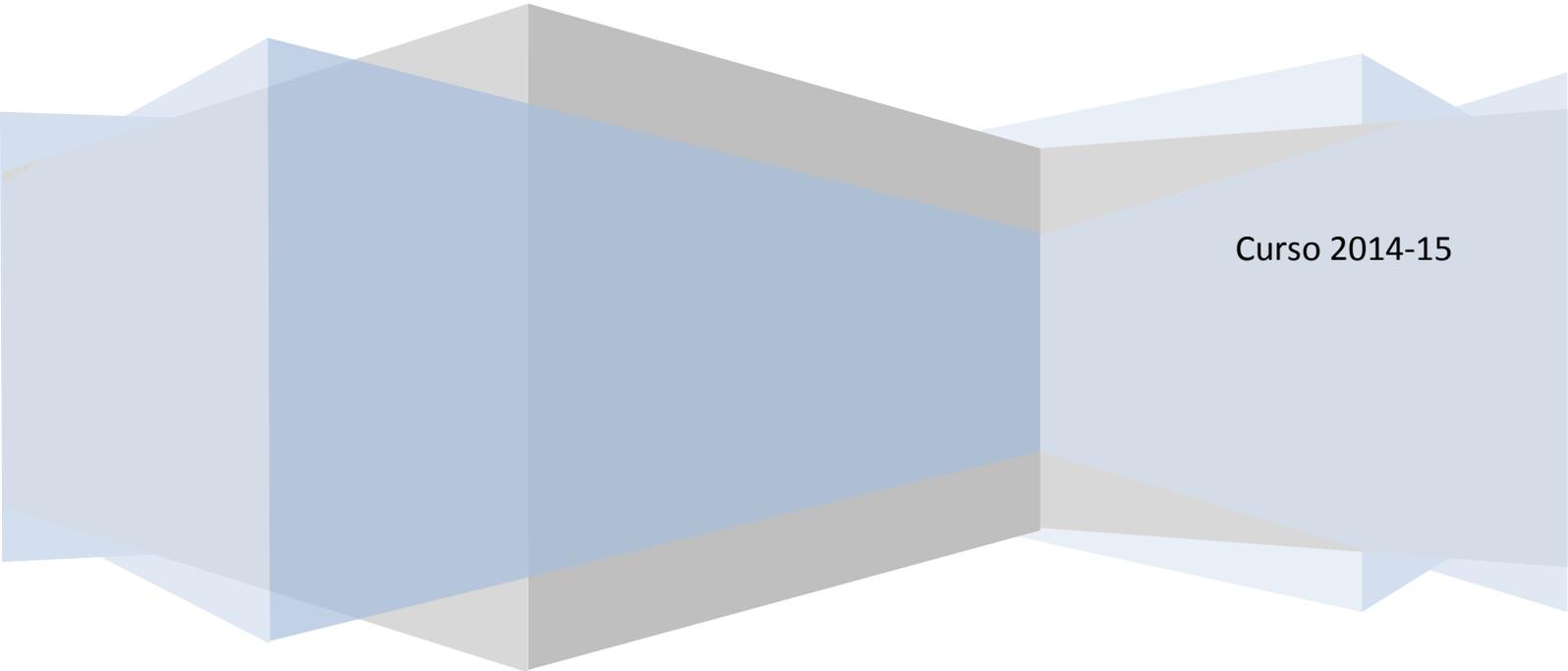


Escola Tècnica Superior d'Enginyers de Camins, Canals i Ports de Barcelona.
Universitat Politècnica de Catalunya.

PROBLEMA S-26

Ingeniería de estructuras

Clara Puy Rodellar



Curso 2014-15

Contenido

1. OBJETIVO DE LA PRÁCTICA.....	3
2. DIMENSIONAMIENTO. HIPÓTESIS INICIAL	4
3. ANÁLISIS BIDIMENSIONAL.....	5
3.1 ASPECTOS TEÓRICOS.....	5
3.2 PRE-PROCESO	6
3.3 POST-PROCESO.....	11
3.4 CONCLUSIONES DEL ANÁLISIS 2D.....	14
4. ANÁLISIS TRIDIMENSIONAL.....	15
4.1 ASPECTOS TEÓRICOS.....	15
4.2 PRE-PROCESO	16
4.3 POST-PROCESO.....	20
4.4 CONCLUSIONES DEL ANÁLISIS 3D	23

1. OBJETIVO DE LA PRÁCTICA

El objetivo de este trabajo es el dimensionamiento y cálculo de una presa homogénea de materiales sueltos de 48 m de altura, 4 m de ancho de coronación, que cumpla con las restricciones geométricas que se indican en la siguiente figura:

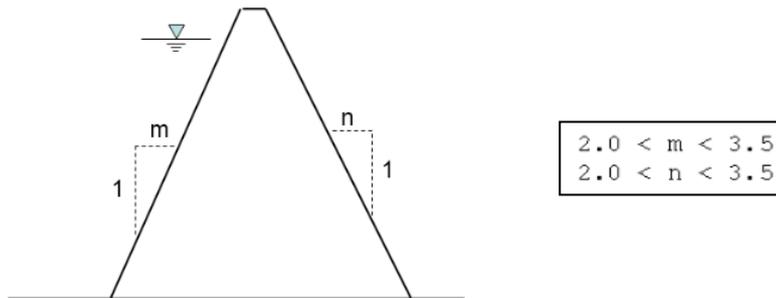


Figura 1. Restricciones geométricas a considerar en el dimensionamiento de la presa.

Se realiza el proyecto mediante un análisis bidimensional y, posteriormente, en 3D con la finalidad de verificar el diseño, utilizando en ambos casos las siguientes consideraciones:

1. Las tracciones máximas en cualquier punto de la presa no deben superar 0,5 MPa.
2. El peso específico del terreno y el material de construcción es de 20000 N/m^3 .
3. El módulo de elasticidad del material a usar es de 9900 KN/m^2 y el coeficiente de Poisson es de 0,285.
4. Base empotrada en el terreno.
5. Cimentación en terreno homogéneo. Módulo de elasticidad de 35 GN/m^2 y el coeficiente de Poisson 0,30.
6. Cargas actuantes:
 - a. Peso propio
 - b. Peso propio + empuje hidrostático en presa y cimentación (altura del agua de 46 m)

El perfil del emplazamiento, sobre el que se ubica la presa, es el que se muestra:

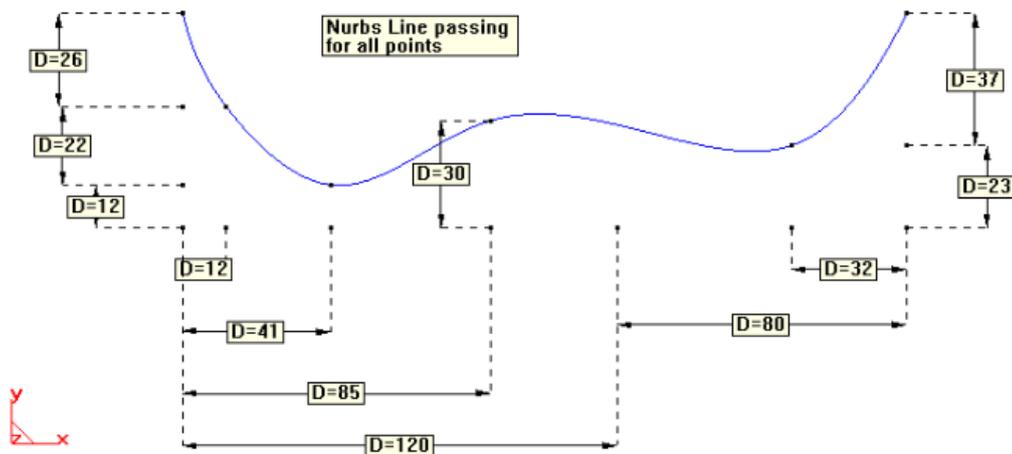


Figura 2. Perfil del terreno sobre el que se emplaza la presa.

Se estudia este emplazamiento con una sección del terreno de 30 m de ancho y un desarrollo de 400 m.

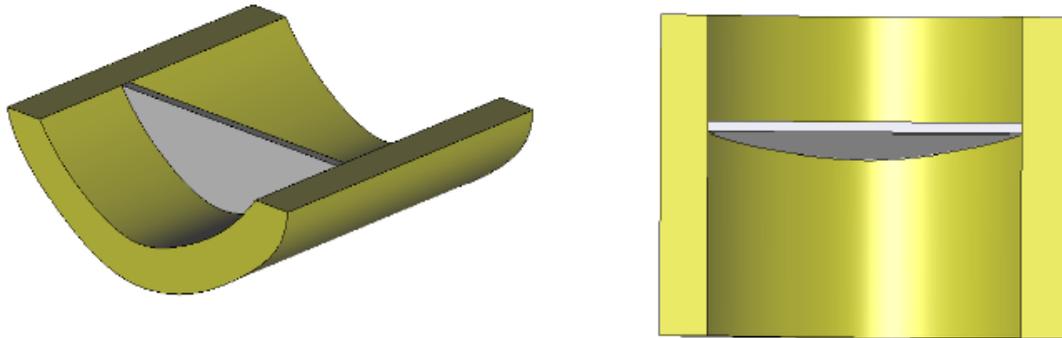


Figura 3. Vistas en 3D y en planta de una presa modelo, similar a la nuestra.

Así, se trata de controlar los valores máximos de tracción a los que está sometida la presa bajo las dos condiciones de carga mencionadas, limitando éstos a 0,5 MPa. Y es que el tipo de materiales que constituyen la presa (materiales sueltos) no están preparados para trabajar a tracción, resultando peligrosos valores superiores de tensión.

2. DIMENSIONAMIENTO. HIPÓTESIS INICIAL

El primer paso para la resolución del problema es el dimensionamiento de la presa, esto es, determinar las pendientes del trasdós e intradós, “m” y “n”, ya que el resto de parámetros geométricos ya están definidos.

Así, previamente a la realización de los análisis bidimensional y tridimensional de la estructura, los cuales se llevan a cabo mediante el uso del software GiD, con su extensión RamSeries Educational desarrollado por CIMNE, se define la geometría del problema.

Con el objetivo de optimizar los recursos, se opta por adoptar los valores mínimos de pendientes “m” y “n” permitidos, es decir, 2 metros en ambos casos. Si para estos valores no se supera la restricción de tracción máxima admisible, el dimensionamiento realizado será el óptimo, pues conlleva el mínimo uso de material y, por tanto, el menor coste económico.

Se muestran a continuación las características geométricas de la presa consideradas en la hipótesis inicial, para la cual se procede a realizar el análisis bidimensional.

