



Aplicación del método de elementos finitos PROYECTO FINAL

Ingeniería de Estructuras

José Pablo Sánchez Morales

9 de Junio de 2015



ANÁLISIS ESTRUCTURAL

APLICACIÓN DEL METODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS

José Pablo Sánchez Morales

INDICE

1. INTRODUCCIÓN	4
2. OBJETIVOS	4
3. DISEÑO Y ANALISIS DEL PROBLEMA DP-8	5
3.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	5
3.2 SOLUCIÓN SIN TUNEL	6
3.2.1 PREPROCESO	6
3.2.1.1 Datos del Problema	6
3.2.1.2 Geometría	6
3.2.1.3 Condiciones de contorno	6
3.2.1.4 Cargas y materiales	7
3.2.1.5 Mallado	7
3.2.2 PROCESO	9
3.2.3 POSTPROCESO	9
3.2.3.1 Análisis de convergencia	9
3.2.3.2 Análisis de resultados	11
3.3 SOLUCIÓN CON TUNEL	13
3.3.1 PREPROCESO	13
3.3.1.1 Datos del Problema y condiciones de contorno	13
3.3.1.2 Geometría	13
3.3.1.3 Cargas y Materiales	13
3.3.1.4 Mallado	14
3.3.2 PROCESO	15



3.3.3 POSTPROCESO	15
3.3.3.1 Análisis de convergencia	15
3.3.3.2 Análisis de resultados	16
3.4 CONCLUSIONES	19
4. DISEÑO Y ANALISIS DEL PROBLEMA S-15	21
4.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	21
4.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	22
4.3 ANALISIS BIDIMENSIONAL	22
4.3.1 PREPROCESO	22
4.3.1.1 Datos del Problema	22
4.3.1.2 Geometría	22
4.3.1.3 Condiciones de contorno	23
4.3.1.4 Materiales	23
4.3.1.5 Cargas	24
4.3.1.6 Mallado	25
4.3.2 PROCESO	26
4.3.3 POSTPROCESO	26
4.3.3.1 Análisis de convergencia	26
4.3.3.2 Análisis de resultados	27
4.4 ANALISIS TRIDIMENSIONAL	30
4.4.1 PREPROCESO	30
4.4.1.1 Datos del Problema	30
4.4.1.2 Geometría	30
4.4.1.3 Condiciones de contorno	31
4.4.1.4 Materiales	31
4.4.1.5 Cargas	32
4.4.1.6 Mallado	33



4.4.2 PROCESO	34
4.4.3 POSTPROCESO	34
4.4.3.1 Análisis de convergencia	34
4.4.3.2 Análisis de resultados	35
4.5 CONCLUSIONES	39

1. INTRODUCCIÓN

El área de las estructuras es una rama de la ingeniería que en la actualidad se encuentra en constante crecimiento e investigación. Existen gran diversidad de metodologías para el análisis y diseño de estructuras, estas van desde métodos experimentales y estadísticos hasta métodos simplificados o analíticos.

Los Métodos de Elementos Finitos (de aquí en adelante *MEF*), es una de estas importantes metodologías, la cual permite simular con alto grado de precisión el comportamiento de las estructuras sometidas a cargas de diseño, dándonos a conocer desplazamientos, esfuerzos y deformaciones en el interior de los elementos estructurales.

Los MEF, con ayuda de las altas tecnologías en computación que se viven en la actualidad, se unen para crear gran variedad de software de análisis estructural, y esto se convierte en una valiosa herramienta de fácil aplicación que permite recrear casi cualquier tipo de estructura.

2. OBJETIVOS

En este proyecto se realizará el análisis estructural de dos problemas, que se muestran a continuación, mediante el método de elementos finitos. El objetivo principal es el desarrollar los conocimientos adquiridos sobre la aplicación de herramientas de diseño basadas en la utilización de MEF.

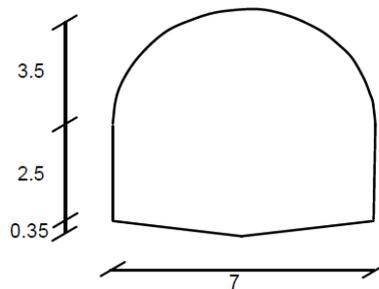
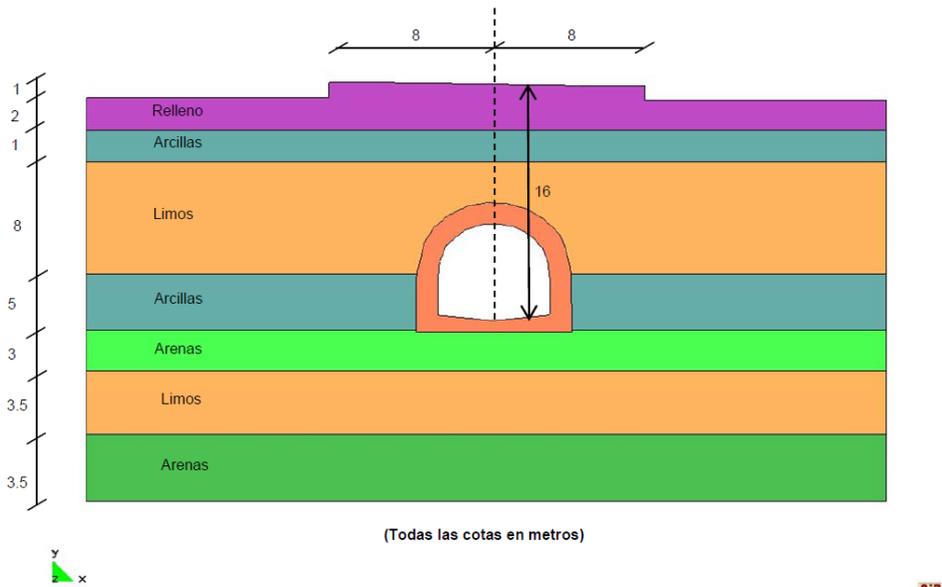
- Problema DP-8: Dimensionar el espesor del refuerzo de hormigón de un túnel para limitar los asentos en superficie por culpa del túnel
- Problema S-15: Dimensionar y calcular una presa de materiales sueltos de 80 m de altura con núcleo de arcilla. Realizar el proyecto mediante un análisis bidimensional y posteriormente en 3D.

3. DISEÑO Y ANALISIS DEL PROBLEMA DP-8

3.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Dimensionar el espesor del refuerzo de hormigón del túnel para limitar los asientos en superficie por culpa del túnel a 1 cm.

El espesor de refuerzo debe ser mayor de 8 cm y las tensiones máximas a compresión/tracción no deben superar los 30/25 Mpa.



- Relleno: $E = 5 \cdot 10^3 \text{ kN/m}^2$; $\nu = 0.2$; $\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$
- Arcillas: $E = 5 \cdot 10^4 \text{ kN/m}^2$; $\nu = 0.2$; $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$
- Limos: $E = 4.5 \cdot 10^4 \text{ kN/m}^2$; $\nu = 0.25$; $\gamma = 20.5 \text{ kN/m}^3$
- Arenas: $E = 4 \cdot 10^4 \text{ kN/m}^2$; $\nu = 0.3$; $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$
- Hormigón: $E = 2 \cdot 10^7 \text{ kN/m}^2$; $\nu = 0.2$; $\gamma = 25 \text{ kN/m}^3$

Para poder medir de forma real los asientos que se producen a consecuencia del túnel, debemos de realizar primero un análisis del terreno, calculando el asiento que sufre, y posteriormente el análisis del terreno con el túnel. De esta forma podremos comprobar con veracidad el comportamiento del problema.

3.2 SOLUCIÓN SIN TUNEL

3.2.1 PREPROCESO

3.2.1.1 Datos del Problema

Para la resolución de este ejercicio se aplicará un problema bidimensional utilizando Ramseries Educativa 2D. Se utilizará la teoría de deformación plana.

