las soluciones para cada caso.

Dicho lo anterior, comenzaremos a analizar el caso de tensión plana, por su simplicidad y posteriormente abordaremos el problema de elasticidad tridimensional.

3. ANÁLISIS BIDIMENSIONAL

Una estructura que se encuentra en estado de tensión plana permite establecer la hipótesis de que todas las secciones perpendiculares al eje prismático 'z' se deforman en su plano y de manera idéntica. Por esta razón, basta con conocer el comportamiento de cualquiera de dichas secciones para obtener el comportamiento global de la estructura.

Para comenzar, definiremos el campo de desplazamientos, de deformaciones, deformaciones generalizadas, tensiones y esfuerzos para caracterizar nuestro modelo. En el caso de elasticidad bidimensional el campo de desplazamientos tiene la siguiente forma:

$$\mathbf{u}(x, y) = \begin{Bmatrix} u(x, y) \\ v(x, y) \end{Bmatrix}$$

Del campo de desplazamientos podemos definir el campo de deformaciones como:

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial y} \\ \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \end{Bmatrix}$$

Cabe comentar que la tensión ε_z se supone nula. Por otra parte, en un estado de tensión plana dicha deformación no es nula, pero se supone que lo es la tensión σ_z , por lo que el trabajo de deformación de su producto es nulo, así que no es necesario considerar la deformación ε_z .

Finalmente, el campo de tensiones toma la expresión de:

$$\boldsymbol{\sigma} = \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \mathbf{D} \cdot \boldsymbol{\varepsilon}$$

Donde \mathbf{D} es la matriz constitutiva del material.

Para acabar, enunciaremos el principio de trabajos virtuales y su particularización para el caso de tensión plana, expresión que utilizar el software GID para el ensamblaje y resolución de la estructura. El PTV toma la siguiente forma:

$$\iint_A (\delta \varepsilon_x \sigma_x + \delta \varepsilon_y \sigma_y + \delta \gamma_{xy} \tau_{xy}) t \, dA = \iint_A (\delta u b_x + \delta v b_y) t \, dA + \oint_l (\delta u t_x + \delta v t_y) t \, ds + \sum_i (\delta u_i U_i + \delta v_i V_i)$$

Una vez definidas todas las expresiones que intervienen en nuestro proceso de cálculo, vamos a introducir la geometría de la presa en el programa y a calcularla.

3.1 IMPLEMENTACIÓN EN EL PROGRAMA

3.1.1 Definición de la geometría

Usaremos todos los datos proporcionados por el enunciado para definir la geometría de nuestra presa. Hemos elegido los valores más pequeños para los parámetros de pendientes 'm' y 'n' para

empezar con el caso más pesimista, en el que habría menos material en la presa. Dichos valores corresponden a $m=2$ y $n=2$. Si no satisfacen los requerimientos impuestos de diseño, se ampliarán hasta conseguirlos iterativamente. Además, se ha ampliado la superficie de apoyo de la presa en 200 metros a partir de cada pie para poder ver la influencia de las tensiones que ejerce la presa en el terreno. La geometría de la estructura bidimensional luce de la siguiente manera:

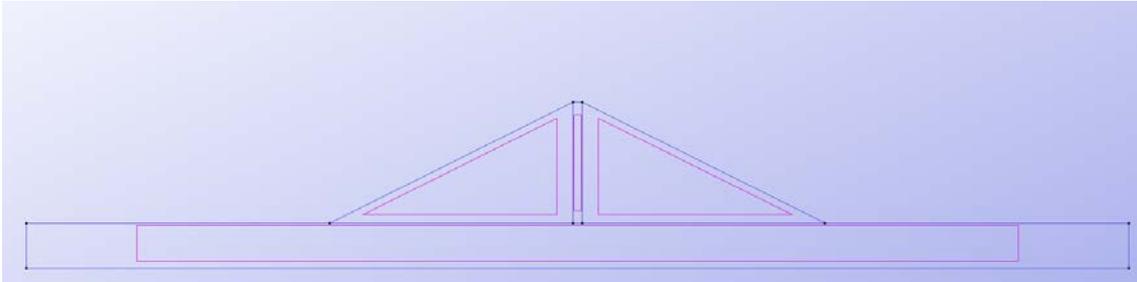


Figura 1. Geometría de la presa de materiales sueltos para $m=n=2$

3.1.2 Condiciones de contorno

Una vez definida la geometría de la estructura y las superficies que la conforman, debemos imponer las condiciones de contorno pertinentes. Se ha impuesto la condición de empotramiento en la base del terreno, es decir, se han restringido los movimientos en dirección horizontal y vertical. Además, en los extremos derecho e izquierdo del terreno se ha restringido el movimiento horizontal 'x'. Así pues, las condiciones aplicadas se pueden ver en el siguiente esquema:

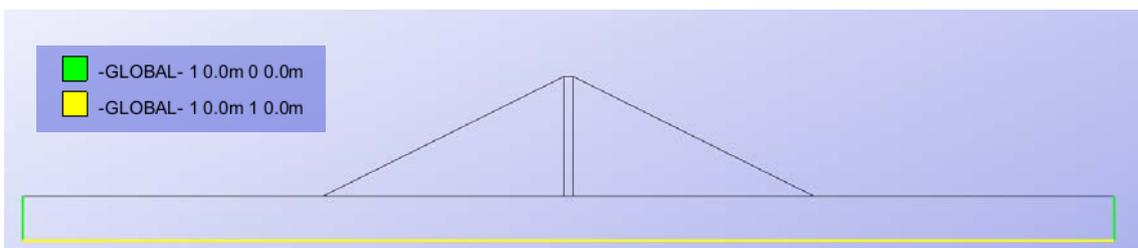


Figura 2. Condiciones de contorno aplicadas a la estructura

3.1.3 Material y cargas

A continuación, procedemos a definir los distintos materiales que conforman la estructura. Para ello se han definido dos nuevos materiales correspondientes a los dos materiales que la conforman, el material de la "tierra" utilizada para construir la presa y el terreno sobre el cual descansará. Se han definido sus módulos de elasticidad, peso específico y coeficiente de poisson tal como se define en el enunciado. Su asignación a las correspondientes superficies puede verse en la siguiente figura:

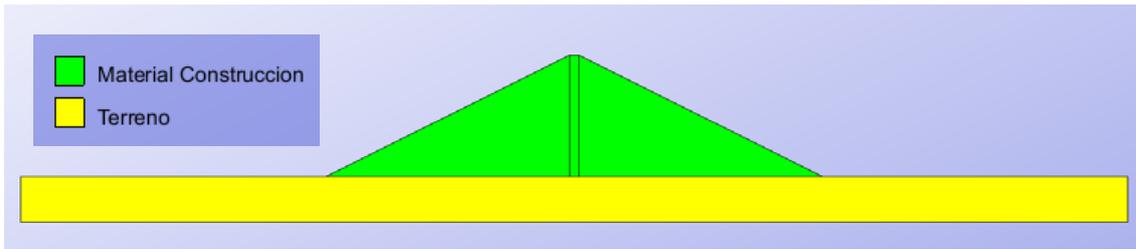


Figura 3. Materiales que conforman nuestra estructura

En cuanto a cargas se refiere, tenemos dos casuísticas. En primer lugar tan solo consideraremos el peso propio de la estructura, con lo que no habrá ninguna carga externa a aplicar. En el otro caso, aplicaremos una carga linealmente creciente con la profundidad a partir de la cota 77 que representará la presión hidrostática del agua frente a la cara aguas arriba de la presa.