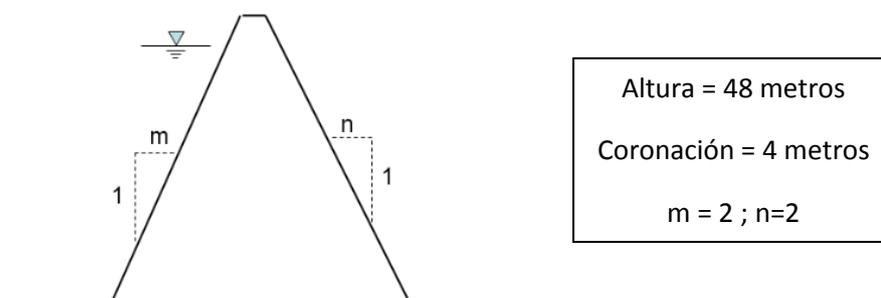


Figura 4. Características geométricas de la presa dimensionada como hipótesis inicial.

En resumen, el dimensionamiento de la presa se realiza en 2D, para posteriormente analizarse los resultados obtenidos con el modelo 3D.

3. ANÁLISIS BIDIMENSIONAL

3.1 ASPECTOS TEÓRICOS

El método de elementos finitos se puede aplicar al análisis estructural si cumple la teoría de elasticidad bidimensional, tensión o deformación plana.

Existe una gran variedad de estructuras de interés práctico dentro de la ingeniería, en las que se puede hacer uso de las hipótesis de la elasticidad bidimensional. Dichas estructuras se caracterizan por tener una forma aproximada de prisma recto, las cuales, atendiendo a la proporción de sus dimensiones, pueden clasificarse en dos tipos:

- *Problema de tensión plana*

Se dice que una estructura prismática está en estado de tensión plana si una de sus dimensiones (espesor) es mucho menor que las otras dos, y sobre ella actúan únicamente cargas contenidas en su plano medio.

Entre los problemas de estructuras que se incluyen dentro de esta categoría se pueden citar: análisis de vigas de gran canto, presas de contrafuertes, placas con cargas en el plano, etc.

- *Problema de deformación plana*

Se dice que una estructura prismática está en estado de deformación plana si una de sus dimensiones (longitud) es mucho mayor que las otras dos, y sobre ella actúan únicamente cargas uniformemente distribuidas a lo largo de toda su longitud y contenidas en planos ortogonales al eje que une los centros de gravedad de sus distintas secciones transversales.

Entre los problemas de estructuras que se incluyen dentro de esta categoría se pueden citar: muros de contención, presas de gravedad, tuberías bajo presión interior, túneles, etc.

Por tanto, para la caracterización del problema que nos acontece, se considera un caso de deformación plana, ya que la presa se puede asumir suficientemente larga con respecto a la sección transversal y las cargas a las que está sometida se reparten uniformemente a lo largo de toda su longitud.

A continuación se presentan algunas de las características fundamentales de la teoría bidimensional:

Campo de desplazamientos

Las características geométricas y cargas de una estructura en estado de deformación plana permiten establecer la hipótesis de que todas las secciones perpendiculares al eje "z" se deforman en su plano y de manera idéntica. Consecuentemente, basta con conocer el comportamiento de cualquiera de dichas secciones. Así, se considera una sección genérica contenida en el plano xy.

El campo de desplazamientos de la sección está definido si se conocen los desplazamientos en las direcciones “x” e “y” de todos sus puntos. Por tanto, el vector desplazamientos de un punto se define como:

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

Donde $u(x, y)$ y $v(x, y)$ son los desplazamientos del punto en las direcciones de los ejes “x” e “y” respectivamente.

Campo de deformaciones

En los problemas de deformación plana, la deformación longitudinal ε_z es nula. Esto lleva a que el vector de deformaciones de un punto se defina como:

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

Campo de tensiones

Se deduce de la ecuación anterior que las tensiones tangenciales τ_{xz} y τ_{yz} son nulas. La deformación ε_z , como ya se ha visto antes, y la tensión σ_z no trabajan, por lo que el vector de tensiones significativas resulta:

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

Principio de Trabajos Virtuales

La expresión del Principio de los Trabajos Virtuales (PTV) para problemas bidimensionales es:

$$\iint_A \delta \boldsymbol{\varepsilon}^T \boldsymbol{\sigma} t dA = \iint_A \delta \mathbf{u}^T \mathbf{b} t dA + \int_l \delta \mathbf{u}^T \mathbf{t} t dl + \sum_{i=1}^n \delta \mathbf{u}^T \mathbf{p}_i$$

3.2 PRE-PROCESO

Geometría

Se empieza definiendo la geometría de la sección transversal de la presa, con los parámetros definidos anteriormente y reflejados en la Figura 4.

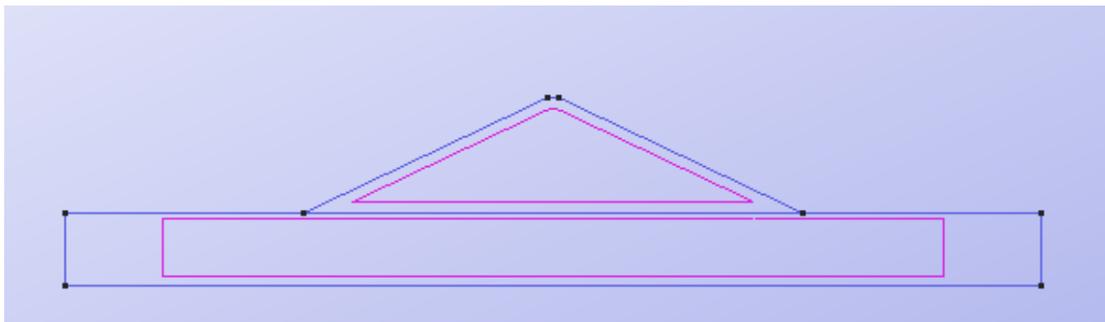


Imagen 1. Visualización de la geometría de la sección transversal de la presa en GiD.

Se diferencian dos partes: el terreno de cimentación con unas dimensiones de 400 m de largo por 30 m de grosor, y la presa situada en medio de dicho terreno, de 48 m de altura, 4 m de ancho de coronación y ambas pendientes 2H:1V.

Condiciones de contorno

La condición de contorno dada por el enunciado es el empotramiento del terreno, esto es, se impone una restricción de desplazamientos en ambas direcciones, "x" e "y", sobre la base inferior del mismo, así como se hace lo propio con el movimiento horizontal en los contornos laterales del terreno.

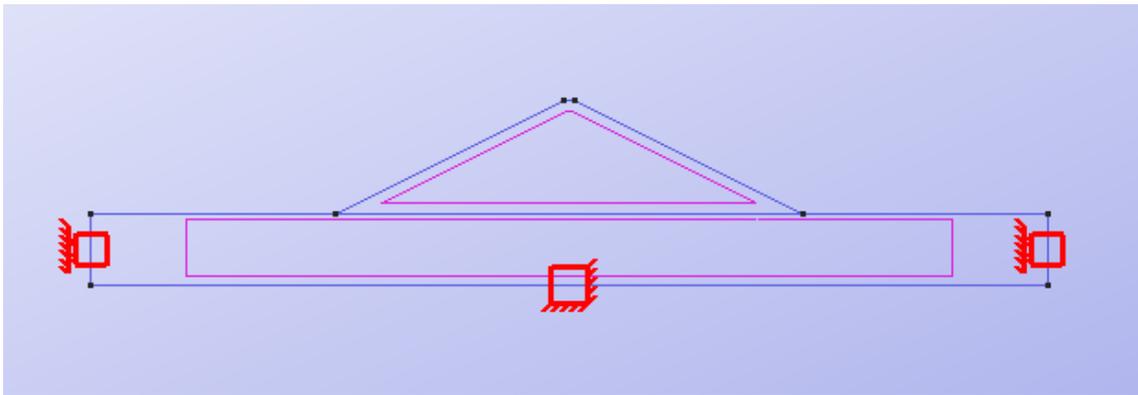


Imagen 2. Visualización en GiD de las condiciones de contorno del problema en 2D.

Materiales

Se crean dos nuevos materiales para cada una de las dos partes que definen el problema (presa y cimentación), con las características mencionadas anteriormente, también reflejadas en las siguientes capturas:

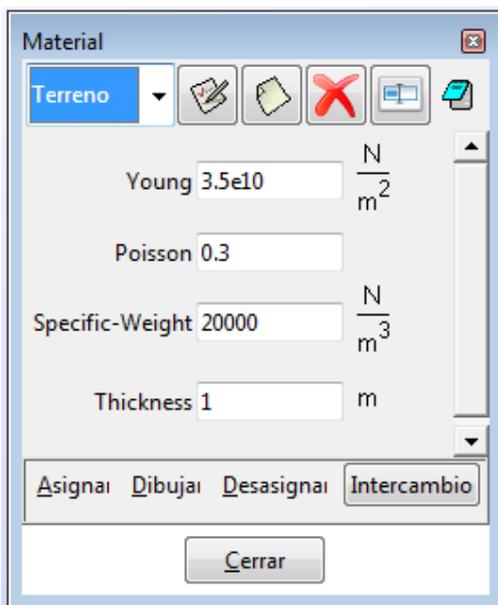


Imagen 3a. Características materiales de la cimentación (terreno).

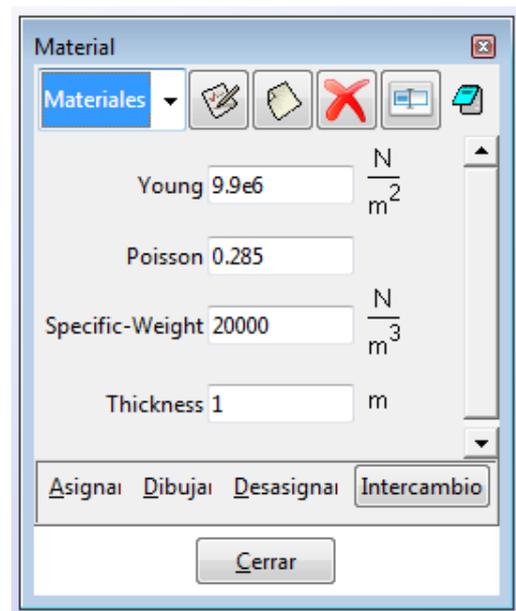


Imagen 3b. Características materiales de la presa (materiales sueltos).