3.2.1.2 Geometría

Como no viene dado el ancho del terreno, se usará 40 metros. La geometría es la siguiente:

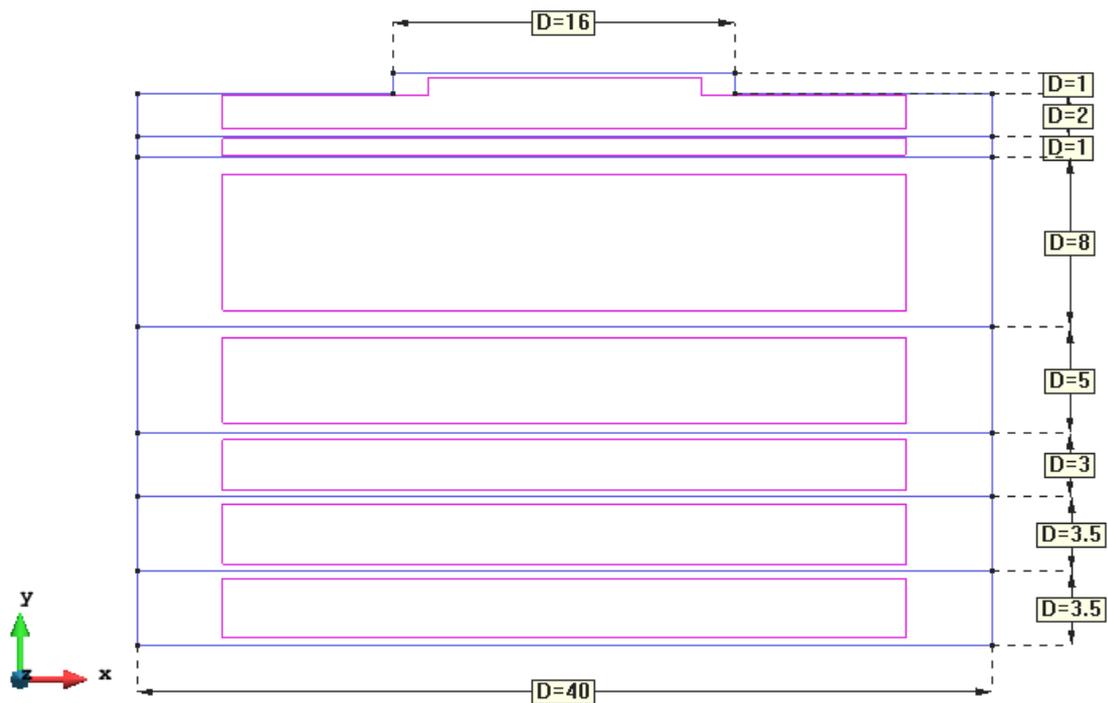


Figura 1. Geometría terreno.

3.2.1.3 Condiciones de contorno

Dentro de las condiciones de contorno se han restringido los ejes X e Y en el fondo del terreno y en los laterales se ha restringido el eje X, permitiendo el movimiento en el eje Y.

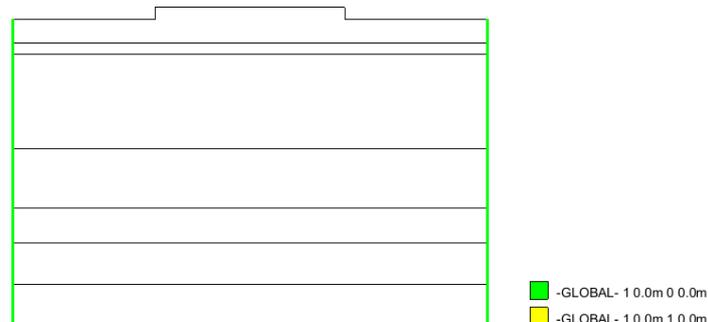


Figura 2. Condiciones de contorno del terreno.

3.2.1.4 Cargas y materiales

Las cargas que se tienen en cuenta para el análisis del terreno son simplemente el peso propio de los distintos materiales que componen la sección del terreno, tal y como indica el enunciado de la práctica. Las propiedades aplicadas a cada capa de material son las propuestas en el enunciado como podemos ver en la figura 3 y 4.

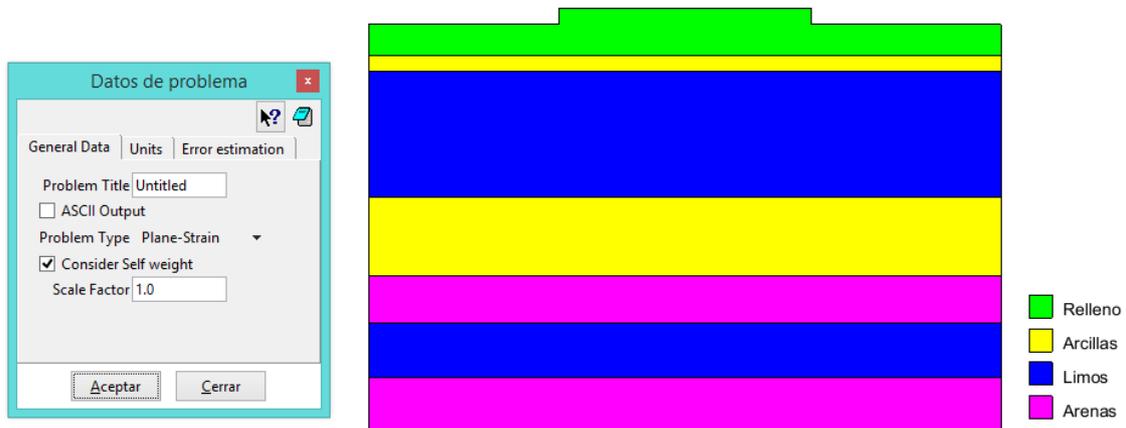


Figura 3. Datos del problema y materiales.

Relleno: $E = 5 \cdot 10^3 \text{ kN/m}^2$; $\nu = 0.2$; $\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$
 Arcillas: $E = 5 \cdot 10^4 \text{ kN/m}^2$; $\nu = 0.2$; $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$
 Limos: $E = 4.5 \cdot 10^4 \text{ kN/m}^2$; $\nu = 0.25$; $\gamma = 20.5 \text{ kN/m}^3$
 Arenas: $E = 4 \cdot 10^4 \text{ kN/m}^2$; $\nu = 0.3$; $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$
 Hormigón: $E = 2 \cdot 10^7 \text{ kN/m}^2$; $\nu = 0.2$; $\gamma = 25 \text{ kN/m}^3$

Figura 4. Características de los materiales.

3.2.1.5 Mallado

A priori se utilizará un mallado mediante elementos triangulares DKT (3 nodos) para el análisis de nuestro problema, utilizando cuatro espesores de malla diferentes (2 m, 1 m, 0.5 m, 0.25 m y 0.2 m). Para obtener los resultados más próximos al verdadero comportamiento del terreno y el refinamiento de malla más adecuado, en el apartado de post-proceso, se realizará un estudio de la convergencia de las mallas con diferentes elementos y tamaños.

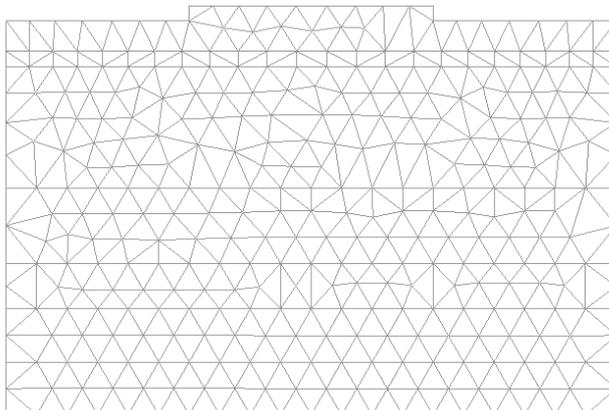


Figura 5. Malla espesor 2 m.

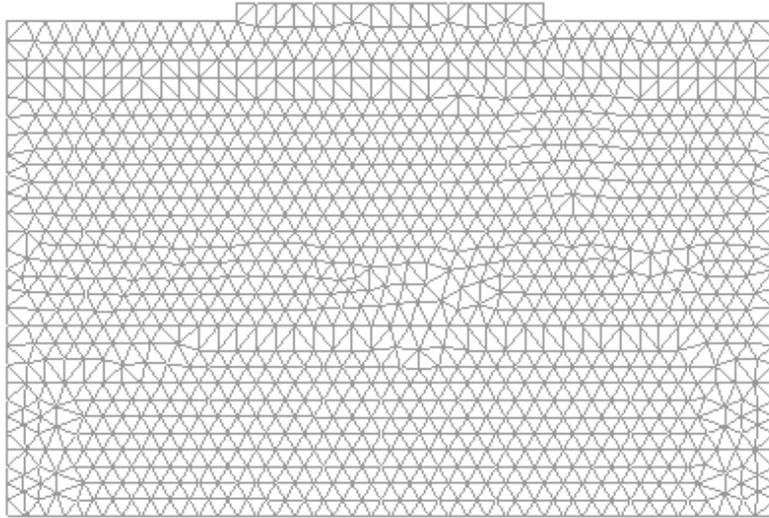


Figura 6. Malla espesor 1 m.