3.1.4 Cálculo y refinamiento de malla

Finalmente, el último paso que nos queda es definir una malla de elementos finitos y proceder al cálculo de la estructura. Cabe mencionar que los cálculos que realizaremos a continuación han sido con el caso sin presión hidrostática, con lo que solo se ha tenido en cuenta el peso propio. Se analizarán cuatro tipos de elementos y su convergencia para poder decidir cuál de ellos presenta la convergencia más rápida y utilizarlo para obtener el resultado final de nuestro problema. Los elementos utilizados han sido el triángulo de tres y seis nodos y el cuadrilátero de cuatro y ocho nodos. Los resultados obtenidos con cada uno de ellos han sido los siguientes:

TRIÁNGULO DE TRES NODOS

Tamaño	Nodos	Elementos	Grados Libertad	Flecha	Compresión (Pa) (Siii)	Tracción (Pa) (Si)	Convergencia Flecha	Convergencia Compresiones
6	1349	2386	2698	6.1705	1771305	0	0.99678	0.98229
4	2465	4618	4930	6.2035	1826592	0	0.99895	0.98786
3	4563	8818	9126	6.2100	1849048	0	0.99966	0.99267
2	9922	19532	19844	6.2121	1862700	0	0.99984	0.99770
1	39640	78968	79280	6.2131	1866995	0	1	1

TRIÁNGULO DE SEIS NODOS

Tamaño	Nodos	Elementos	Grados Libertad	Flecha	Compresión (Pa) (Siii)	Tracción (Pa) (Si)	Convergencia Flecha	Convergencia Compresiones
8	3855	1772	7710	6.2126	1884985	0	0.99996	0.99673
7	4171	1930	8342	6.2124	1878837	0	0.99996	0.99673
6	5083	2386	10166	6.2122	1872709	0	0.99996	0.99673
4	9547	4618	19094	6.2118	1869400	0	0.99998	0.99855
2	39375	19532	78750	6.2117	1872103	0	1	1

CUADRILÁTERO DE CUATRO NODOS

Tamaño	Nodos	Elementos	Grados Libertad	Flecha	Compresión (Pa) (Siii)	Tracción (Pa) (Si)	Convergencia Flecha	Convergencia Compresiones
6	1477	1321	2954	6.1941	1837900	0	0.99699	0.98268
3	4317	4057	8634	6.2126	1856000	0	0.99997	0.99235
2	9713	9324	19426	6.2199	1864600	0	0.99886	0.99695
1.5	17294	16776	34588	6.2128	1868100	0	1	0.99882
1.2	27039	26391	54078	6.2128	1870300	0	1	1

CUADRILÁTERO DE OCHO NODOS

Tamaño	Nodos	Elementos	Grados Libertad	Flecha	Compresión (Siii)	Tracción (Si)	Convergencia Flecha	Convergencia Compresiones
8	1848	551	3696	6.2114	1864500	0	0.999710294	0.994081894
6	3100	947	6200	6.2124	1867900	0	0.999871242	0.995894647
3	12690	4057	25380	6.213	1873800	0	0.99996781	0.999040307
2	28749	9324	57498	6.2132	1875600	0	1	1

Los resultados anteriores están mucho mejor reflejados en las siguientes figuras:

CONVERGENCIA DESPLAZAMIENTOS

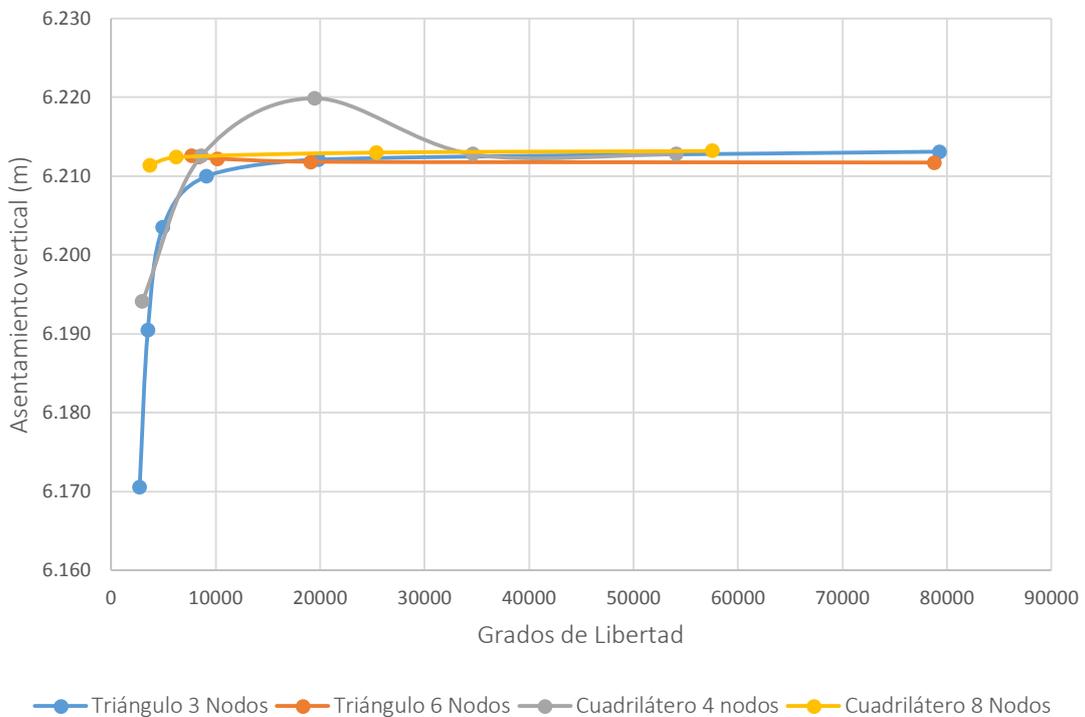


Figura 4. Gráfica de convergencia de cada tipo de elemento en desplazamientos

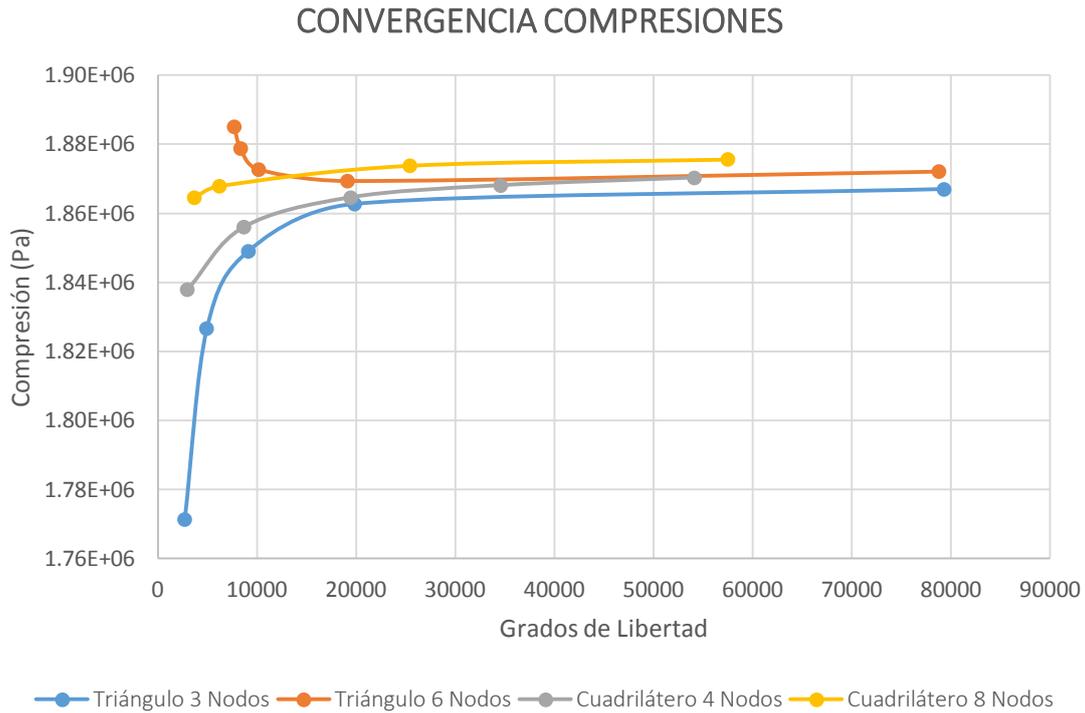


Figura 5. Gráfica de convergencia de cada tipo de elemento en tensiones (compresiones)

Como era de esperar, los elementos cuadriláteros no son muy apropiados para el tipo de geometría que estamos tratando de discretizar. En ello se refleja que la convergencia tanto en tensiones como en desplazamientos de los elementos cuadriláteros se desvíe sustancialmente de la tendencia que sigue la convergencia de los elementos triángulos.

Como el análisis 3D de la presa se realizará con elementos tetraédricos, resulta lógico queelijamos los elementos triangulares por analogía a ellos. Por lo tanto, debido a que la convergencia de los elementos triangulares de seis nodos es notablemente más rápida que los de tres nodos, serán elegidos para obtener la solución al caso de presa bajo peso propio.

3.2 SOLUCIÓN DEL CASO ÚNICAMENTE CON PESO PROPIO

Como bien se ha dicho anteriormente, el tipo de elementos escogido ha sido el triángulo de seis nodos, cuya convergencia es más que aceptable (99.99%) utilizando elementos con 4 metros de tamaño. La solución obtenida en desplazamientos y tensiones ha sido la siguiente:

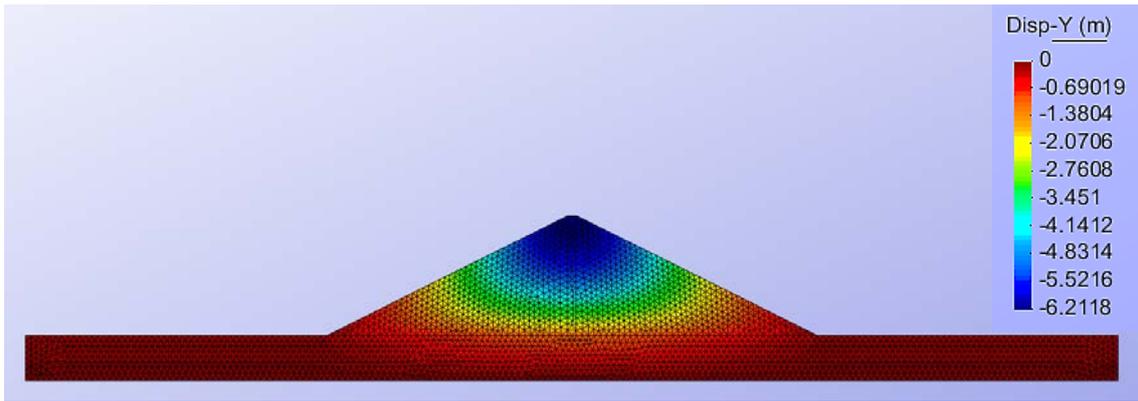


Figura 6. Distribución de desplazamientos verticales en la estructura

Como puede observarse los asentamientos que tenemos en la presa son muy considerables (del orden de 6 metros en la coronación), pero teniendo en cuenta las dimensiones de la presa y de su tipología (material suelto) es comprensible que asiente mucho.

Por otra parte se han realizado análisis tanto de compresiones como de tensiones y los resultados han sido los siguientes:

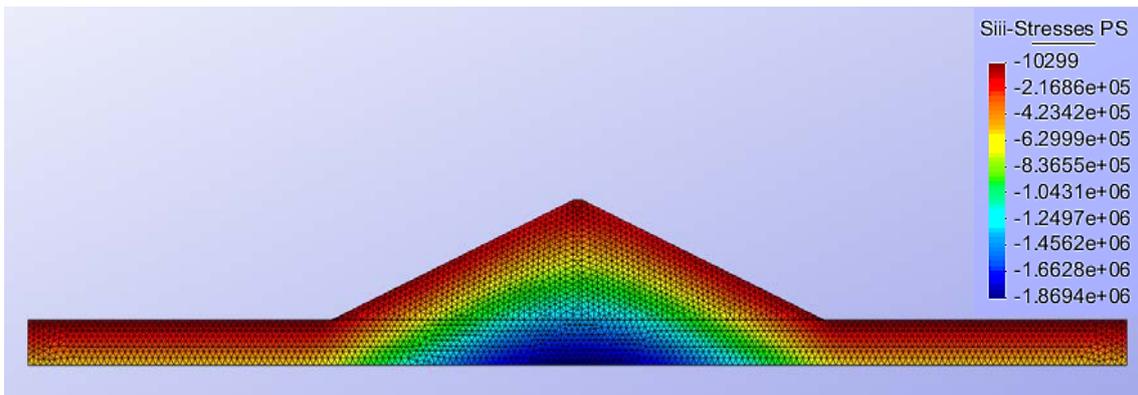


Figura 7. Distribución de compresiones en la estructura

En este gráfico puede observarse como las compresiones que tenemos son del orden de 2 MPa, pero como el enunciado no fija ninguna restricción para ellas consideraremos que son adecuadas para la estructura. El resultado del campo de tracciones ha sido el siguiente:



Figura 8. Distribución de tracciones en la estructura

De esta última figura puede deducirse que toda la estructura está exenta de tracciones, por lo que esta trabaja exclusivamente a compresión. Este comportamiento puede ser debido a la simetría axial que posee esta estructura y que tan solo está sometida a la carga de peso propio (componente exclusivamente vertical), por lo que es paralela al eje de simetría. Por lo tanto concluimos que el estado de carga de peso propio satisface los requerimientos de tracciones con las pendientes que minimizan la cantidad de terreno a incorporar a la estructura ($m=n=2$), con lo que nuestra solución es, en este caso, óptima.

3.3 SOLUCIÓN DEL CASO CON CARGA HIDROSTÁTICA

En este caso la geometría, las condiciones de contorno y el material son exactamente los mismos que en el caso sin carga hidrostática. En este punto la única cosa que debemos cambiar es la introducción de una carga de presión linealmente ascendente con la profundidad en la cara aguas arriba de la presa, así como una carga uniformemente repartida en el fondo de la presa, es decir en el terreno.