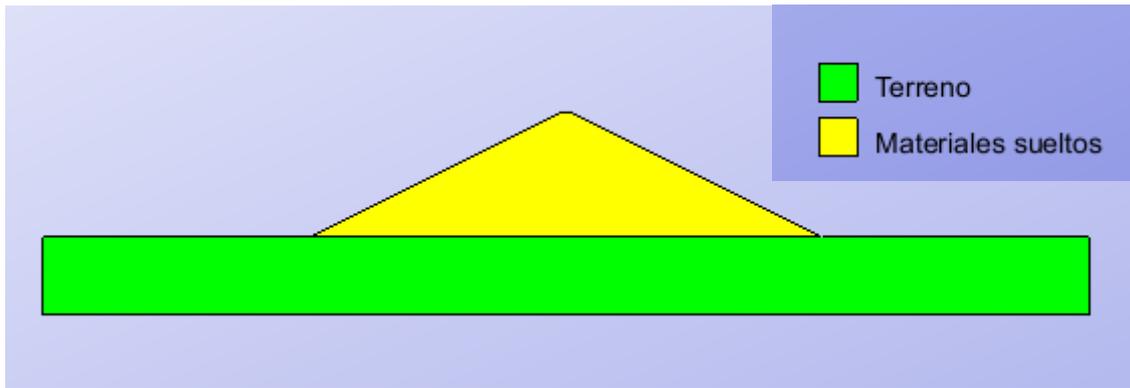


Imagen 4. Características materiales de la estructura del problema en 2D en GiD.

Cargas

Se distinguen dos casos de carga: primero considerando únicamente el peso propio γ , en segundo lugar, aplicando además la carga generada por el empuje hidrostático, la cual a su vez se divide en dos. Por un lado, una carga uniforme sobre el terreno aguas arriba de valor ρgh (donde h es igual a 46 m); y, por otro, una carga lineal sobre la presa aguas arriba que toma el mismo valor ρgh (con h nuevamente igual a 46 m) en la base y 0 a dos metros de coronación.

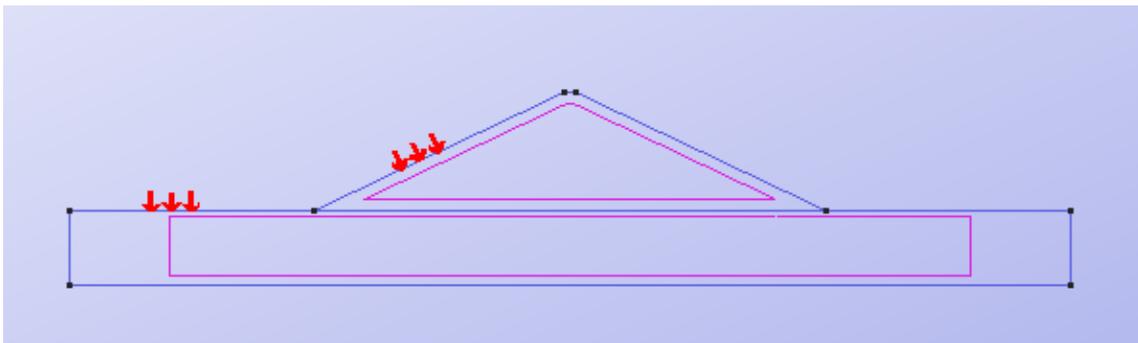


Imagen 5. Cargas actuantes sobre la estructura del problema en 2D en GiD.

Tipo de problema

Tal y como se ha comentado y justificado con anterioridad, se considera un problema de Deformación Plana. Es por ello que, para la implementación en GiD se ha utilizado la opción de *Plane Strain* dentro de la aplicación *RamSeries_2D/PlaneState*.

Mallado

Para llevar a cabo la discretización del problema en una malla de elementos finitos, se realiza un análisis de convergencia de resultados, con el objetivo de determinar qué tipo de elemento es más conveniente utilizar así como el refinamiento de malla más óptimo, el cual proporcione resultados suficientemente exactos sin un coste computacional desproporcionado.

Para ello, se tiene en cuenta la mejor adaptación de los elementos triangulares a una geometría irregular. Así, se plantea utilizar elementos de malla triangulares normales (de 3 nodos por elemento) y cuadráticos (6 nodos por elemento), descartando otras configuraciones menos usadas por aumentar considerablemente el coste computacional.

ANÁLISIS DE CONVERGENCIA

En la siguiente tabla se muestran los resultados de desplazamientos verticales máximos, los cuales se dan en coronación, obtenidos para distintos tamaños y elementos de malla. De un modo más visual, se representan estos valores en las gráficas contiguas, demostrándose la convergencia de resultados.

Caso 1: Peso Propio

- Elementos triangulares de 3 nodos:

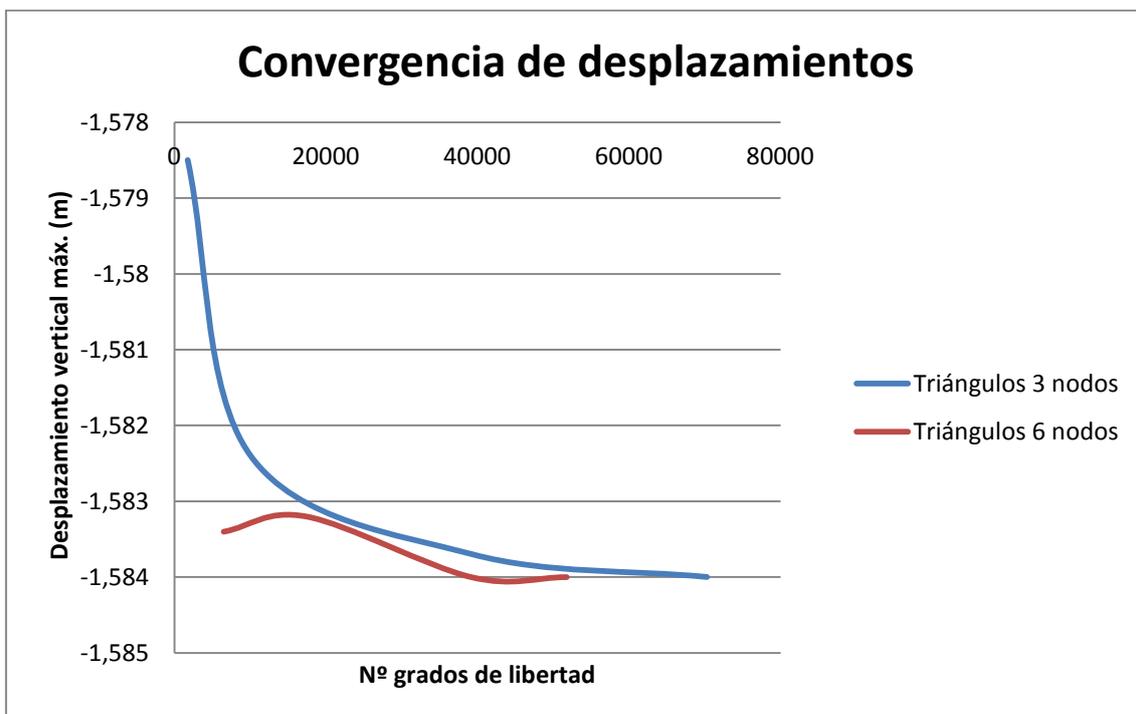
H _{elemento} (m)	Nº Nodos	Nº grados de libertad	U _{y,máx} (m)
5	856	1712	-1,5785
2	5007	10014	-1,5824
1	19645	39290	-1,5837
0,75	35140	70280	-1,584

Tabla 1. Desplazamientos máximos verticales en coronación utilizando elementos triangulares de 3 nodos para el caso de cargas 1 (PP).

- Elementos triangulares de 6 nodos:

H _{elemento} (m)	Nº Nodos	Nº grados de libertad	U _{y,máx} (m)
5	3246	6492	-1,5834
3	8721	17442	-1,5832
2	19583	39166	-1,584
1,75	25888	51776	-1,584

Tabla 2. Desplazamientos máximos verticales en coronación utilizando elementos triangulares de 6 nodos para el caso de cargas 1 (PP).



Gráfica 1. Convergencia de desplazamientos verticales máximos para diferentes configuraciones y tamaños de malla para el caso de cargas 1 (PP).

Caso 2: Peso Propio + Carga hidrostática

- Elementos triangulares de 3 nodos:

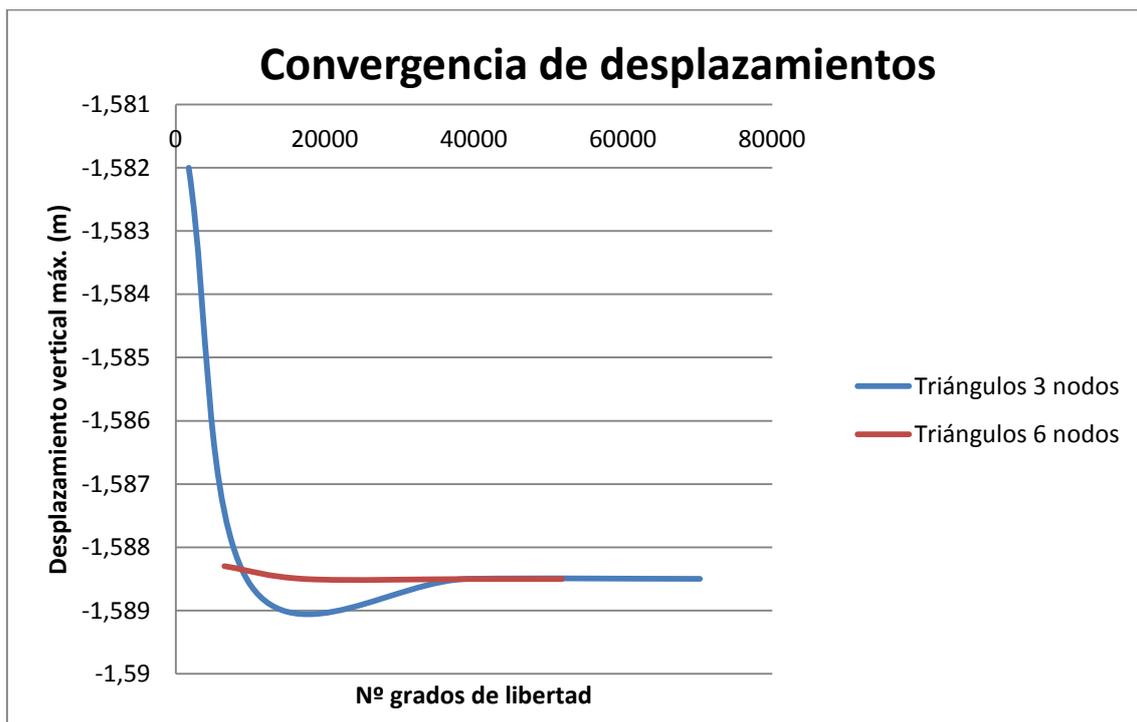
H _{elemento} (m)	Nº Nodos	Nº grados de libertad	U _{y,máx} (m)
5	856	1712	-1,582
2	5007	10014	-1,5886
1	19668	39336	-1,5885
0,75	35140	70280	-1,5885

Tabla 3. Desplazamientos máximos verticales en coronación utilizando elementos triangulares de 3 nodos para el caso de cargas 2 (PP+Hidroestática).