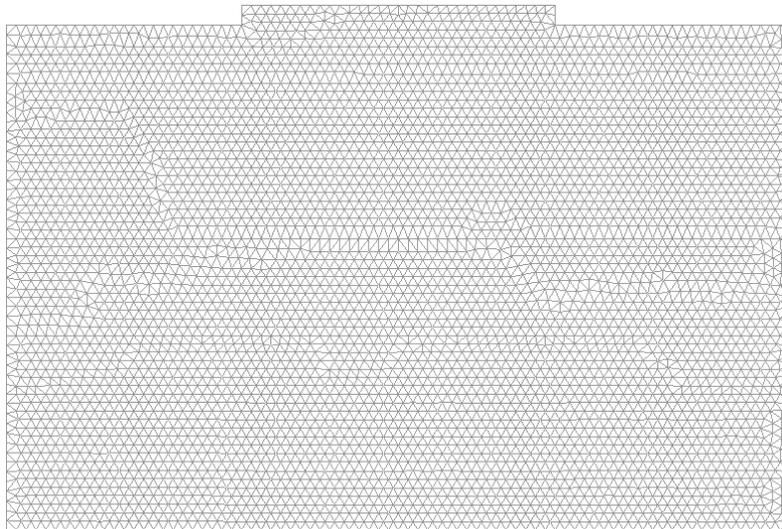


Figura 7. Malla espesor 0.5 m.



Figura 8. Malla espesor 0.25 m.



Figura 9. Malla espesor 0.2 m.

3.2.2 PROCESO

Después de la asignación de la malla, se procede al cálculo. Este proceso lo realiza el programa “Ramseries Educational 2D”.

3.2.3 POSTPROCESO

3.2.3.1 Análisis de convergencia

Para obtener unos resultados fiables es necesario escoger un tipo de malla óptima que nos proporcione unos resultados adecuados, lo más próximos a la realidad. Esto es debido a que en el MEF no todos los tipos de malla generan resultados óptimos. Por ello, en este apartado se realizara el análisis de convergencia de distintas mallas donde se visualice de una manera rápida y homogénea que tipo de malla se acerca a resultados más veraces.

La convergencia se realizará a partir de los desplazamientos en el eje Y, inducidos por el peso propio de los materiales de los estratos que forman el global del terreno. La convergencia mediante el desplazamiento en el eje Y es adecuada, ya que la finalidad de este ejercicio es analizar los asientos que se producen en el terreno con y sin túnel, y los asientos se miden con dichos desplazamientos (eje Y).

En este análisis, se estudiaran tres tipos de mallas compuestas de diferentes elementos que serán: malla de elementos DKT (elementos triangulares lineales, 3 nodos), malla de elementos de Reissner-Mindlin (elementos triangulares cuadráticos, 6 nodos) y malla de elementos CLLL (elementos cuadriláteros lineales, 4 nodos). Se han analizado las mallas para 5 tamaños de elementos que han sido: 2 m, 1 m, 0,5 m, 0,25m y 0,2 m.

En las próximas imágenes se pueden observar a modo de ejemplo el aspecto de tres mallas entre todas las analizadas. En la **tabla 1** se recogen los desplazamientos en Y obtenidos en cada tipo de malla. El **gráfico 1** presenta los datos de convergencia obtenidos en la tabla 1.

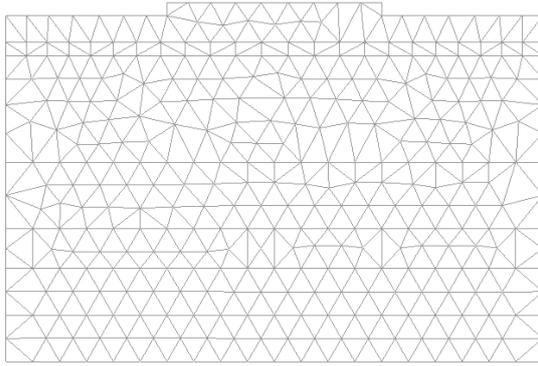


Figura 10. Malla de elementos DKT (2 m).

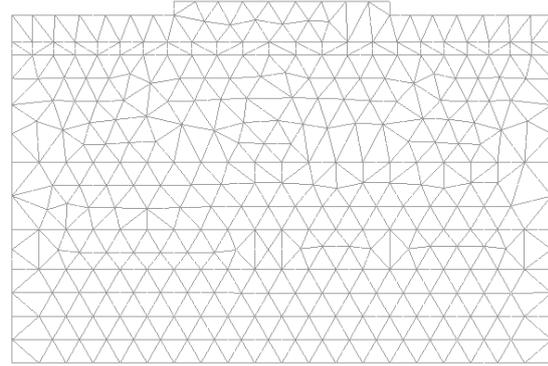


Figura 11. Malla de elementos Reissner Mindlin(2 m).

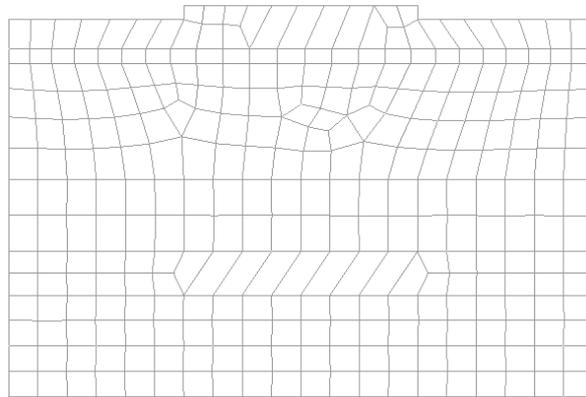


Figura 12. Malla de elementos CLL(espesor 2 m).

Convergencia de desplazamientos eje Y					
Tipo de malla	Tamaño elementos	Número de elementos	Numero de nodos	Nº grados de libertad	Desplazamiento Y (m)
Elementos triangulares DKT	2,00	635	355	710	-0,14408
	1,00	2282	1210	2420	-0,1447
	0,50	9346	4808	9616	-0,14412
	0,25	38162	19350	38700	-0,14408
	0,20	60148	30409	60818	-0,14406
Elementos triangulares Reissner Mindlin	2,00	635	1344	2688	-0,14407
	1,00	2282	4701	9402	-0,14406
	0,50	9346	18961	37922	-0,14406
	0,25	38162	76861	153722	-
	0,20	60148	120965	241930	-
Elementos cuadriláteros CLLL	2,00	299	337	674	-0,14626
	1,00	1079	1148	2296	-0,14405
	0,50	4405	4540	9080	-0,14406
	0,25	18146	18415	36830	-0,14406
	0,20	29103	29438	58876	-0,14407

Tabla 1. Tabla de datos de convergencia de mallas.

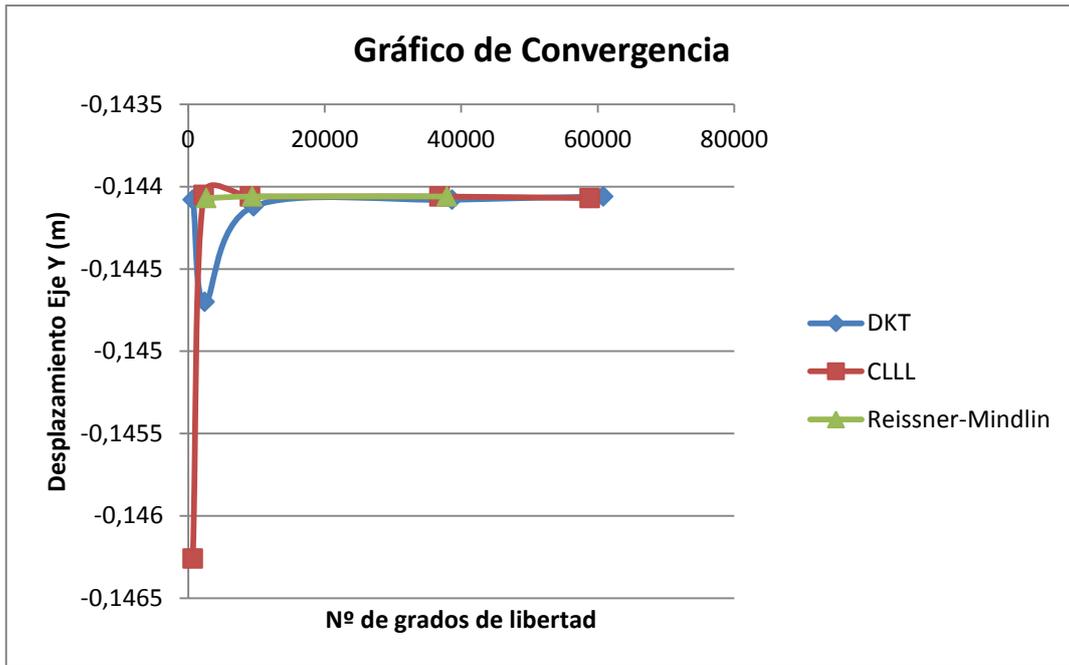


Gráfico 1. Gráfico de convergencia de mallas.