Una vez aplicadas las cargas debidas al peso del agua, utilizaremos una malla de elementos triangulares de seis nodos, ya que como se vio anteriormente, son los elementos que más rápido convergen. Además, se vio que el tamaño del elemento para el cual ya tenemos una buena convergencia es de 4 metros. Así pues utilizando la malla descrita los resultados obtenidos han sido los siguientes:

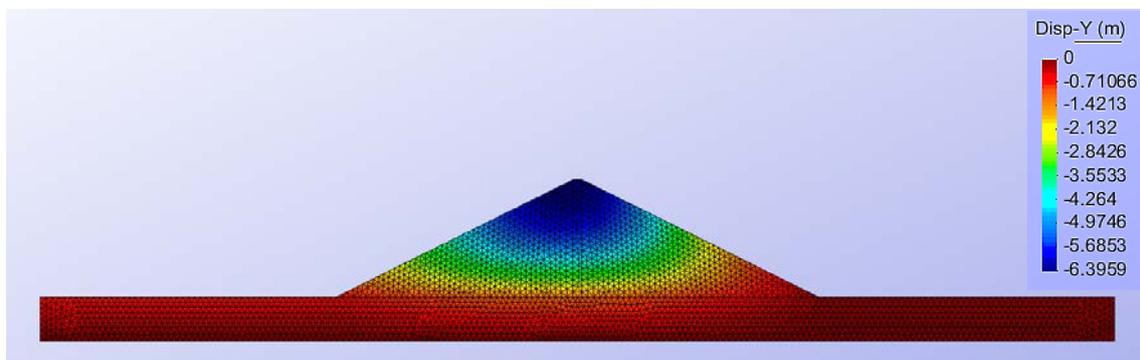


Figura 9. Distribución de desplazamientos verticales en la estructura

Como bien se puede ver en la figura, los asentamientos máximos han aumentado ligeramente, pero lo que es más notorio es el aumento de desplazamientos verticales en la parte izquierda de la presa, donde la presión del agua comprime con más fuerza que anteriormente a la estructura y al terreno.

A continuación podemos ver como la incorporación de la presión hidrostática afecta también al campo de tensiones:



Figura 10. Distribución de tracciones en la estructura

La primera diferencia que observamos es que en este caso ya nos aparecen tracciones en la estructura, debido a la asimetría que nos produce la incorporación de la presión de agua. No obstante, vemos que las tracciones se concentran en el pie de la presa y que no se producen tracciones al lado derecho de la presa debido a que el empuje del agua no es suficientemente fuerte como para vencer al peso del material de la presa y originar una tracción.

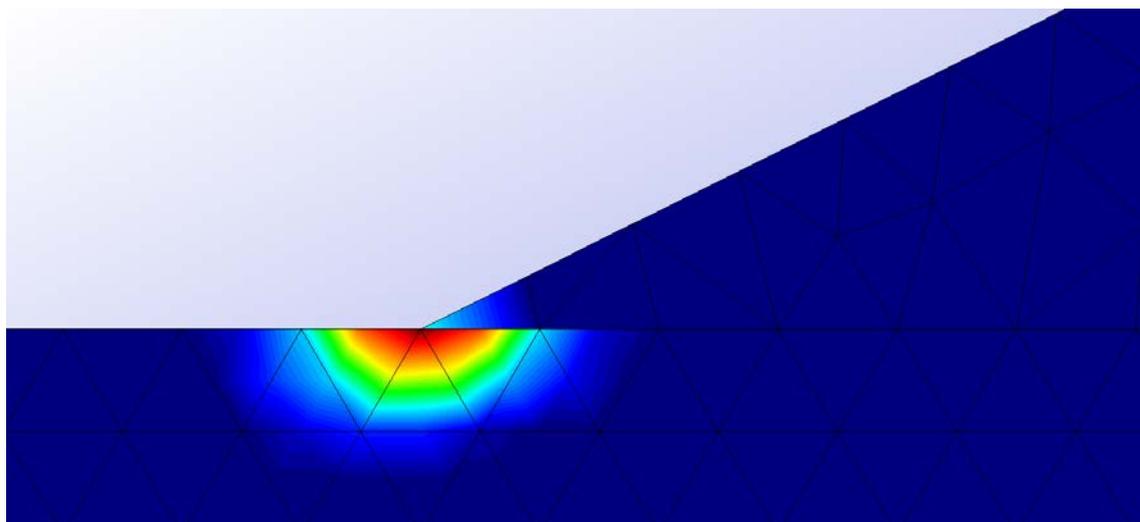


Figura 11. Detalle del punto de concentración de tensiones de tracción

Además, observando detalladamente la zona donde aparecen las tracciones podemos ver que se concentran en un punto. Por este motivo se ha presentado una ampliación de esa región donde se supondrá que se produce una concentración de tensiones y no afectará de modo alguno a la integridad de la estructura. Además, aunque no se tratase de un punto de concentración de tensiones, los valores que alcanza son del orden de 0.3 MPa, con lo que seguiríamos cumpliendo los requerimientos de diseño.

Finalmente se ha observado la distribución de compresiones en la estructura, donde tan solo se produce un desplazamiento ascendente hacia el lado izquierdo de la presa, donde se ha añadido la fuerza provocada por la presión hidrostática. En la figura siguiente se observa dicha variación.

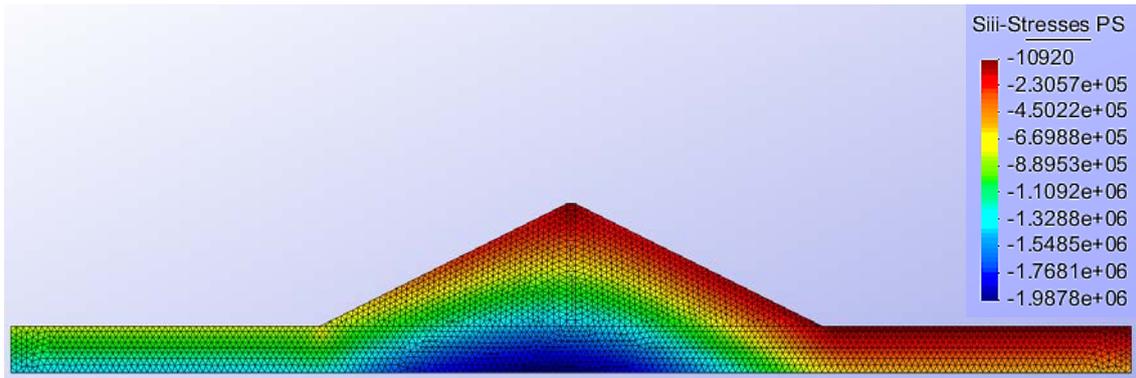


Figura 12. Distribución de compresiones en la estructura

4. ANÁLISIS TRIDIMENSIONAL

Para realizar un análisis tensional tridimensional de la estructura, no podemos usar ninguna simplificación de entre todos los modelos que conocemos para el análisis de sólidos en tres dimensiones. Esto es debido a que el terreno tiene una forma irregular curvilínea, y produce como intersección con la presa una geometría que no puede ser simplificada de ninguna de las formas. Por este motivo, este análisis ha sido utilizando la teoría elástica de sólidos tridimensionales. Los fundamentos de dicha teoría son los siguientes:

Campo de desplazamientos

$$\mathbf{u} = [u, v, w]^T$$

Es decir, tenemos tres incógnitas en cada nodo.