- Elementos triangulares de 6 nodos:

H _{elemento} (m)	Nº Nodos	Nº grados de libertad	U _{y,máx} (m)
5	3246	6492	-1,5883
3	8721	17442	-1,5885
2	19583	39166	-1,5885
1,75	25888	51776	-1,5885

Tabla 4. Desplazamientos máximos verticales en coronación utilizando elementos triangulares de 6 nodos para el caso de cargas 2 (PP+Hidroestática).



Gráfica 2. Convergencia de desplazamientos verticales máximos para diferentes configuraciones y tamaños de malla para el caso de cargas 2 (PP+Hidroestática).

De los resultados y sus respectivos gráficos puede concluirse que ambos elementos funcionan bien, pues presentan convergencia de desplazamientos. Si bien es cierto que, atendiendo meramente al aspecto de velocidad de convergencia, se escogería para la discretización elementos de malla triangulares de 6 nodos, teniendo en cuenta otros aspectos, como por ejemplo el coste computacional requerido así como la imposibilidad de afinar tanto la malla

para el cálculo, se opta por realizar el análisis bidimensional con elementos triangulares de 3 nodos de tamaño 0,75 metros.

Como puede observarse en la siguiente figura, la malla utilizada para los cálculos es suficientemente tupida, por lo que los resultados obtenidos se esperan suficientemente reales.

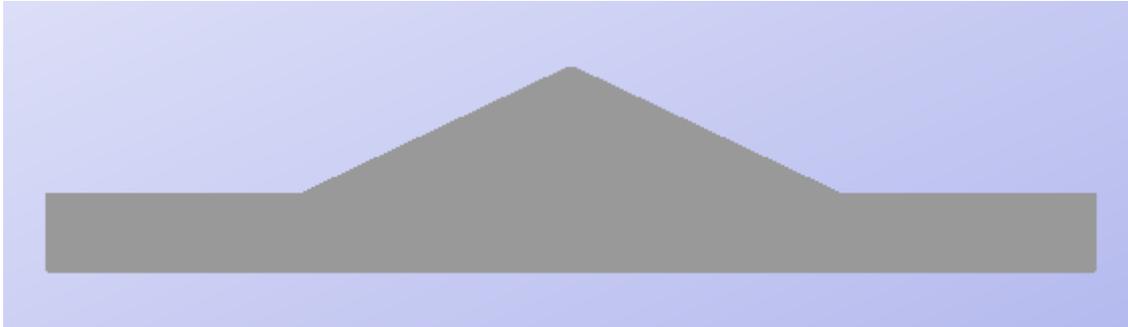


Imagen 6. Malla de cálculo utilizada para el análisis bidimensional.

3.3 POST-PROCESO

Tras la elección del tipo y tamaño de elementos a usar, se procede a calcular y visionar el post-proceso, pudiendo extraer conclusiones de los resultados obtenidos. Como ya se ha comentado, se realizan dos análisis en cuanto a cargas actuantes se refiere: un primer caso donde sólo actúa el peso propio, y un segundo donde actúa tanto ésta como la presión hidrostática producida por una lámina de agua de cota máxima 46 metros.

Caso 1: Peso Propio

➤ Desplazamientos:

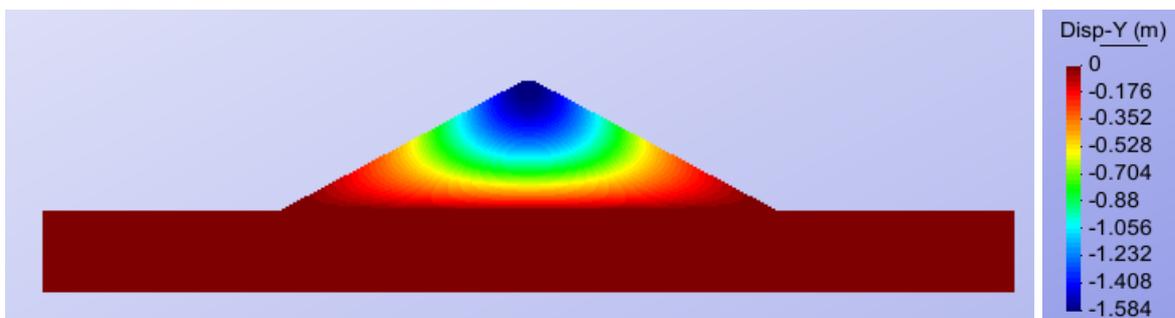


Imagen 7. Desplazamientos verticales producidos en la estructura bajo la acción del peso propio.

La imagen muestra los desplazamientos verticales producidos en la presa y cimentación bajo la acción del peso propio.

Por un lado, puede observarse que los desplazamientos son simétricos, ya que simétrica es la geometría de la placa y, por tanto, también las cargas actuantes, ya que sólo actúa el PP. Además, en la cimentación no se producen desplazamientos, ya que se trata de un material mucho más rígido y resistente (con un módulo de Young de aproximadamente 3 órdenes de magnitud superior). Por último, comentar la coherencia vista en los resultados, puesto que el

máximo desplazamiento vertical se da en coronación, con un valor de 1,6 metros, siendo éste un valor normal para una presa de materiales sueltos y de la magnitud de sus dimensiones.

➤ Tensiones de tracción:

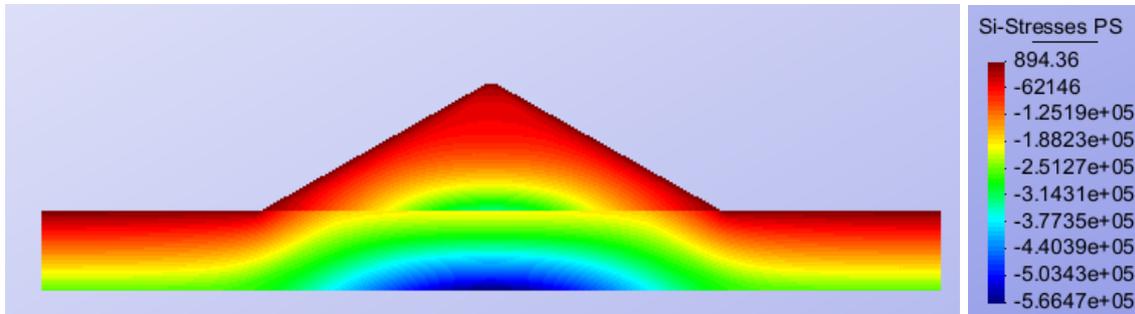


Imagen 8. Tensiones principales σ_1 producidas en la estructura para el caso de cargas 1.

Tal y como puede observarse, para el caso en el que sólo actúa el peso propio, apenas se producen tracciones; puede decirse que la estructura trabaja a compresión, por lo que se cumple holgadamente la restricción de tracción máxima de 0,5 MPa.

Caso 2: Peso Propio + Carga hidrostática

➤ Desplazamientos:

Al existir carga horizontal, debida al empuje hidrostático, deben considerarse tanto los desplazamientos horizontales como verticales.

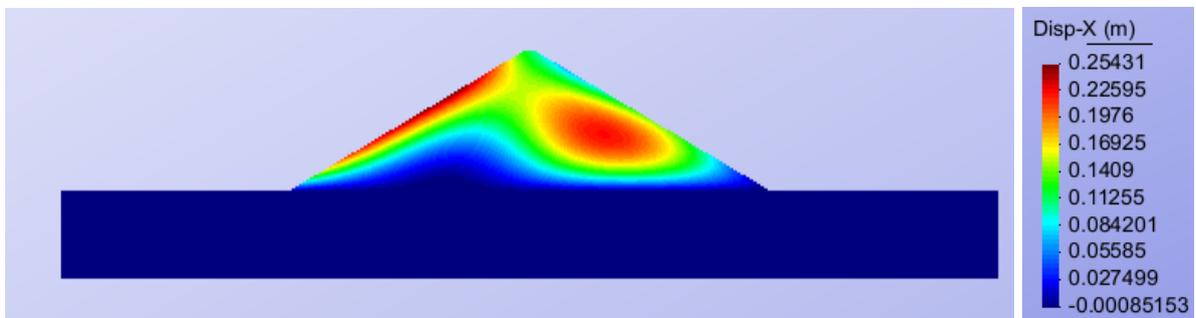


Imagen 9. Desplazamientos horizontales producidos en la estructura para el caso de cargas 2.

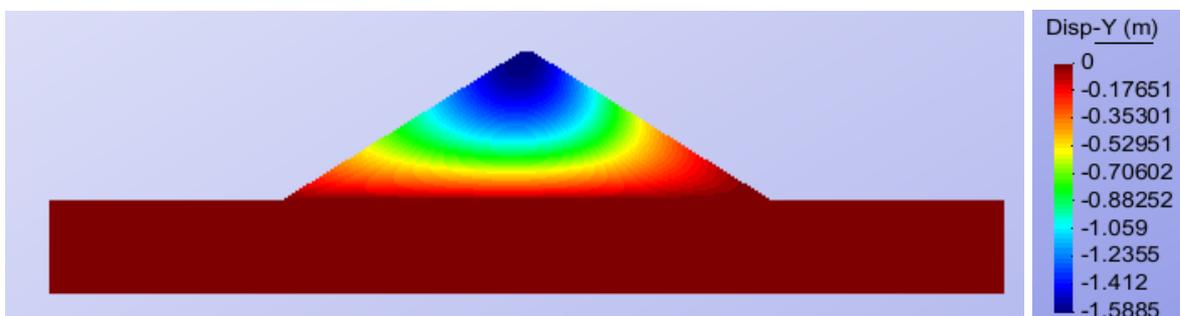


Imagen 10. Desplazamientos verticales producidos en la estructura para el caso de cargas 2.

En referencia a los desplazamientos verticales producidos en la estructura sometida a las cargas de peso propio e hidrostática, puede notarse escasa diferencia en los valores obtenidos con respecto el caso anterior. Sin embargo, son ligeramente superiores aguas arriba de la presa que aguas abajo, pues ahora ya no hay simetría de cargas.