Si analizamos la tabla y el gráfico de convergencia se aprecia que las mallas de Reissner Mindlin y la CLLL son las que convergen más rápido en el resultado de desplazamiento en el eje Y -0,14406 m. La que más rápido converge hacia el citado resultado es la malla de Reissner Mindlin con 1 m de refinamiento, ya que resuelve el problema con un mayor número de nodos, este hecho también ocasionada que no sea posible el cálculo de resultados para un refinamiento de malla Reissner-Mindlin inferior a 0,5 m, debido a que el ordenador tiene problemas para procesar ese elevado número de nodos. Como podemos ver con las tres mallas de distintos elementos se ha obtenido un mismo desplazamiento Y de -0,14406 m, solamente que para mientras para la malla de elementos Reissner Mindlin ha convergido en un refinamiento de 1 m, para malla de elementos CLLL ha convergido con un refinamiento de malla de 0,5 m, y para malla de elementos DKT con un refinamiento de 0,2 m. Finalmente para el análisis de resultados se utilizará la malla de elementos DKT de refinamiento 0,2 m, simplemente por el hecho de que fue como se realizó en un principio el ejercicio, antes de comprobar que las mallas de diferentes elementos convergían en la misma solución.

3.2.3.2 Análisis de resultados

Una vez conocida la malla a utilizar para el cálculo del problema, se procede a dicho cálculo y a la obtención de resultados.

En nuestro caso, buscamos el desplazamiento en el eje Y que sufre el terreno, para determinar el asentamiento inicial antes del túnel y de esta forma comparar los resultados con los datos que se obtendrán una vez que se incluya el túnel.

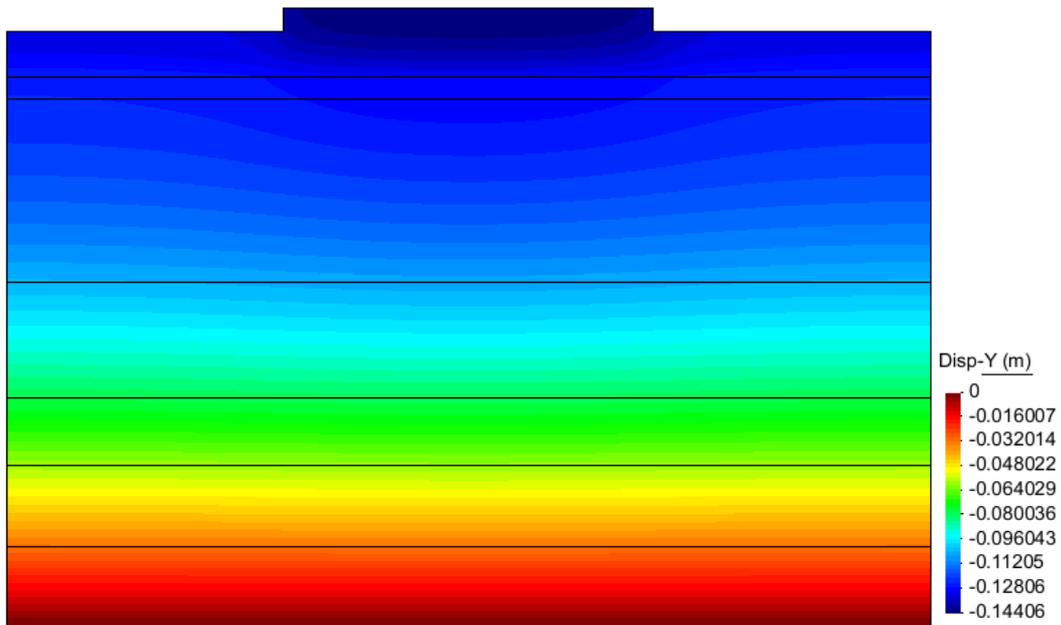


Figura 13. Desplazamientos en el eje Y.

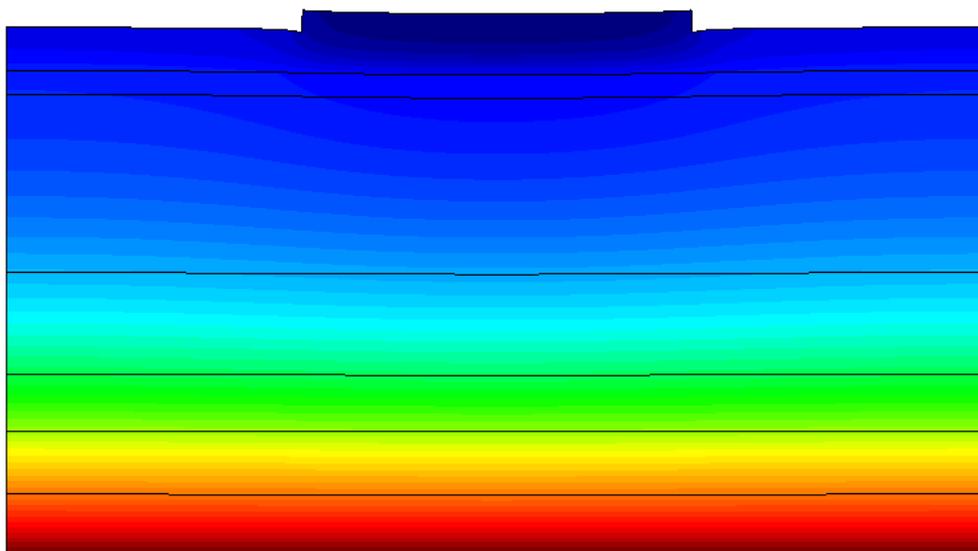


Figura 14. Deformación del terreno.

El desplazamiento de asiento máximo que se produce en la superficie del terreno es -0,14406 m. Como podemos ver en la imagen de deformada y desplazamiento Y, no se produce ningún desplazamiento positivo en el perfil del terreno, sino que a medida que los estratos son más superficiales, los asientos son mas considerables.

3.3 SOLUCIÓN CON TUNEL

3.3.1 PREPROCESO

3.3.1.1 Datos del Problema y condiciones de contorno

Los datos del problema y las condiciones de contorno son las mismas para el caso del problema con y sin túnel, es decir, se trata de un problema bidimensional y deformación plana. Con respecto a las condiciones de contorno se empotra la base del terreno restringiendo los ejes X e Y, y en los laterales del perfil se restringe el desplazamiento en el eje X.

3.3.1.2 Geometría

Tal y como se pide en el enunciado debemos de dimensionar el espesor del refuerzo del túnel para limitar los asentamientos a causa de este a 1 cm.

Como dimensionamiento debe de ser superior a 8 cm, aplicaremos un espesor de 10 cm y comprobaremos que cumple con los asentamientos y tensiones asignadas en el enunciado.

Con respecto a la geometría del terreno, será la misma que se aplicó en el caso anterior, del terreno sin túnel.

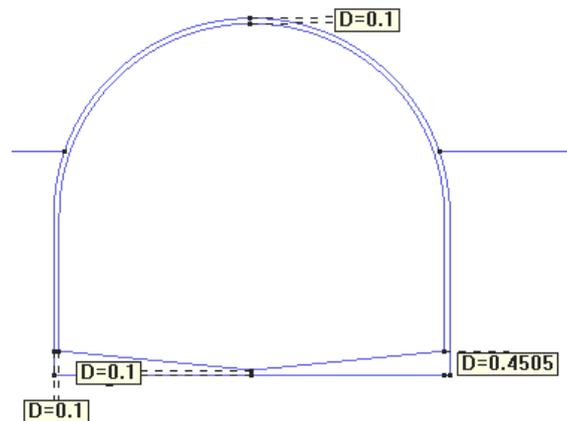


Figura 15. Geometría del túnel.

3.3.1.3 Cargas y Materiales

Como en el caso anterior, del terreno sin túnel, las cargas que se tienen en cuenta son las del peso propio de los materiales. Los materiales que componen el terreno son los mismos, pero se le añade el hormigón del túnel.