Por otra parte, el campo de deformaciones puede ser derivado del campo de desplazamientos como:

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{yz} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial y} \\ \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \\ \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \end{Bmatrix}$$

En este caso, a diferencia del anterior, tenemos las seis componentes de deformación y todas trabajan, por lo que no podemos eliminar ninguna de ellas.

Por otro lado, a partir de las deformaciones podemos definir las tensiones como:

$$\boldsymbol{\sigma} = \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \\ \tau_{xz} \\ \tau_{yz} \end{Bmatrix} = \mathbf{D} \cdot \boldsymbol{\varepsilon}$$

Donde \mathbf{D} es la matriz constitutiva para material isótropo en tres dimensiones.

Para acabar, enunciaremos el principio de trabajos virtuales y su particularización para el caso más general de elasticidad tridimensional, expresión que utilizar el software GID para el ensamblaje y resolución de la estructura. El PTV en forma matricial se escribe:

$$\iiint_V \delta \boldsymbol{\varepsilon}^T \boldsymbol{\sigma} dV = \iiint_V \delta u^T \mathbf{b} dV + \iint_A \delta u^T \mathbf{t} dA + \sum_i \delta a_i^T q_i$$

Donde V y A son el volumen y la superficie del cuerpo sobre el que actúan las fuerzas de masa \mathbf{b} , de superficie \mathbf{t} y puntuales q_i respectivamente.

Una vez definidas todas las expresiones que intervienen en nuestro proceso de cálculo, vamos a introducir la geometría de la presa en el programa y a calcularla.

4.1 IMPLEMENTACIÓN EN EL PROGRAMA

4.1.1 Definición de la geometría

Usaremos todos los datos proporcionados por el enunciado para definir la geometría de nuestra presa.

De nuevo hemos elegido los valores más pequeños para los parámetros de pendientes 'm' y 'n' para empezar con el caso más pesimista, en el que habría menos material en la presa. Dichos valores corresponden a m=2 y n=2. Si no satisfacen los requerimientos impuestos de diseño, se ampliarán hasta conseguirlos iterativamente.

En este caso tenemos una dificultad añadida, y es que conocemos la geometría de la ladera donde se va a emplazar nuestra presa de tierras y resulta que es curva de forma irregular. La dificultad radica en hallar la intersección entre la base de la presa y su contorno con el terreno.

Una vez hemos conseguido dibujar la geometría tanto de terreno como la presa y se ha intersecado el resultado ha sido el siguiente:

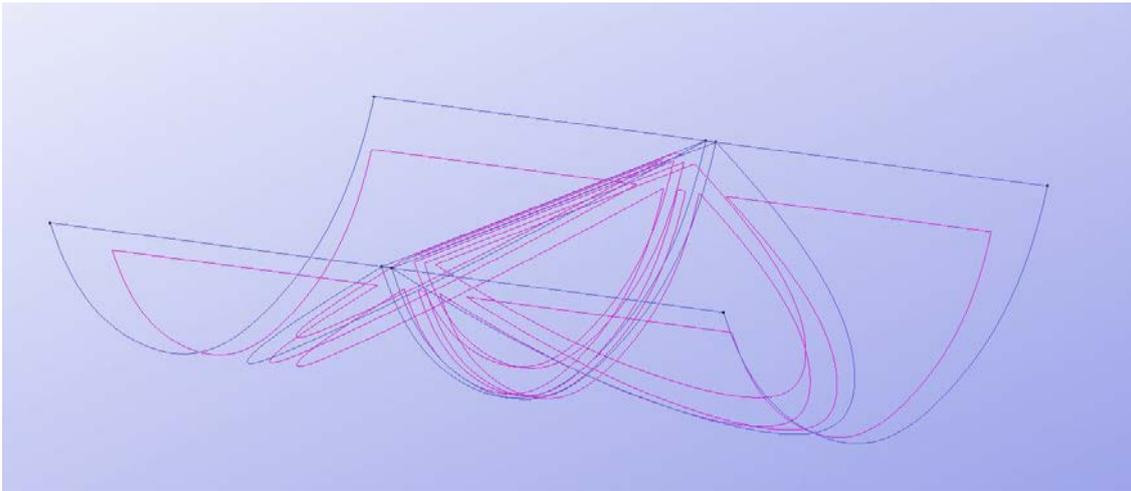


Figura 13. Geometría de la intersección entre la presa y el terreno

Una vez definida la intersección procedemos a definir los dos sólidos que a nosotros realmente nos interesan; el terreno y la presa. Para ello se han unido todas aquellas superficies que conformaban cada sólido y una vez realizada dicha operación obtenemos nuestro modelo final de terreno y presa:

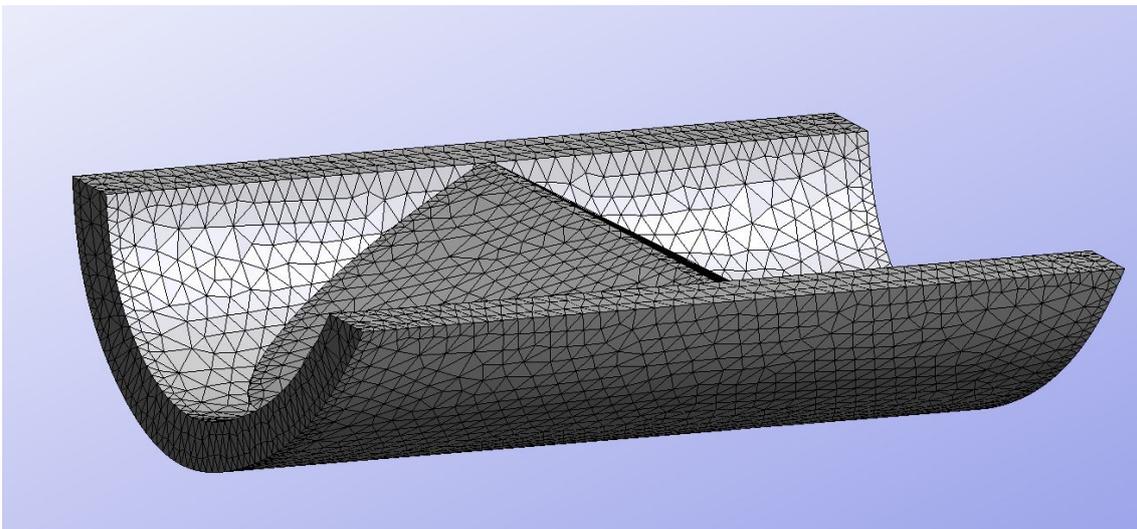


Figura 14. Geometría final de nuestra estructura (presa-terreno)

4.1.2 Condiciones de contorno

Una vez definida la geometría de la estructura y los sólidos que la conforman, debemos imponer las condiciones de contorno pertinentes. Se ha impuesto la condición de empotramiento en la base del terreno, es decir, se han restringido los movimientos en las tres direcciones. Además, en los extremos derecho e izquierdo del terreno se ha restringido el movimiento horizontal 'y'. Así pues, las condiciones aplicadas se pueden ver en el siguiente esquema:

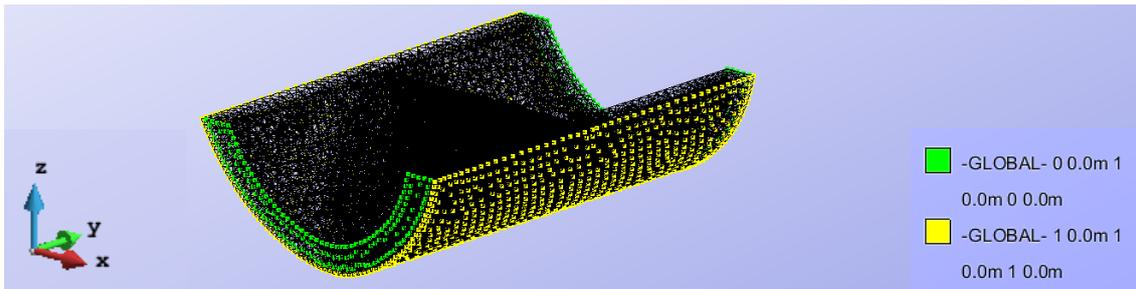


Figura 15. Condiciones de contorno aplicadas en la estructura

4.1.3 Material y cargas

A continuación, procedemos a definir los distintos materiales que conforman la estructura. Para ello se han definido dos nuevos materiales correspondientes a los dos materiales que la conforman, el material de la “tierra” utilizada para construir la presa y el terreno sobre el cual descansará. Se han definido sus modulos de elasticidad, peso específico y coeficiente de poisson tal como se define en el enunciado. Su asignación a las correspondientes cuerpos sólidos puede verse en la siguiente figura:

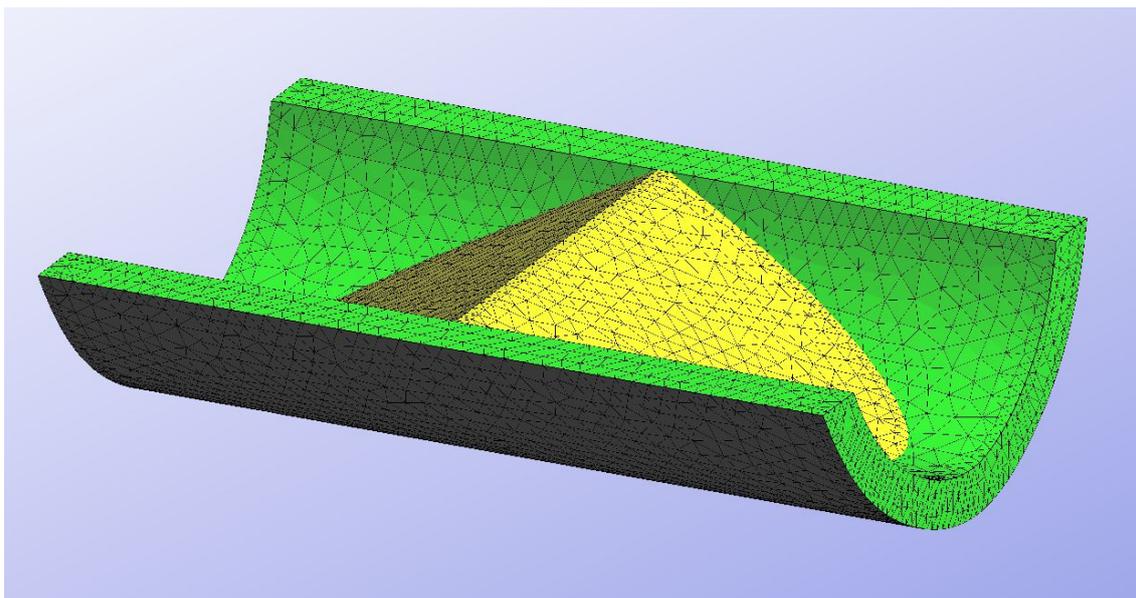


Figura 16. Materiales definidos en la estructura

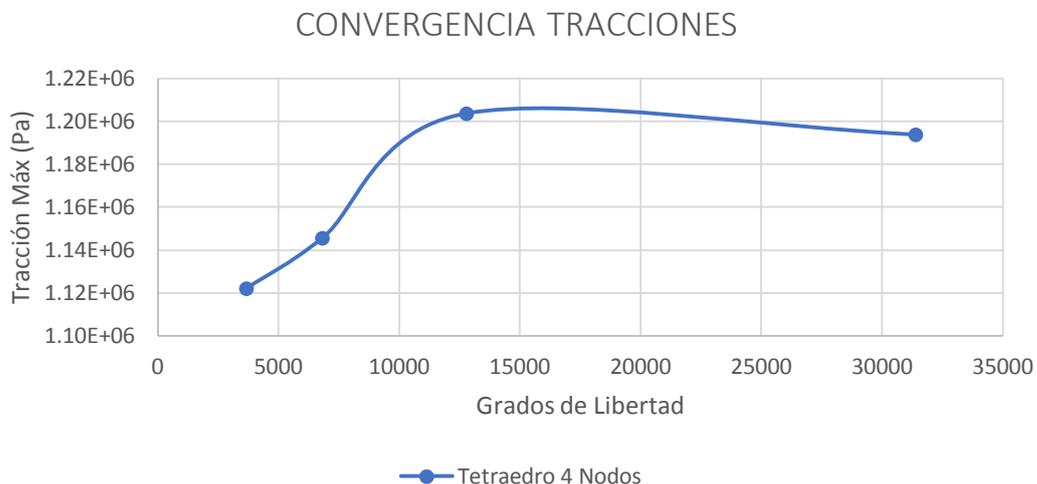
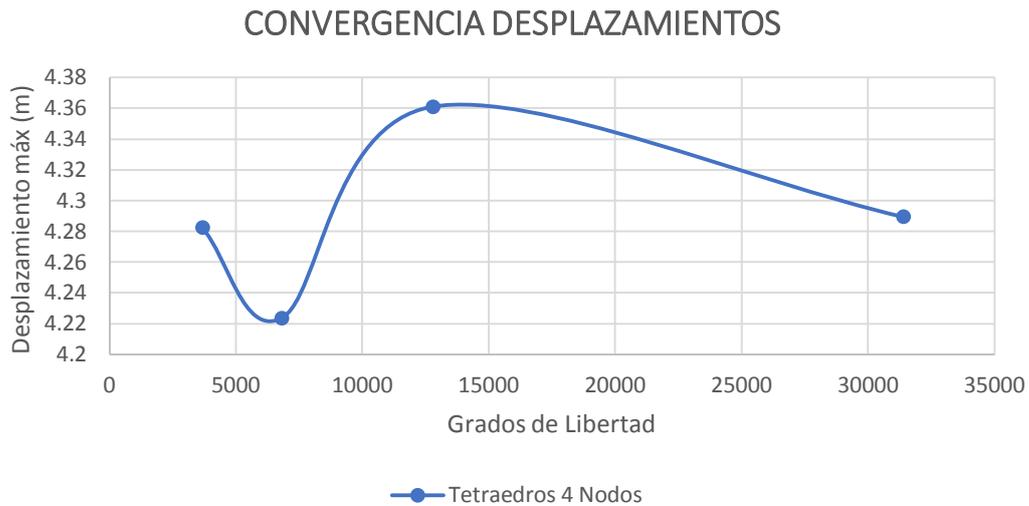
En cuanto a cargas se refiere, tenemos dos casuísticas al igual que en el caso anterior. En primer lugar tan solo consideraremos el peso propio de la estructura, con lo que no habrá ninguna carga externa a aplicar. En el otro caso, aplicaremos una carga linealmente creciente con la profundidad a partir de la cota 77 que representará la presión hidrostática del agua frente a la cara aguas arriba de la presa.