En cuanto a los desplazamientos horizontales, como cabe esperar, los resultados más notorios se dan en la parte de la presa en contacto con el agua y van en dirección del empuje hidrostático, aunque no se consideran valores importantes (el máximo ronda los 25 cm).

➤ Tensiones de tracción:

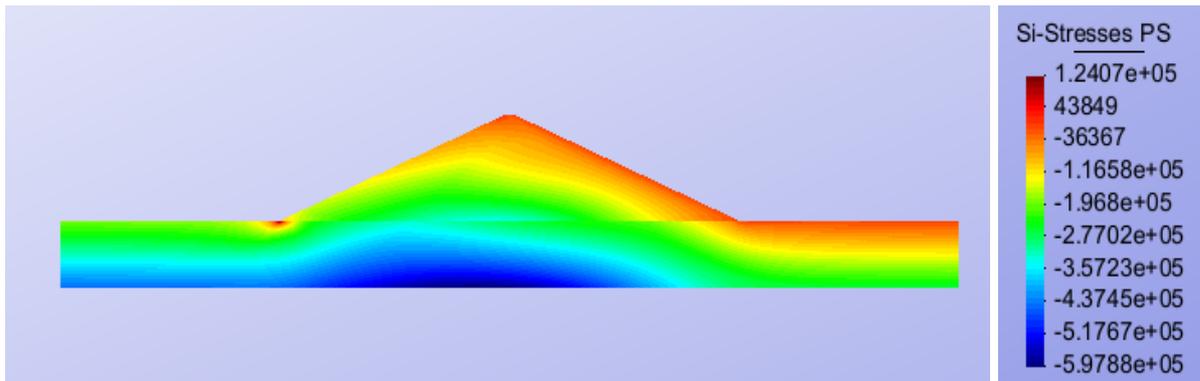


Imagen 11. Tensiones principales σ_1 producidas en la estructura para el caso de cargas 2.

En este caso, tal y como puede observarse, empiezan a aparecer tensiones positivas, es decir, de tracción, las cuales se concentran en el contacto aguas arriba entre presa y terreno, donde aparecen tensiones muy elevadas respecto al resto, aunque en ningún momento superiores a la restricción del enunciado (tensión máxima de tracción de 0,5 MPa).

Aún así, se procede a realizar un estudio más exhaustivo, para determinar si se trata de una zona de tracciones o de una acumulación de tensiones ficticia. Para ello, se hace un refinamiento de malla acusado en la zona conflictiva, aumentando, por el contrario, el tamaño de malla en el resto de la superficie pues queremos centrar el cálculo en el análisis de dicha zona. Así, se ha mallado 10 veces más en esta zona que en el resto, como se muestra en la siguiente figura:

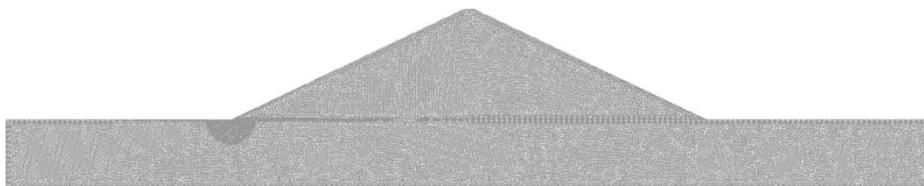


Imagen 12. Refinamiento de malla en la zona de concentración de tensiones.

Los resultados obtenidos son los que se muestran a continuación:

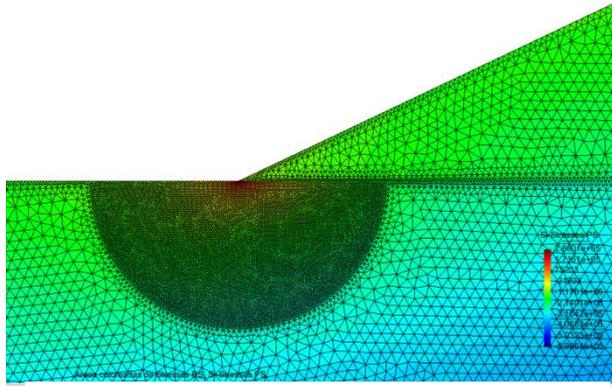


Imagen 13a. Tensiones principales σ_1 en la zona de conflicto tras el nuevo mallado. ZOOM.

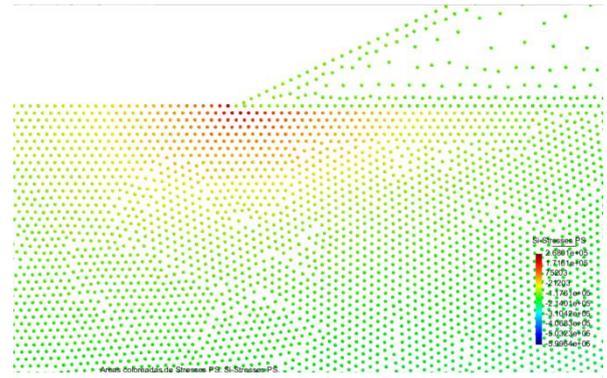


Imagen 13b. Tensiones principales σ_1 en la zona de conflicto tras el nuevo mallado. ZOOM nodos.

Se demuestra que en ningún punto de la presa se supera el límite de tracciones. Tras el estudio de la zona de conflicto, donde mayores tensiones de tracción se producen, se comprueba que sólo en un número muy bajo de puntos del terreno se producen los valores máximos (de 0,268 MPa); nunca en la presa y, como se ha dicho, nunca llegando al valor de la restricción, esto es, 0,5 MPa.

3.4 CONCLUSIONES DEL ANÁLISIS 2D

Se decide llevar a cabo el dimensionamiento de la presa de materiales sueltos a partir del análisis bidimensional para, posteriormente, verificarlo mediante análisis 3D.

Así, se ha tomado como hipótesis inicial de dimensionamiento el valor mínimo admisible por el enunciado, con taludes del paramento aguas abajo y arriba de la presa 2H:1V, es decir, adoptando los valores $m=n=2$, con el objetivo de minimizar los costes económicos de construcción.

Tras el pre-proceso, se procede a analizar los resultados obtenidos, los cuales se consideran coherentes además de admisibles, ya que cumplen con la restricción impuesta en el enunciado, es decir, que las tensiones generadas en la estructura son, para todos los casos, inferiores a 0,5 MPa.

Se han considerado dos casos de estudio en lo que a condiciones de carga se refiere. Un primer caso, en el que sólo actúa el peso propio; y un segundo caso, en el que además actúa la presión hidrostática producida por una lámina de agua de 46 metros de cota. Se ha demostrado que el caso más crítico es el segundo, y es el que se considera para el dimensionamiento.

Por último, señalar que merece especial atención los desplazamientos verticales producidos tras aplicar las cargas, ya que no están muy lejos de alcanzar los 2 metros, valor límite de altura de coronación (ya que la altura de la presa son 48 metros y la lámina de agua alcanza los 46 metros), pudiendo acarrear serios problemas si no se controla.

4. ANÁLISIS TRIDIMENSIONAL

4.1 ASPECTOS TEÓRICOS

Existen muchas estructuras cuyas características geométricas, mecánicas o de cargas no permiten la utilización de modelos de cálculo simplificado, tales como los sólidos bidimensionales o de revolución. En dichos casos es necesario considerar la estructura como un sólido tridimensional y hacer uso para su análisis la teoría general de la elasticidad en tres dimensiones.

La teoría de la elasticidad en tres dimensiones es una generalización de la teoría bidimensional y gran parte de las etapas de un análisis por elementos finitos son repetición del análisis en 2D. Sin embargo, representan un mayor esfuerzo de cálculo por elementos finitos, ya que se considera un tercer grado de libertad (u, v, w).

Ejemplos prácticos de dichas situaciones donde se ha de llevar a cabo un análisis en 3D son estructuras constituidas por sólidos de geometría irregular o propiedades de los materiales heterogéneas. En el caso que acontece sí se ha podido reducir el problema a uno bidimensional, pero lo que se pretende ahora es comparar los resultados que proporcionan ambos modelos, esperando obtener una aproximación más realista ya que su modelación se asemeja más a la realidad.

A continuación se presentan algunas de las características fundamentales de la teoría tridimensional:

Campo de desplazamientos

Sea un sólido tridimensional, el movimiento de un punto en el espacio queda definido por las tres componentes del vector de desplazamientos:

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

Donde u, v y w son los desplazamientos del punto según los ejes cartesianos x, y, z respectivamente.

Campo de deformaciones

Siguiendo la teoría de la elasticidad tridimensional, el vector de deformación en un punto está definido por sus seis componentes como:

$$\boldsymbol{\varepsilon} = [\varepsilon_x \ \varepsilon_y \ \varepsilon_z \ \gamma_{xy} \ \gamma_{xz} \ \gamma_{yz}]^T$$

Donde $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$ son las deformaciones normales y $\gamma_{xy}, \gamma_{xz}, \gamma_{yz}$ las deformaciones tangenciales.

Campo de tensiones

El vector de tensiones en un punto contiene seis componentes obtenidas a partir de las seis respectivas deformaciones, resultando:

$$\boldsymbol{\sigma} = [\sigma_x \quad \sigma_y \quad \sigma_z \quad \tau_{xy} \quad \tau_{xz} \quad \tau_{yz}]^T$$

Donde σ_x , σ_y , σ_z son las tensiones normales y τ_{xy} , τ_{xz} , τ_{yz} las tensiones tangenciales.

Principio de Trabajos Virtuales

La expresión del Principio de los Trabajos Virtuales (PTV) para problemas tridimensionales es:

$$\iiint_V \delta \boldsymbol{\varepsilon}^T \boldsymbol{\sigma} t dV = \iiint_V \delta \mathbf{u}^T \mathbf{b} t dV + \iint_A \delta \mathbf{u}^T \mathbf{t} dA + \sum_{i=1}^n \delta \mathbf{u}^T \mathbf{p}_i$$

4.2 PRE-PROCESO

Geometría

En este caso es necesario tener en cuenta la geometría del terreno, mostrada en la Figura 2 del presente documento, adjuntada al principio del mismo.