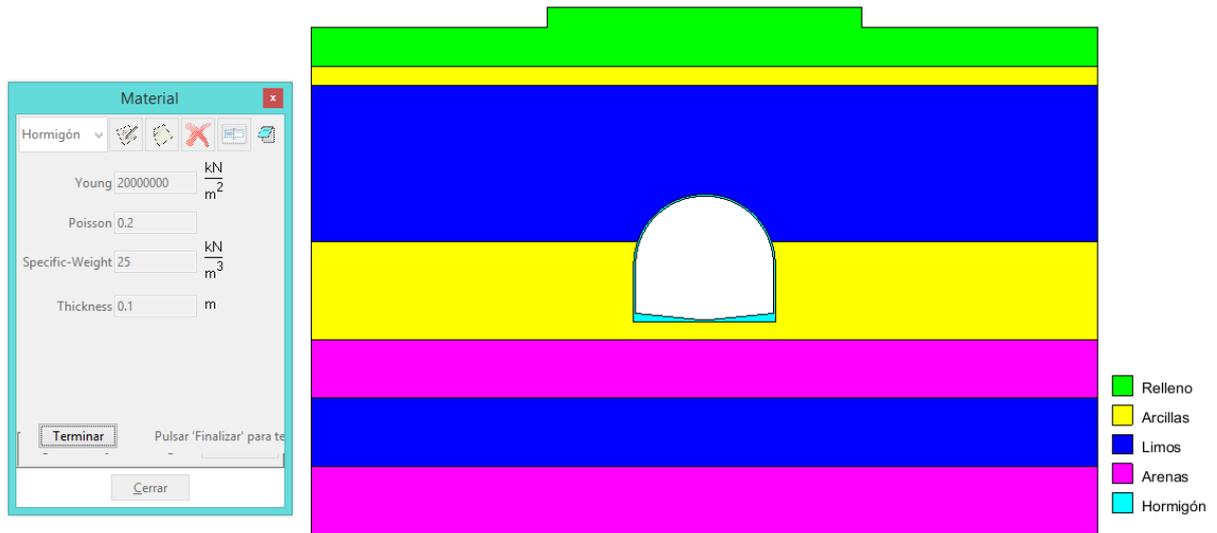


Figura 16. Materiales del problema.

3.3.1.4 Mallado

En este caso se utilizará una malla de elementos triangulares DKT, pero se aplicarán dos espesores distintos. Una malla de espesor pequeño para la zona del túnel de hormigón y una malla de un refinamiento mayor para el resto del terreno. De esta forma podremos analizar en mayor detalle la zona del túnel, aportando al programa una mayor facilidad de procesar los cálculos.

Con respecto a la convergencia de la malla, en el apartado de postproceso se desarrollará un estudio de la convergencia para diferentes espesores.

A continuación se muestran las imágenes de las mallas utilizadas para el estudio de la convergencia y la resolución del ejercicio.

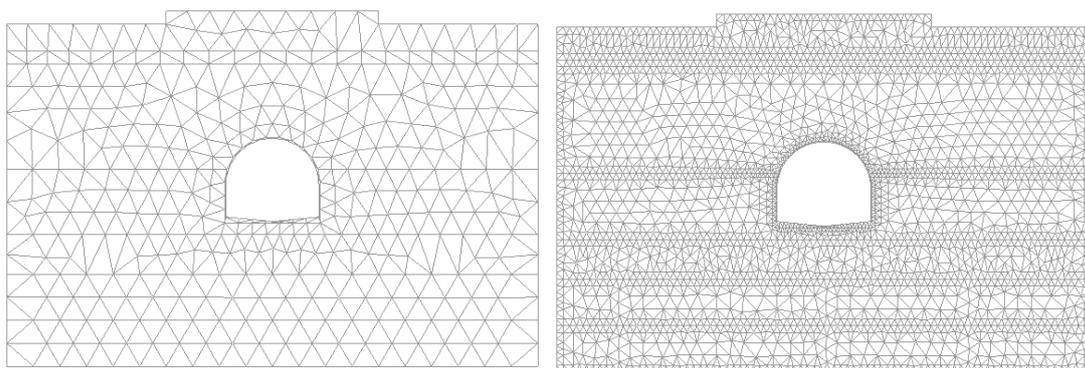


Figura 17. Mallado refinamiento 2,00/1,00 (izquierda) y Mallado refinado 1,00/0,50 (derecha).

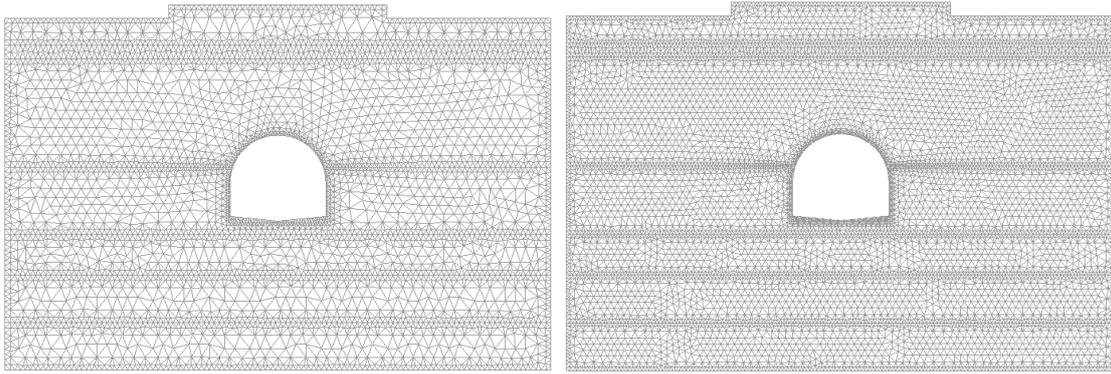


Figura 18. Mallado refinamiento 0,75/0,375 (izquierda) y Mallado refinado 0,50/0,25 (derecha).

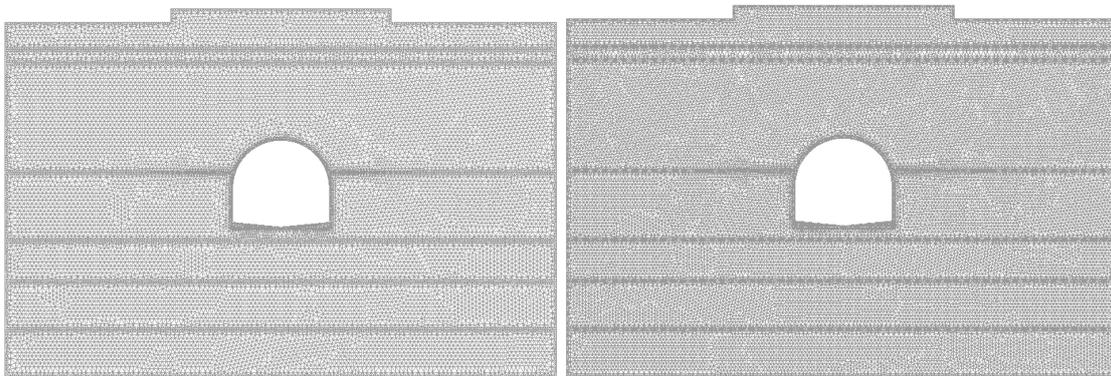


Figura 19. Mallado refinamiento 0,30/0,15 (izquierda) y Mallado refinado 0,25/0,125 (derecha).

3.3.2 PROCESO

Después de la asignación de la malla, se procede al cálculo. Este proceso lo realiza el programa “Ramseries Educational 2D”.

3.3.3 POSTPROCESO

3.3.3.1 Análisis de convergencia

Tal y como se comentó anteriormente, en este caso se utilizarán mallas de elementos triangulares lineales de 3 nodos DKT, y se compararán para diferentes refinamientos de malla hasta que se obtiene la convergencia de la solución.

Debido a las características del problema en las que tenemos una gran superficie de terreno en comparación con la geometría del túnel, se utilizará una malla de elementos más pequeños para la superficie del túnel y un refinado de mayor tamaño para el resto de estratos del perfil del terreno. De esta forma podemos obtener datos de más óptimos en la zona de mayor interés, mejorando el procesamiento de los datos y la velocidad del cálculo.

De esta forma analizaremos 6 mallas de diferentes grosores, cada una de ellas con dos tamaños de elementos diferentes según la zona, siendo dichos espesores 2,00/1,00; 1,00/0,50; 0,75/0,375; 0,50/0,25; 0,30/0,15 y 0,25/0,125. A continuación se mostrará la tabla y gráfica que muestra los resultados obtenidos.

Convergencia desplazamiento Y					
Tipo de malla	Tamaño elementos (m) (Terreno/Tunnel)	Numero de elementos	Numero de nodos	Nº grados de libertad	Desplazamiento Y (m)
Elementos triangulares DKT	2,00/1,00	748	422	844	-0,12963
	1,00/0,50	5041	2700	5400	-0,134
	0,75/0,375	7608	4042	8084	-0,1344
	0,50/0,25	14909	7814	15628	-0,13492
	0,30/0,15	35369	18283	36566	-0,13512
	0,25/0,125	48668	25053	50106	-0,13521

Tabla 2. Tabla de datos de convergencia de mallas.