4.1.4 Cálculo y refinamiento de malla

Finalmente, el último paso que nos queda es definir una malla de elementos finitos y proceder al cálculo de la estructura. Cabe mencionar que los cálculos que realizaremos a continuación han sido con el caso sin presión hidrostática, con lo que solo se ha tenido en cuenta el peso propio. En este caso tan solo se analizará un tipo de elemento, que es el tetraédrico de 4 nodos, debido a la complejidad del dominio a discretizar y a su versatilidad en este tipo de dominios. Los resultados con este tipo de elemento han sido los siguientes:

TETRAEDROS DE CUATRO NODOS								
Tamaño	Nodos	Elementos	Grados Liber.	Flecha	Compresión (Pa) (Siii)	Tracción (Pa) (Si)	Convergencia Flecha	Convergencia Compresiones
30	1224	4995	3672	4.2825	1313100	1122000	0.99839	0.90334
20	2271	9549	6813	4.2236	1384300	1145500	0.98465	0.95232
15	4262	18939	12786	4.3611	1405900	1203700	0.98328	0.9671
10	10462	51167	31386	4.2894	1453600	1193800	1	1

Los resultados se pueden interpretar en la siguiente figura:



Como puede comprobarse la convergencia, tanto en tensiones como en desplazamientos, no es del todo buena, pero mirando el orden de magnitud de los asientos (metros), las tensiones (MPa) y sobretodo el gran tamaño de los elementos (10 m el caso más pequeño) vemos que son tolerancias más que aceptables, por lo que utilizaremos estos elementos con tamaño de 10 metros para obtener las soluciones de los dos casos propuestos ya que es el más preciso que tenemos.

4.2 SOLUCIÓN DEL CASO ÚNICAMENTE CON PESO PROPIO

La solución obtenida, mediante la utilización de elementos tetraédricos de cuatro nodos, en desplazamientos y tensiones ha sido la siguiente:

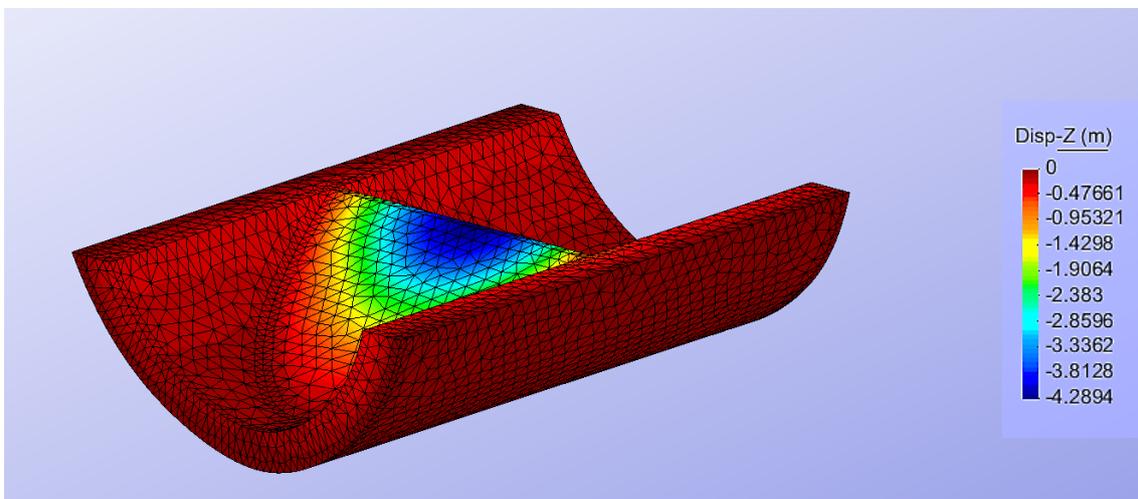


Figura 17. Distribución de desplazamientos verticales en la estructura

Como bien puede apreciarse en la figura, los desplazamientos que obtenemos en este caso, son sensiblemente menores a los obtenidos mediante el modelo de elasticidad bidimensional. Esto es debido principalmente a que en el caso bidimensional se despreciaba la geometría del terreno que abraza a la presa, ya que en este caso, ayuda a evitar que la presa (con módulo de elasticidad más bajo que el terreno) se deforme tanto.

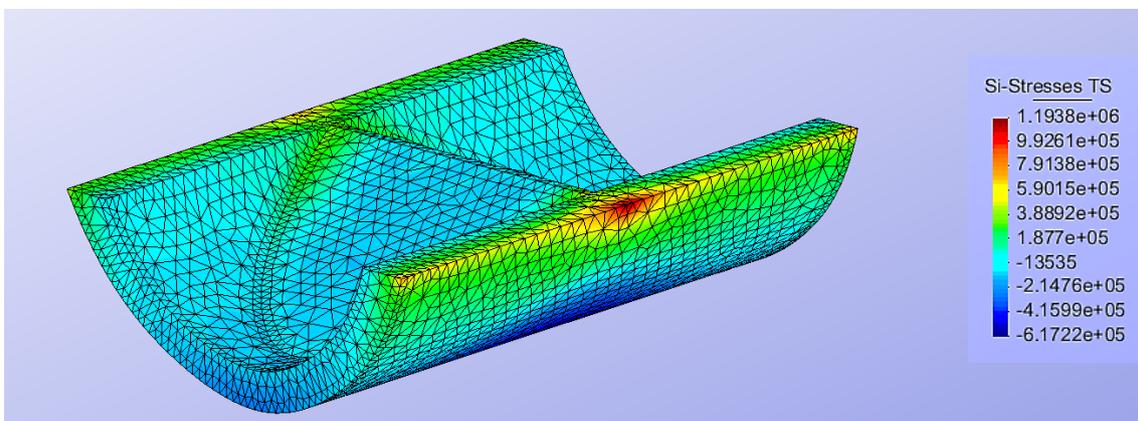


Figura 18. Distribución de tensiones de tracción en la estructura

En este caso, en cambio, vemos que sí que aparecen tracciones en nuestra estructura, ya que como se ha dicho en el apartado anterior, la geometría del terreno no es simétrica respecto a un eje vertical, por lo que las cargas de peso son diferentes a un lado y a otro y eso nos produce algunas tracciones tanto en el terreno como en la presa.

Por otra parte, si vemos el valor de la tracción máxima que del orden de 1.2 MPa, no está actuado sobre la presa, sino sobre el material. Si nos fijamos en la tracción más elevada en la presa vemos que es del orden de 0.6 MPa, valor que ampliamente cumple con la restricción de tracciones máximas de 1 MPa.

Por lo tanto, habiendo seleccionado el valor mínimo de las dos pendientes laterales de la presa, con las cuales el material necesario para construir la presa es mínimo, satisfacemos los requerimientos impuestos y obtenemos una solución óptima.

4.3 SOLUCIÓN DEL CASO CON CARGA HIDROSTÁTICA

Este caso se resolverá análogamente al caso anterior, ya que tan solo tenemos que introducir una carga más, que en este caso es la carga hidrostática del agua. Una vez aplicada tanto en la estructura como en el terreno, a la computación de los resultados.