Con las herramientas proporcionadas por el aplicativo 3D, se crea una sección del terreno de 30 metros de grosor utilizando línea NURBS y se extruye a lo largo de 400 metros, el desarrollo considerado. Se crea también en uno de sus extremos la sección transversal de la presa, reflejada en la Figura 4. Finalmente, se intersectan ambas geometrías y, tras eliminar las líneas, puntos y superficies sobrantes, se obtiene la geometría del modelo en 3D, el cual se muestra a continuación:

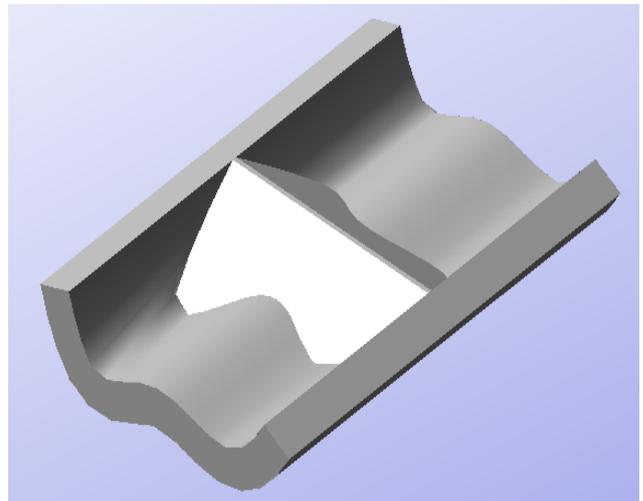
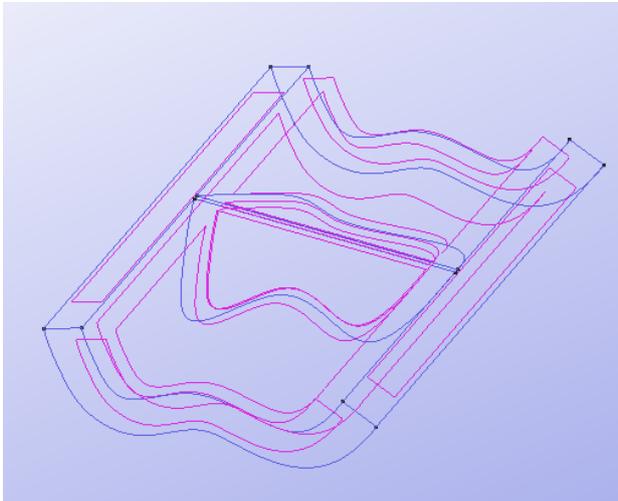


Imagen 14a. Geometría de la presa y terreno en 3D en GiD. Imagen 14b. Geometría de la presa y terreno en 3D en GiD.

Condiciones de contorno

Las condiciones de contorno son las mismas que se han aplicado en el modelo bidimensional, pero adaptadas a las tres dimensiones. Esto es, restricción del movimiento en todas las direcciones ("x", "y", "z") en la superficie inferior de la sección del terreno, y restricción de movimientos en dirección longitudinal "x" en las secciones transversales del mismo, tal y como se indica en la siguiente figura:

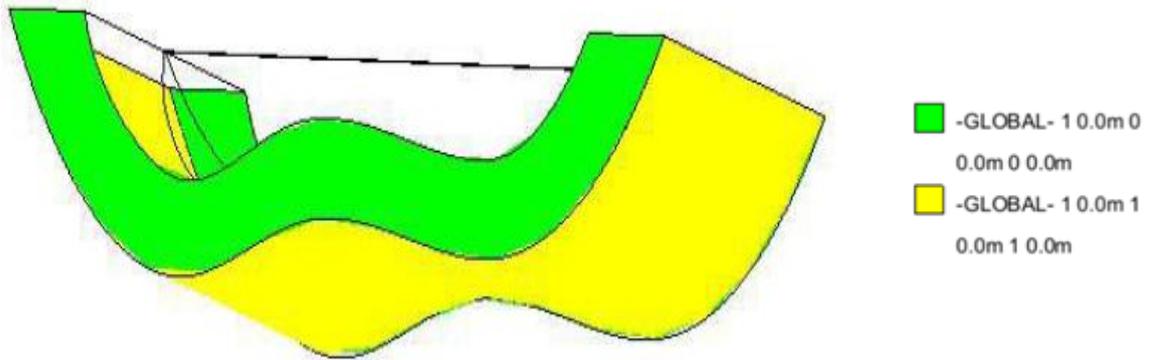


Imagen 15. Condiciones de contorno del problema en 3D en GiD.

Materiales

Análogamente al caso anterior, se introducen los mismos materiales que se habían creado para el modelo bidimensional, uno para la presa de materiales sueltos y otro para el terreno, con las características indicadas en las Imágenes 3b y 3a respectivamente, tal y como se muestra a continuación:

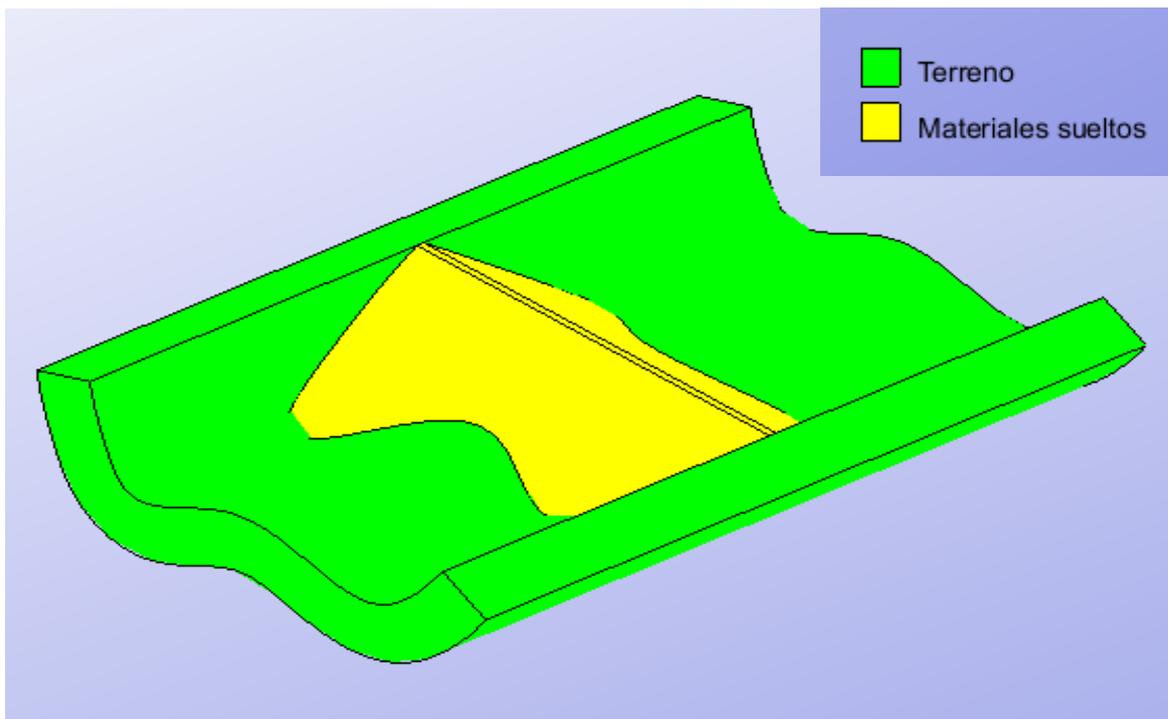


Imagen 16. Características materiales del problema en 3D en GiD.

Cargas

Nuevamente se distinguen dos casos de carga: primero considerando únicamente el peso propio y, en segundo lugar, aplicando además la carga generada por el empuje hidrostático. Esta vez, la aplicación de la carga hidrostática se realiza directamente con el programa, con sólo introducir la altura de la lámina de agua, es decir, 46 metros.

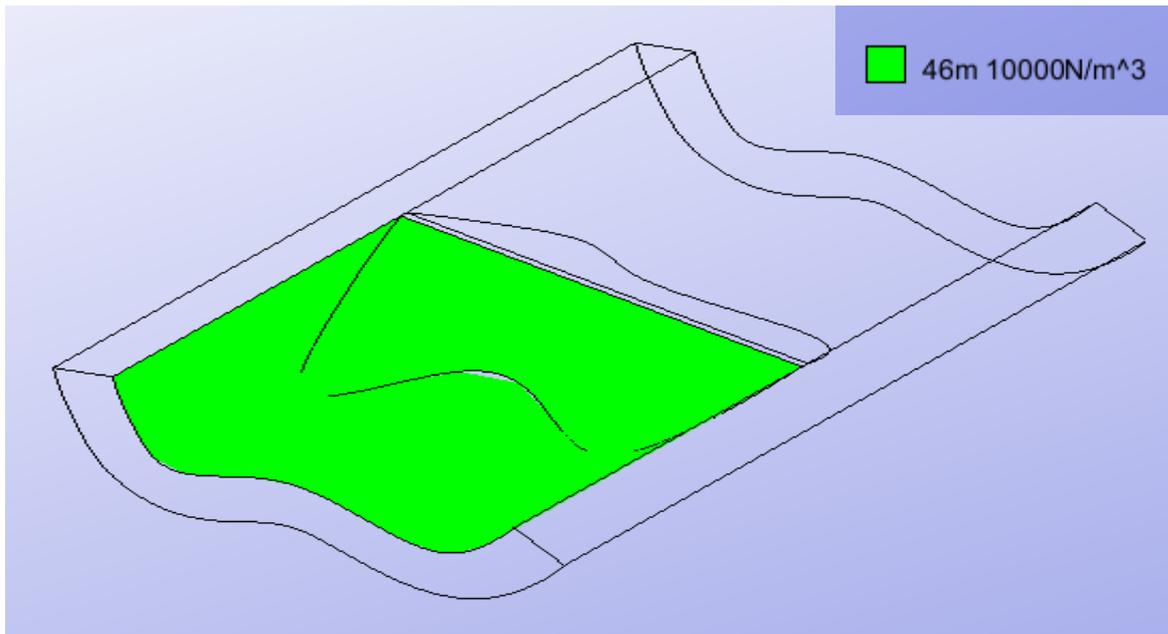


Imagen 17. Cargas actuantes sobre la estructura del problema en 3D en GiD.

Tipo de problema

Para la implementación en GiD se ha utilizado la aplicación *RamSeries_3D*.

Mallado

Para llevar a cabo la discretización del problema en una malla de elementos finitos, se realiza un análisis de convergencia de resultados, con el objetivo de determinar qué tipo de elemento es más conveniente utilizar así como el refinamiento de malla más óptimo, el cual proporcione resultados suficientemente exactos sin un coste computacional desproporcionado.

Además, se tiene en cuenta la mejor adaptación de los elementos tetraédricos, es decir, elementos triangulares en 3D, a una geometría irregular. Así, se plantean utilizar elementos de malla tetraédrica normales (de 4 nodos por elemento) y cuadráticos (10 nodos por elemento), descartando otras configuraciones menos usadas por aumentar considerablemente el coste computacional.