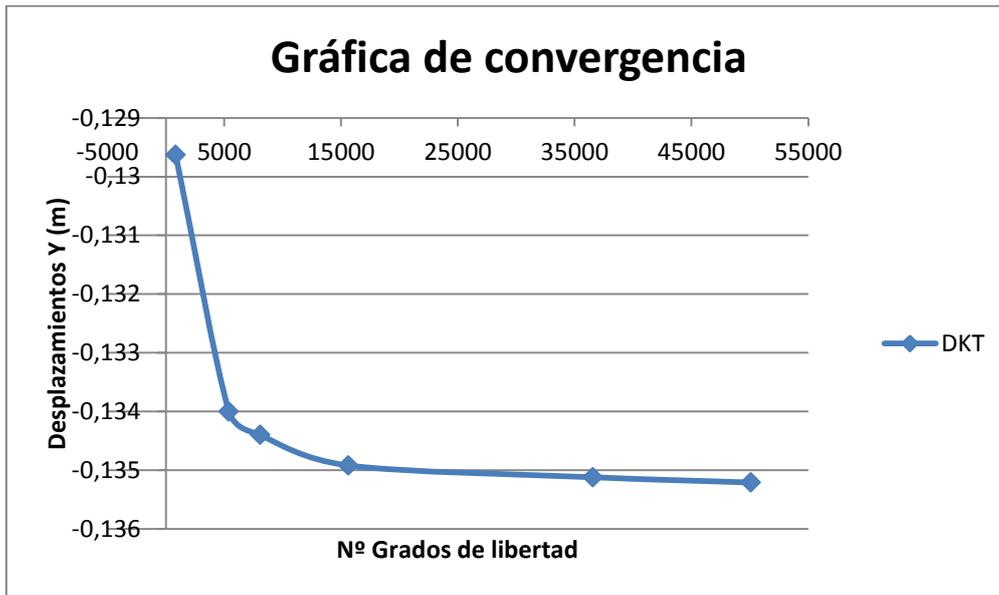


Gráfico 2. Gráfico de convergencia de mallas.

Como se preveía a medida que reducimos el tamaño de la malla se van obteniendo unos resultados más precisos. A partir de la malla 0,50/0,25 m se han comenzado a hallar soluciones que convergen, obteniendo finalmente un desplazamiento en el eje y de -0,13521 m.

Finalmente utilizaremos la malla de espesor 0,25/0,125 m, ya que es la que al utilizar un mayor número de elementos, nodos y grados de libertad, arroja resultados más precisos.

3.3.3.2 Análisis de resultados

Una vez realizado el cálculo del problema, analizaremos los factores indicados en el enunciado, es decir, el desplazamiento en el eje Y para analizar el asentamiento que sufre el terreno y las tracciones y compresiones máximas que se producen en el conjunto.

A continuación se muestran los resultados obtenidos.

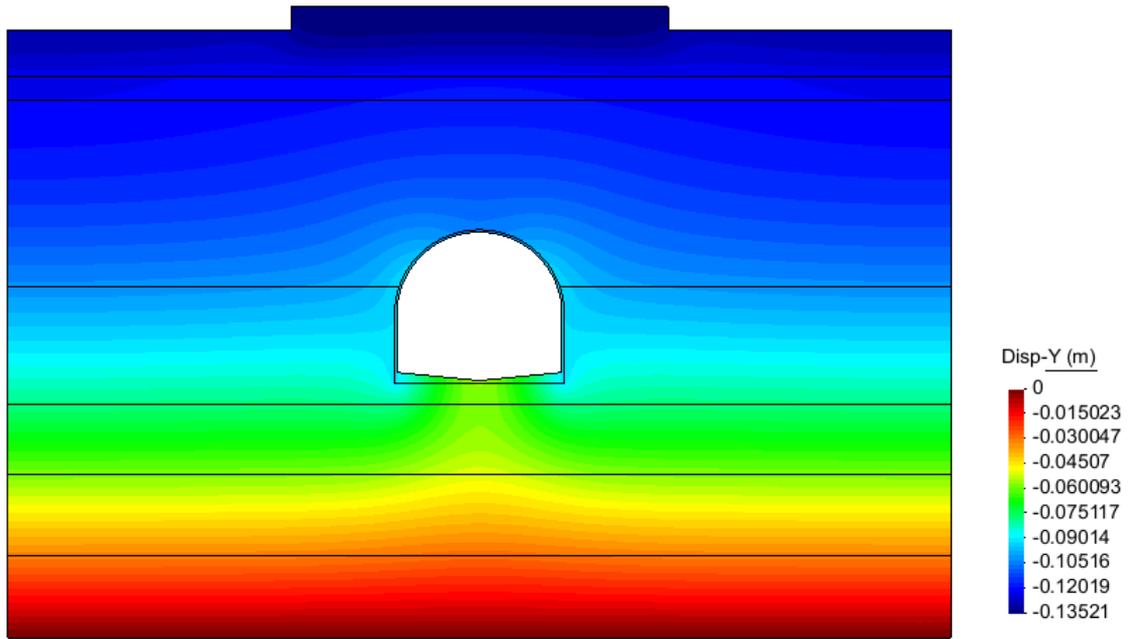


Figura 20. Desplazamientos en el eje Y (m).

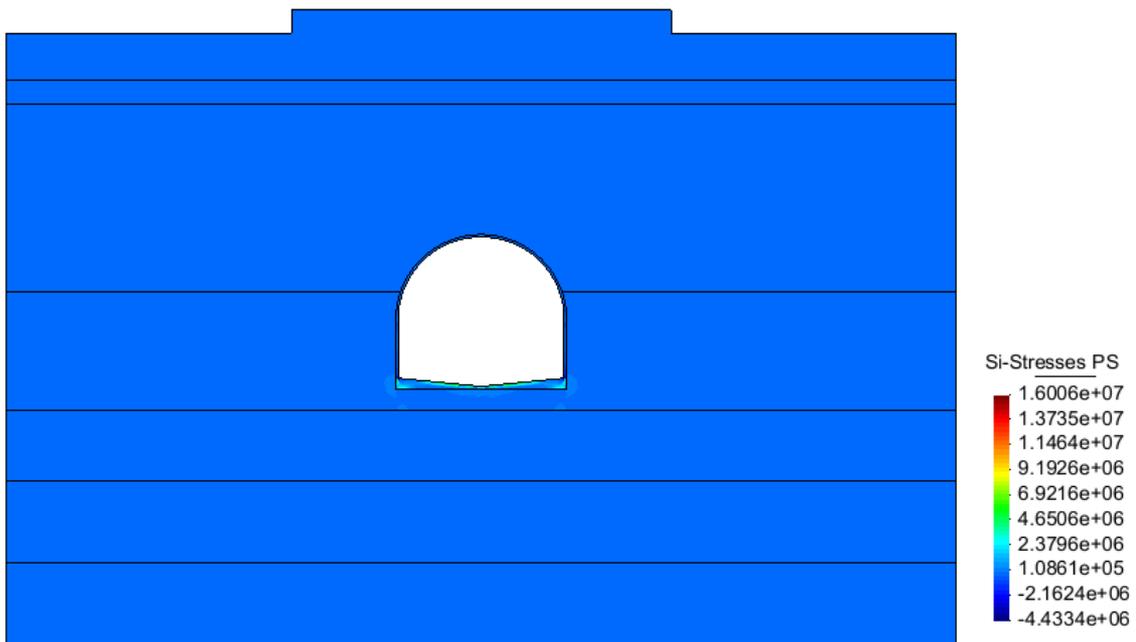


Figura 21. Mapa de tensiones Si.

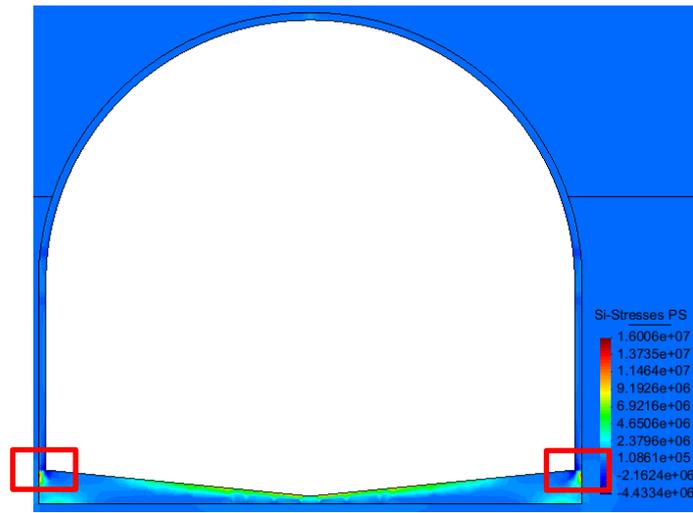


Figura 22. Detalle de localización de tracciones máximas.