Los desplazamientos verticales de la estructura se pueden contemplar en la siguiente figura:

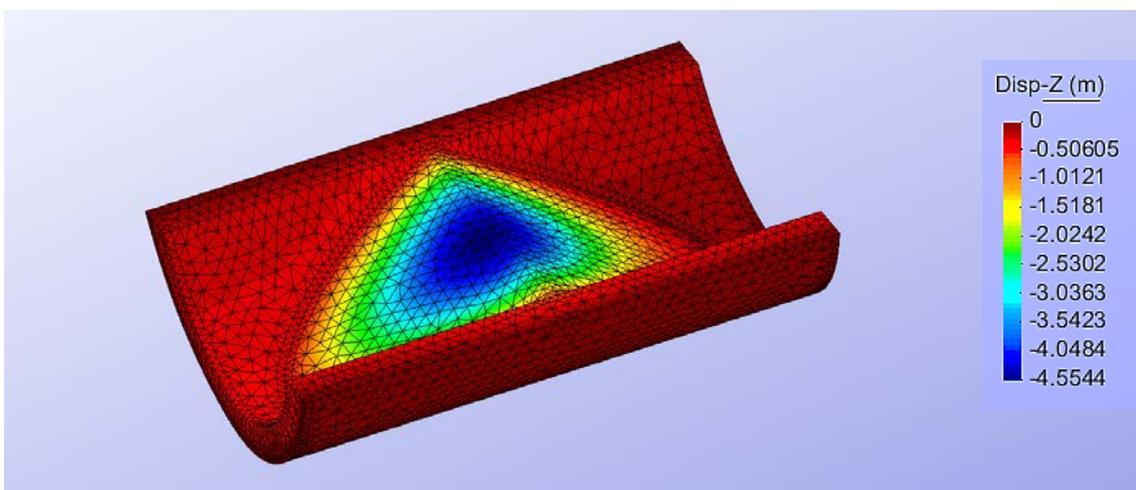


Figura 19. Distribución de desplazamientos verticales con carga hidrostática

En la figura están representados los desplazamientos verticales sufridos por el conjunto presa-terreno. La primera cosa a comentar es que los desplazamientos máximos aumentan, como era de esperar, debido a la carga hidrostática añadida. Además, se incrementan en una proporción bastante semejante a la que se incrementaba en el caso de elasticidad bidimensional, pero en este caso los desplazamientos son menores debido al efecto del terreno que se explicó anteriormente.

Además, en este caso se vuelve a apreciar como la incorporación de la carga hidrostática genera una asimetría en desplazamientos respecto a la parte más alta de la presa, que nos provocará ciertas tracciones en el conjunto de la presa.

Por otra parte las tracciones en la estructura han resultado las siguientes:

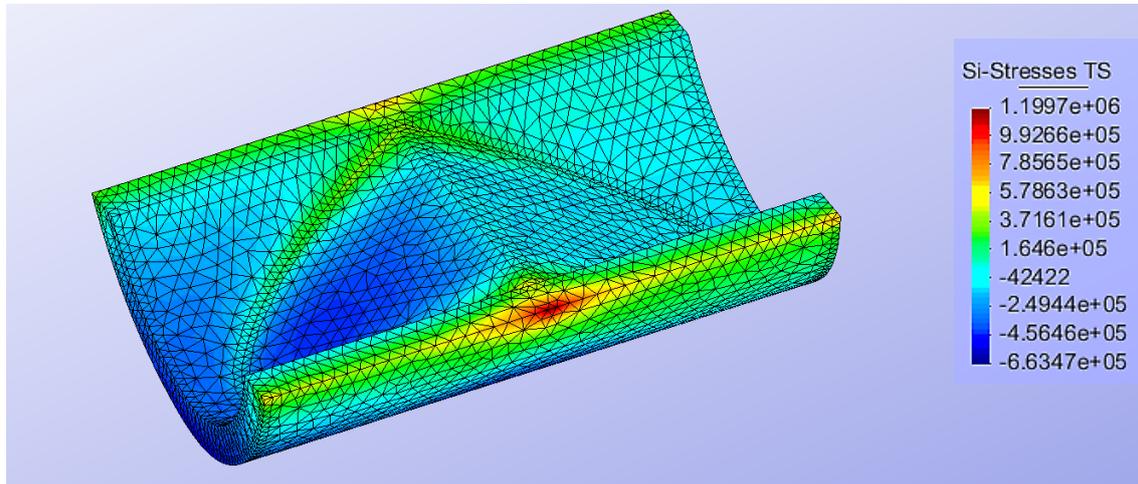


Figura 20. Distribución de tracciones con carga hidrostática

Como puede verse, en la mitad de la presa donde está aplicada la carga hidrostática tenemos unas compresiones más elevadas que en la otra mitad, donde se llegan a generar incluso tracciones. No obstante, como ocurría en el caso bidimensional, las tracciones generadas no son de importancia si las comparamos con las restricciones impuestas, ya que las tracciones máximas se dan en el terreno y no en la presa, donde apenas alcanzan los 0.5 MPa.

Además, dichas tracciones no difieren significativamente de las producidas en la presa en el caso sin carga hidrostática, por lo que podemos deducir que el efecto del agua no es significativo en cuanto a generación de tracciones se refiere. Sin embargo, cabe citar que en el caso de elasticidad bidimensional, en el único punto de la presa donde se presentaban tracciones era en el pie de la presa aguas arriba, pero se ha visto mediante el modelado tridimensional que el lugar donde se producen más tracciones es en la unión presa-terreno en la coronación de la presa.

Finalmente, podemos concluir que la presa satisface, con los dos valores mínimos de las pendientes (mínimo material), los requerimientos de diseño, y por lo tanto, esta es la disposición óptima de su geometría.

5. CONCLUSIONES

Después de realizar los cálculos, se han sacado las siguientes conclusiones relacionadas al análisis estructural 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. Para geometrías irregulares, se ha observado que los elementos hexaédricos no pueden utilizarse.

El tiempo computacional si mallamos del modo adecuado no es mucho mayor que en el caso 2D, ya que en ningún caso hemos tardado más de 2 minutos en realizar el cálculo completo.

A veces el software GID da problemas para calcular determinadas geometrías o puntos donde se acumulan tensiones, por lo que debemos saber interpretar los resultados.

Se ha comprobado la importancia de un estudio tridimensional en estructuras importantes con una fuerte interacción del terreno. En el análisis bidimensional, se encontró que había una zona de tracciones en el pie del talud de la presa que no afectaban más que al terreno. Sin embargo, en el estudio tridimensional se ha visto que, debido a las irregularidades del terreno, sí que hay una zona de la base de la presa que sufre tracciones aunque no son importantes. Por otro lado, se ve que la parte más crítica tanto para el terreno como para la presa no es el pie del talud sino la unión presa-terreno en su coronación.

Finalmente destacar que a pesar de que la teoría bidimensional obtenga unos resultados en asientos sensiblemente diferentes a los del análisis tridimensional, tienen a su favor que en el caso tridimensional, la definición de la geometría final con todas sus intersecciones ha resultado un proceso arduo y lleno de dificultades que, al fin y al cabo, ha requerido de muchísimo más tiempo que el fácil y sencillo proceso de modelado en dos dimensiones. En este sentido podemos concluir que ambos métodos tienen sus puntos débiles y fuertes, pero en el caso de que nuestro fin sea la buena caracterización de los fenómenos físicos que intervienen en nuestro problema se optaría por una modelización tridimensional a expensas de su mayor tiempo de ejecución.