ANÁLISIS DE CONVERGENCIA

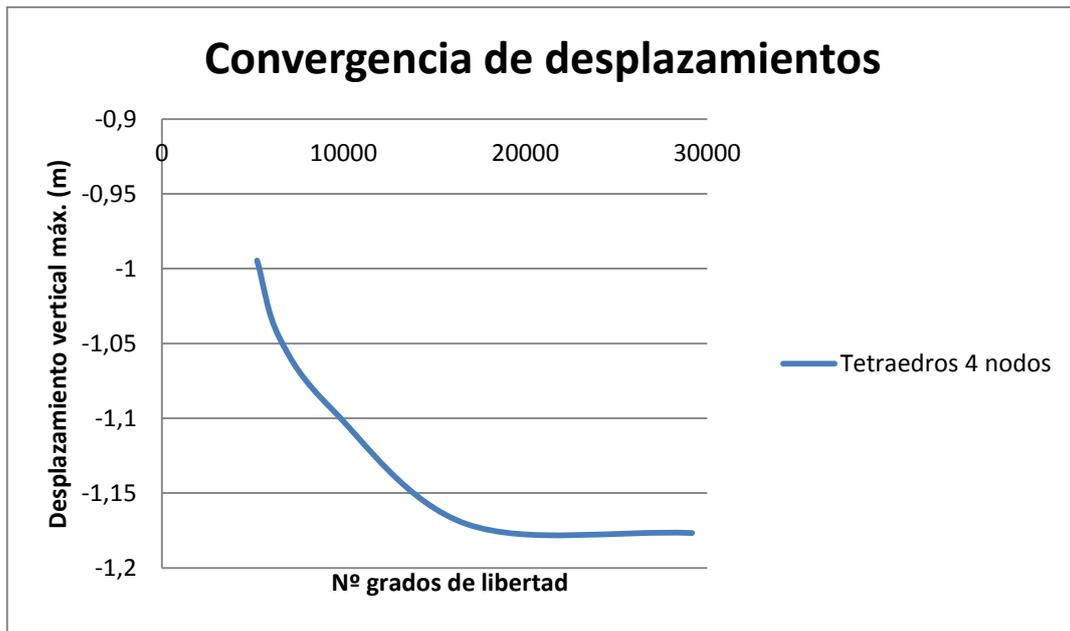
Tras el análisis de convergencia, se detecta un mal comportamiento de los elementos tetraédricos de 6 nodos, los cuales para el número de grados de libertad máximos permitidos por el ordenador, no presentan convergencia. Es por ello, que se muestran en la siguiente tabla los resultados de desplazamientos verticales máximos, los cuales se dan en coronación, obtenidos para distintos tamaños de elemento, utilizando una malla de elementos tetraédricos de 4 nodos. De un modo más visual, se representan estos valores en las gráficas contiguas.

Caso 1: Peso Propio

- Elementos tetraédricos de 4 nodos:

H _{elemento} (m)	Nº Nodos	Nº grados de libertad	U _{z,máx} (m)
25	1744	5232	-0,99453
20	2147	6441	-1,0457
15	3129	9387	-1,0944
12,5	5594	16782	-1,1708
10	9720	29160	-1,1767

Tabla 5. Desplazamientos máximos verticales en coronación utilizando elementos triangulares de 3 nodos para el caso de cargas 1 (PP).



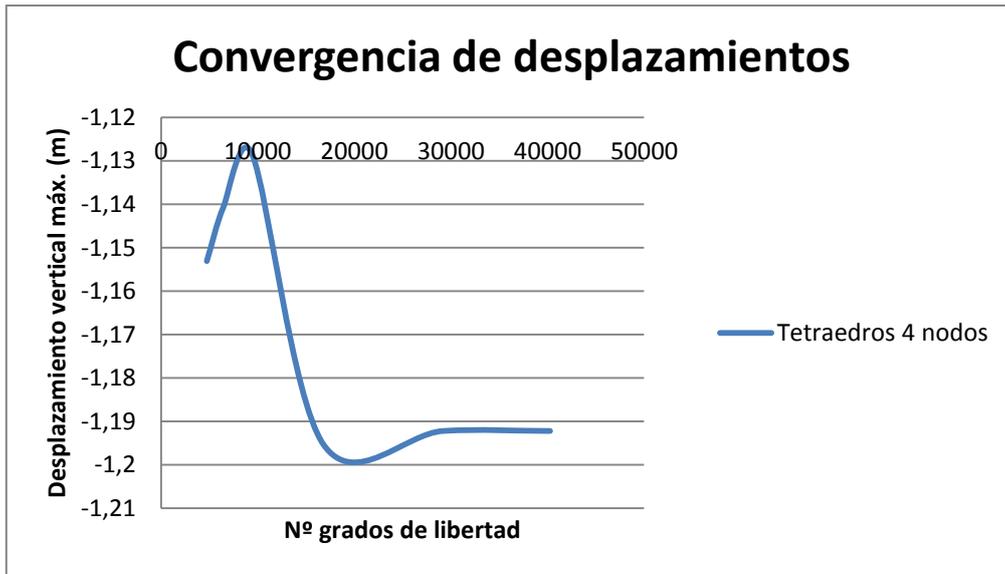
Gráfica 3. Convergencia de desplazamientos verticales máximos para diferentes configuraciones y tamaños de malla para el caso de cargas 1 (PP).

Caso 2: Peso Propio + Carga hidrostática

- Elementos tetraédricos de 4 nodos:

H _{elemento} (m)	Nº Nodos	Nº grados de libertad	U _{y,máx} (m)
25	1570	4710	-1,1531
20	2147	6441	-1,1406
15	3129	9387	-1,1284
12,5	5594	16782	-1,1953
10	9720	29160	-1,1922

Tabla 6. Desplazamientos máximos verticales en coronación utilizando elementos triangulares de 3 nodos para el caso de cargas 2 (PP+Hidrostática).



Gráfica 4. Convergencia de desplazamientos verticales máximos para diferentes configuraciones y tamaños de malla para el caso de cargas 2 (PP+Hidrostática).

4.3 POST-PROCESO

Tras la elección del tipo y tamaño de elementos a usar, se procede a calcular y visionar el post-proceso. Como ya se ha comentado, se realizan dos análisis en cuanto a cargas actuantes se refiere: un primer caso donde sólo actúa el peso propio, y un segundo donde actúa tanto ésta como la presión hidrostática producida por una lámina de agua de cota máxima 46 metros.

Caso 1: Peso Propio

➤ Desplazamientos:

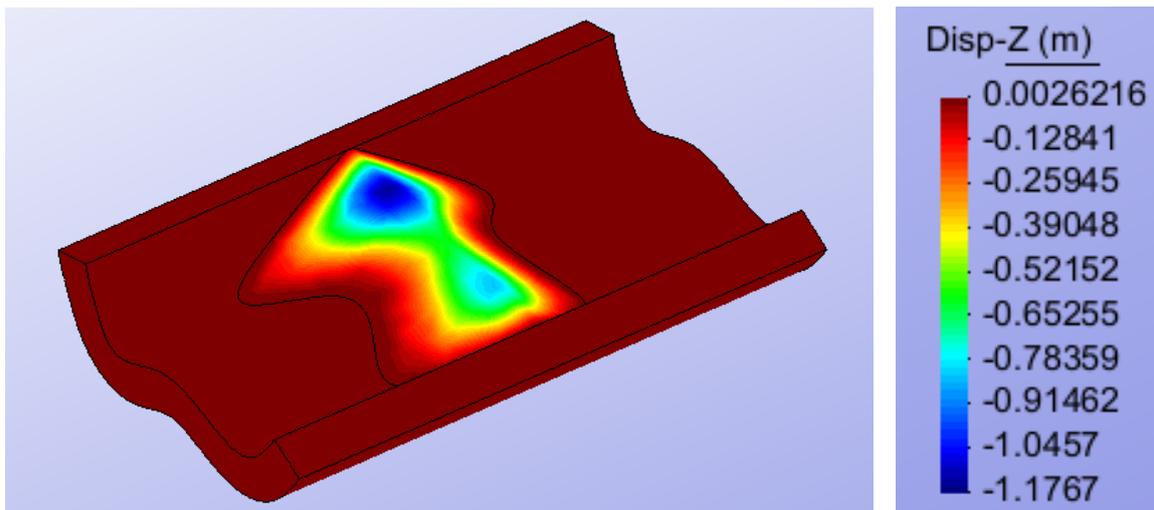


Imagen 18. Desplazamientos verticales producidos en la estructura para el caso de cargas 2.

Como no hay cargas que actúen de forma transversal, sólo se estudia el desplazamiento vertical, debido a la carga de peso propio, ya que sólo se producen desplazamientos en esta

dirección. Dada la simetría de la presa, ya que se ha dimensionado con los mismos taludes de trasdós e intradós, los resultados de desplazamientos también presentan simetría.

Comparando estos resultados, es decir, los del análisis tridimensional con los obtenidos en el bidimensional, se observa una notable disminución de los desplazamientos. Se entiende este comportamiento debido a la acción del terreno que ahora actúa en los laterales de la presa, mientras en el 2D, con la teoría de deformación plana, la longitud se supone infinita.

- Tensiones de tracción:

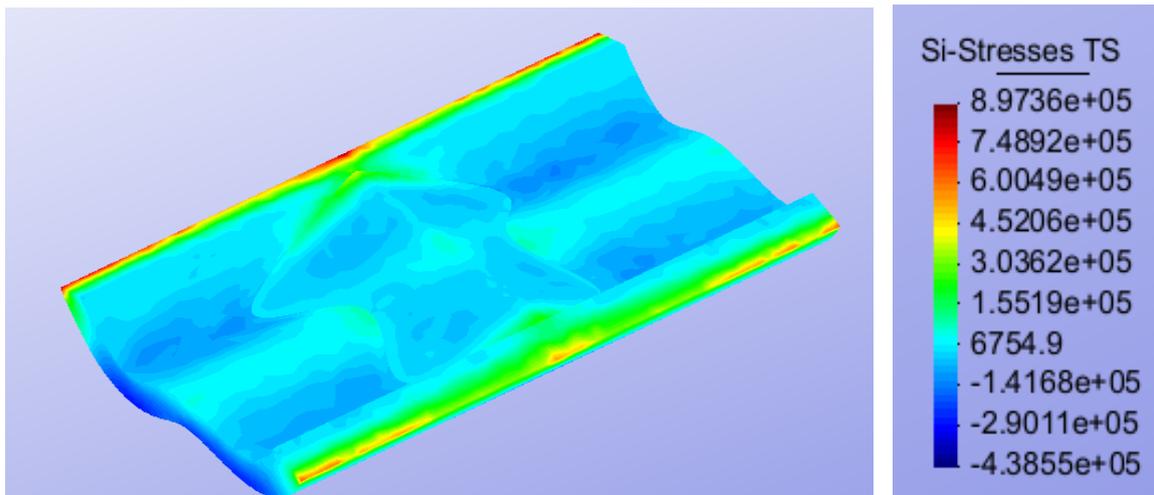


Imagen 19. Tensiones principales σ_1 producidas en la estructura para el caso de cargas

Se comprueba que en ningún punto de la presa se sobrepasan los 0,5 MPa de restricción. Los únicos valores que superan este valor se encuentran en el terreno de la cimentación de la presa. Además, posiblemente estos valores sean ficticios y se trate de una concentración de tensiones debido al corte de terreno irreal que se ha hecho, cuando en realidad éste es continuo.