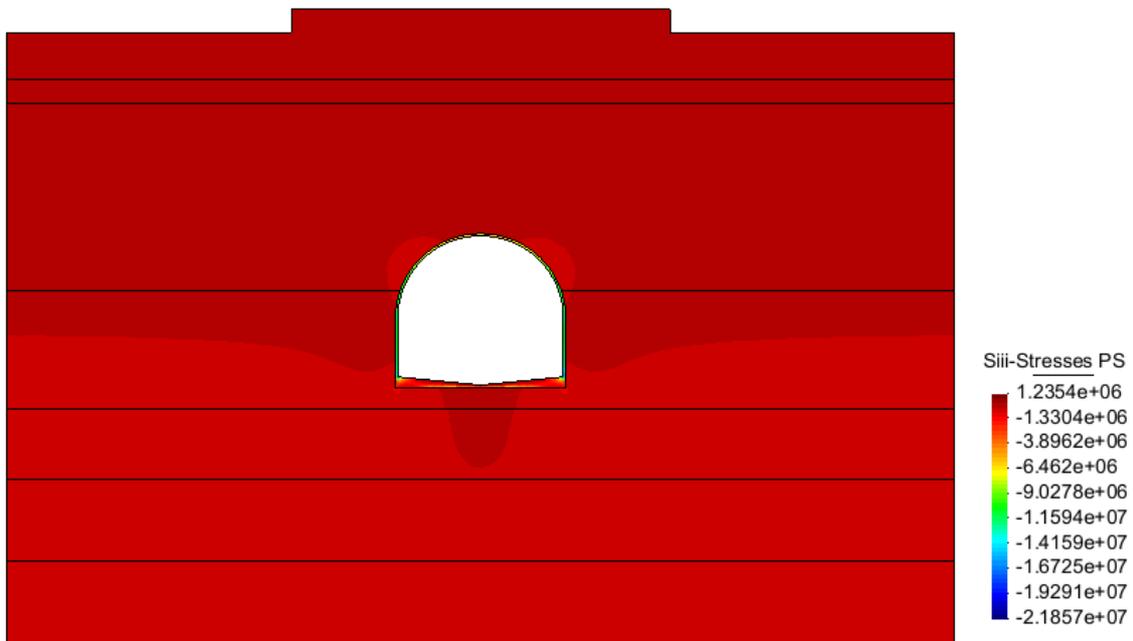


Figura 23. Mapa de tensiones Siii.



Figura 24. Detalle de localización de compresiones máximas.

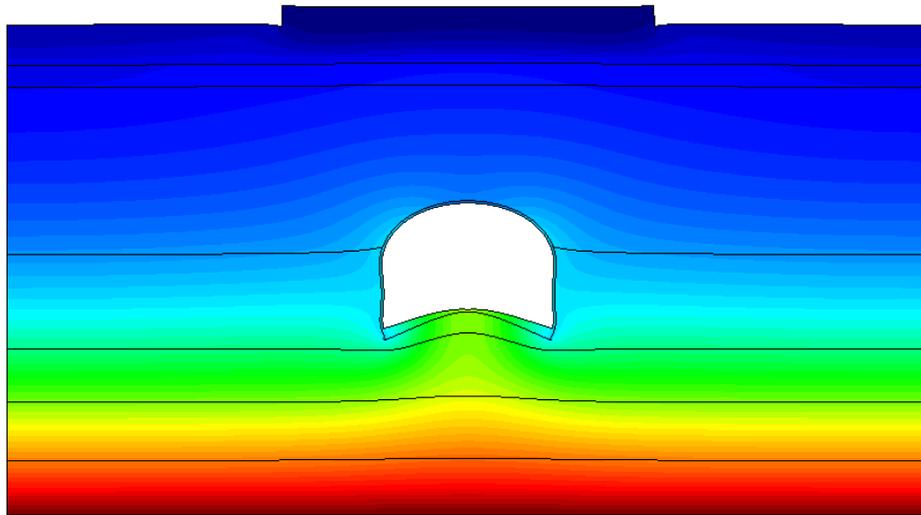


Figura 25. Deformada del terreno y túnel.

Como podemos comprobar los desplazamientos en el eje Y máximos son de $-0,13521$ m y se encuentran en la superficie del terreno. La figura de la deformada del perfil del terreno y túnel muestra que no existen desplazamientos en el eje Y positivos, por lo tanto se producen asentamientos de mayor magnitud mientras más nos acercamos a la superficie. Como era de esperar por la condiciones de contorno del problema en la base del terreno el desplazamiento es 0.

Con respecto a las tensiones, se han obtenidos unas tracciones máximas de 16 Mpa situadas en la cara exterior de la unión entre la base del túnel y las paredes verticales del mismo. Las compresiones máximas son de 21,86 Mpa y se encuentran situadas en la unión de la base y las paredes verticales del túnel, pero en la cara interior de este.

3.4 CONCLUSIONES

Partiendo de las condiciones que se pedían en enunciado se ha estudiado los asentamientos producidos por el túnel y las tensiones de compresión y tracción máximas.

Se exige que se dimensione el refuerzo del túnel de hormigón limitando los asentamientos producidos en la superficie del terreno a 1 cm. Para ello había que tenerse en cuenta que el espesor mínimo del túnel debía ser superior a 8 cm.

Para conocer el asiento real que se produce a consecuencia del túnel, en primer lugar se ha medido el asiento que plantea el terreno solo, sin túnel, el cual tiene una magnitud de $-14,406$ cm. El cálculo del terreno con el túnel ha proporcionado un resultado de un asiento de $-13,521$ cm. Por lo tanto se obtiene una diferencia entre asentamientos menor a 1 cm (0,88 cm), es decir, se cumple la condición propuesta en el enunciado.

Cabe destacar que a diferencia de lo que se pensaba antes de realizar el análisis, la construcción del túnel no aumenta el asentamiento del terreno, sino todo lo contrario, lo reduce en 0,88 cm.



En relación a las tensiones de tracción y compresión que no puede superar el túnel, hemos podido comprobar que las tensiones que se producen en dicha estructura son un máximo de 16 Mpa en tracción y 21,86 Mpa en compresión. Por lo tanto estas tensiones son menores que las máximas permitidas en el enunciado 30/25 Mpa tensiones máximas a compresión y tracción.

Así que podemos concluir que con un espesor de túnel de 10 cm, se cumplen las condiciones propuestas en el enunciado del problema.

Para finalizar, es necesario aclarar que se debe de tener especial cuidado a la hora de diseñar el túnel en las zonas inferiores del mismo, ya que en la unión de la base con las paredes verticales se producen de forma puntual las mayores tensiones de tracción y compresión. Además las esquinas inferiores presentan un mayor desplazamiento negativo vertical en relación al resto de la estructura del puente, tal y como podemos ver en el gráfico de deformación.

4. DISEÑO Y ANALISIS DEL PROBLEMA S-15

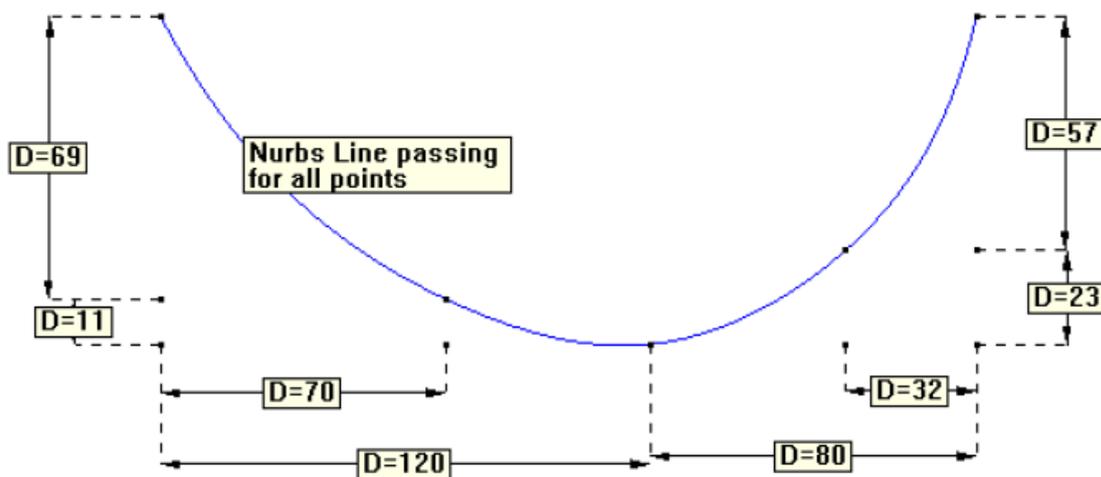
4.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Dimensionar y calcular una presa de materiales sueltos de 80 m de altura con núcleo de arcilla. La anchura en coronación debe ser de 4 m. con las restricciones geométricas que se indican.