Caso 2: Peso Propio + Carga hidrostática

- Desplazamientos:

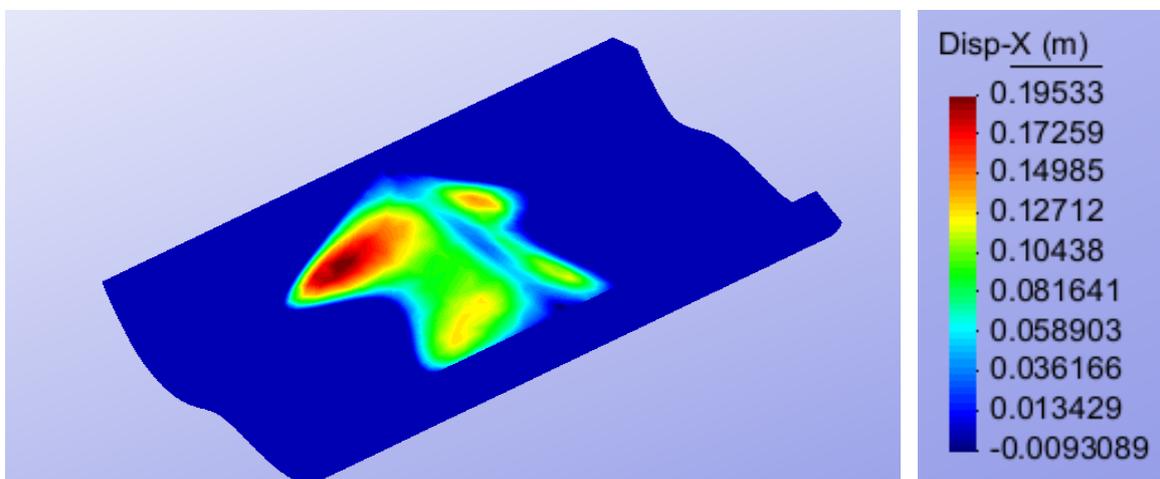


Imagen 20. Desplazamientos horizontales producidos en la estructura para el caso de cargas 2.

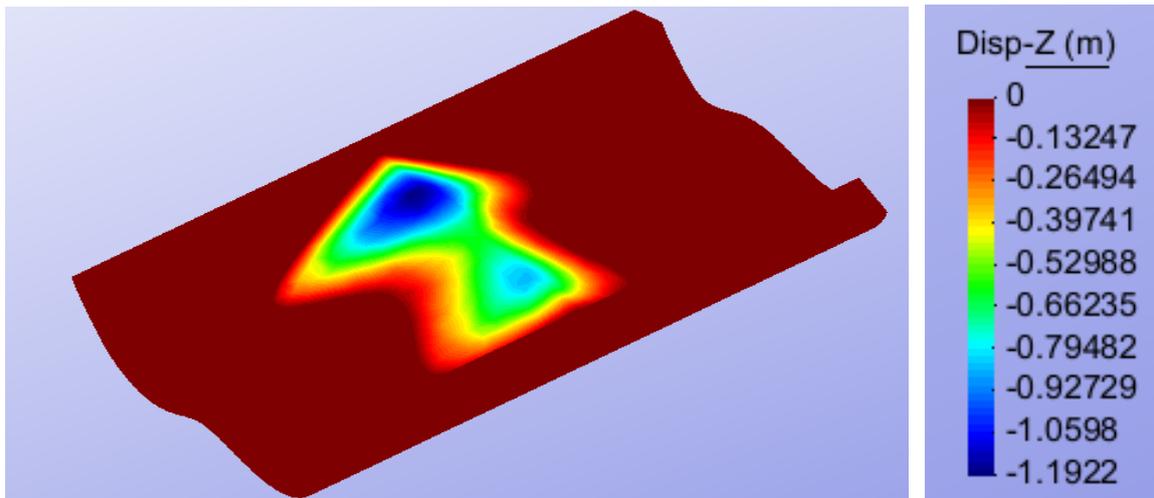


Imagen 21. Desplazamientos verticales producidos en la estructura para el caso de cargas 2.

Del mismo modo que en el caso 1, se han analizado los desplazamientos verticales, en el eje "z", como desplazamientos longitudinales del terreno, que son los transversales de la presa, esto es, en la dirección "x".

Puede observarse que los desplazamientos verticales aumentan considerablemente con la nueva carga y son más pronunciados en la parte de la presa en contacto con el agua.

En cuanto a los desplazamientos en "x", son mayores en la parte de la estructura aguas arriba, obviamente debidos al empuje hidrostático.

➤ Tensiones de tracción:

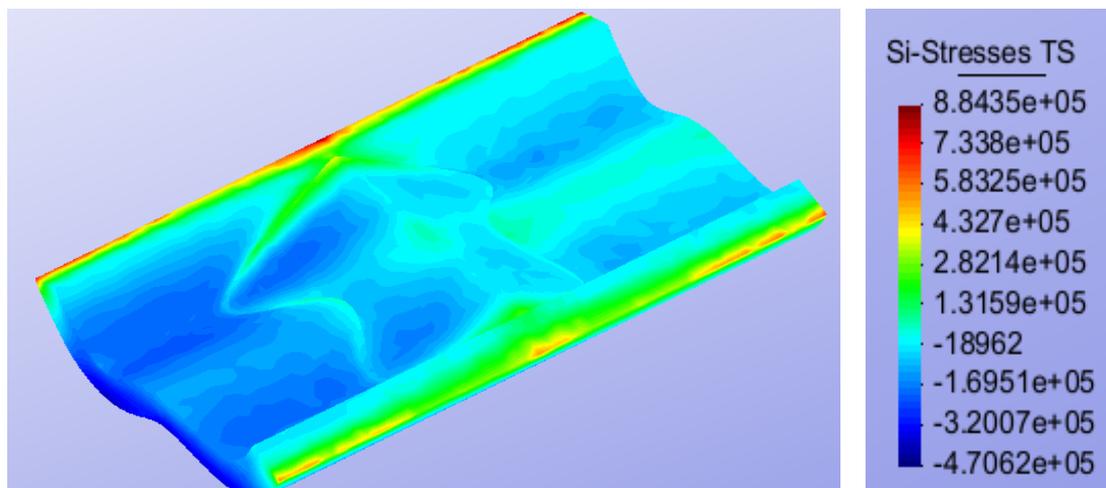


Imagen 22. Tensiones principales σ_1 producidas en la estructura para el caso de cargas 2.

Al igual que ocurre en el caso en el que sólo se considera el peso propio, las tensiones de tracción máximas se sitúan en zonas de concentración de tensiones en los laterales del corte del terreno, y en ningún punto de la presa se producen tensiones superiores a 0,5 MPa, como puede verse en el siguiente zoom. Muestra el contacto superior entre la presa y el terreno.

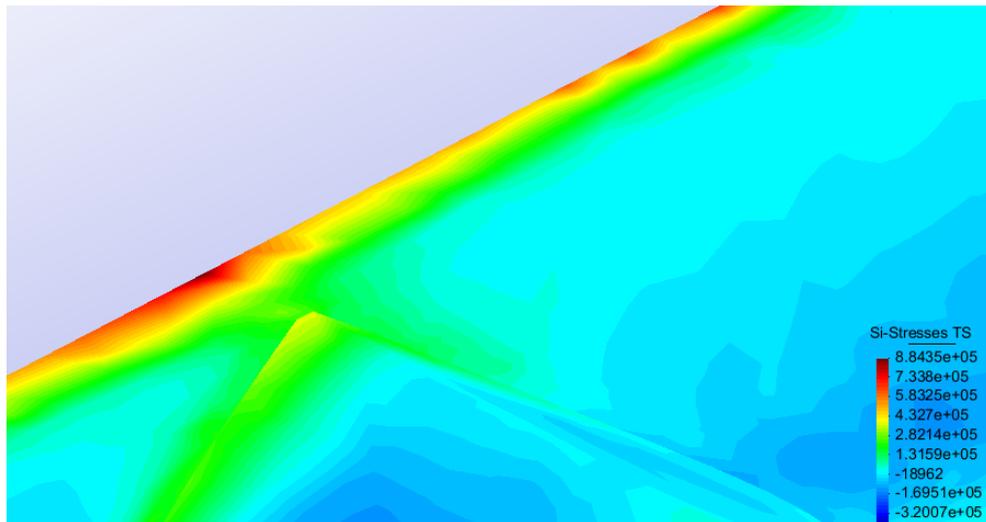


Imagen 23. Tensiones principales σ_1 producidas en la estructura para el caso de cargas 2. ZOOM

4.4 CONCLUSIONES DEL ANÁLISIS 3D

La presa de tierras sueltas objeto del problema es un ejemplo claro de simplificación de un sólido 3D en un análisis bidimensional, aprovechando las características de la presa, adecuada para la implementación de la teoría de deformación plana.

Una vez realizada la verificación del diseño inicial en 2D con un modelo tridimensional, se llega a la primera conclusión de que los estudios tridimensionales permiten tener en cuenta más parámetros y detalles del terreno, los cuales modifican ligeramente la solución obtenida anteriormente.

Se observa que se cumplen las restricciones de tracciones máximas en toda la presa, aunque no tan holgadamente como en el caso en 2D, siendo especialmente críticos los puntos donde la pared de la presa se junta con el terreno. Estos puntos no se podían estudiar antes, ya que no se consideraba la longitud transversal de la presa.

Se puede considerar, por tanto, que el diseño inicial de la presa, adoptando los valores mínimos de pendientes del trasdós e intradós permitidos, es correcto.