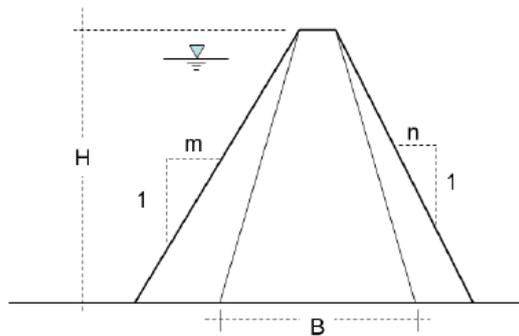
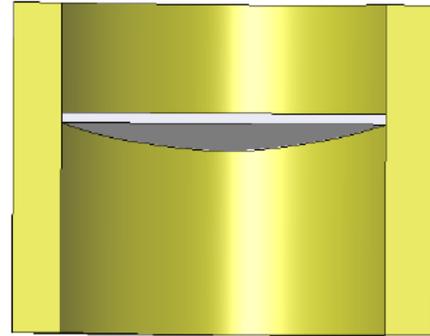
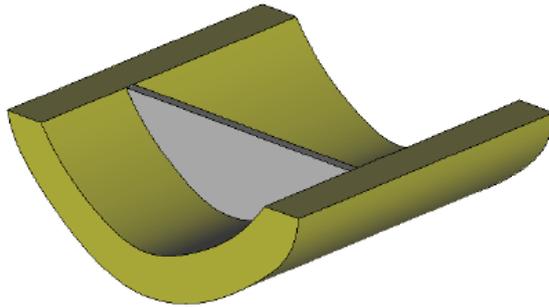
Realizar el proyecto mediante un análisis bidimensional y posteriormente en 3D para verificar el diseño utilizando en ambos casos las siguientes hipótesis:

- 1) Las tracciones máximas en cualquier punto de la presa no deben superar 0.5 MPa
- 2) El peso específico del terreno y el material de construcción es de 20000 N/m³
- 3) El Módulo de elasticidad del material a usar es de 9900 K N/m² y el coeficiente de poisson es de 0,285
- 4) El Módulo de elasticidad de la arcilla es de 8000 K N/m² y el coeficiente de poisson es de 0.4
- 5) Base empotrada en el terreno
- 6) Cimentación en terreno homogéneo. Módulo de elasticidad: 35 G N/m² y coeficiente de poisson 0,30.
- 7) 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.



$$1.5 < m < 2.0$$

$$1.5 < n < 2.0$$

$$B > 0.3 H$$

4.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Para la resolución de este ejercicio, siguiendo las pautas del enunciado, se diseñara una presa de materiales sueltos con núcleo de arcilla con las características indicadas anteriormente. En el diseño habrá que determinar las pendientes de las 2 caras de la presa mediante los parámetros “m” y “n” que deben estar en un rango de $1,5 < m/n < 2,0$. También habrá que determinar el ancho de la base de arcilla, indicada con el parámetro “B” que tiene que ser mayor que $0,3 \cdot H$.

Siguiendo estos principios se calculará el diseño mediante un análisis bidimensional con la teoría de deformación plana, y una vez que se haya encontrado la solución que cumpla con los límites marcados por el enunciado, se realizará un estudio del comportamiento de la presa mediante un análisis tridimensional.

4.3 ANALISIS BIDIMENSIONAL

4.3.1 PREPROCESO

4.3.1.1 Datos del Problema

Para la resolución de este ejercicio se aplicará un problema bidimensional utilizando Ramseries Educativa 2D. Se utilizará la teoría de deformación plana.

4.3.1.2 Geometría

Para una H de 80 m, se ha diseñado una presa con una longitud “m” de 128 m, una longitud “n” de 128 m y una longitud de la base de arcilla “B” de 40 m. De esta forma se cumplen con los parámetros de diseño indicados. A continuación se muestra la geometría acotada en metros.

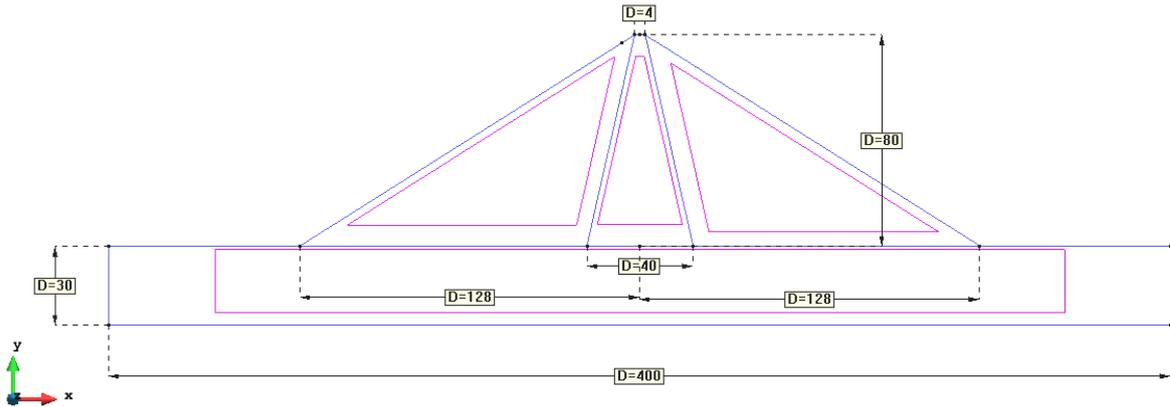


Figura 26. Geometría modelo bidimensional (m).

4.3.1.3 Condiciones de contorno

Se aplican las condiciones de contorno partiendo de las características de la presa. Se asignan restricciones de empotramiento en la base del terreno, es decir, se restringe el movimiento tanto en el eje X como en el eje Y. Además se aplican restricciones en dirección X en los laterales del terreno.

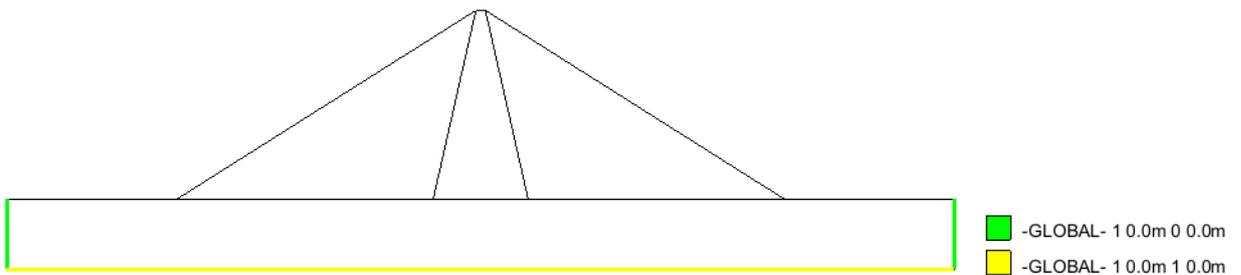


Figura 27. Condiciones de contorno del problema.

4.3.1.4 Materiales

Se trabajará con tres materiales diferentes: el terreno, la presa de materiales sueltos y el núcleo de arcilla de la presa. Las propiedades se muestran a continuación.

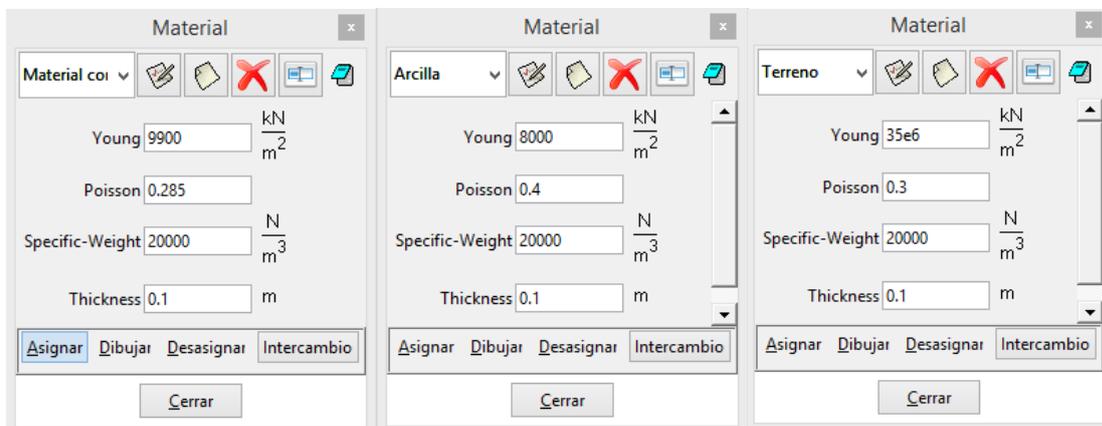


Figura 28. Propiedades de los materiales.

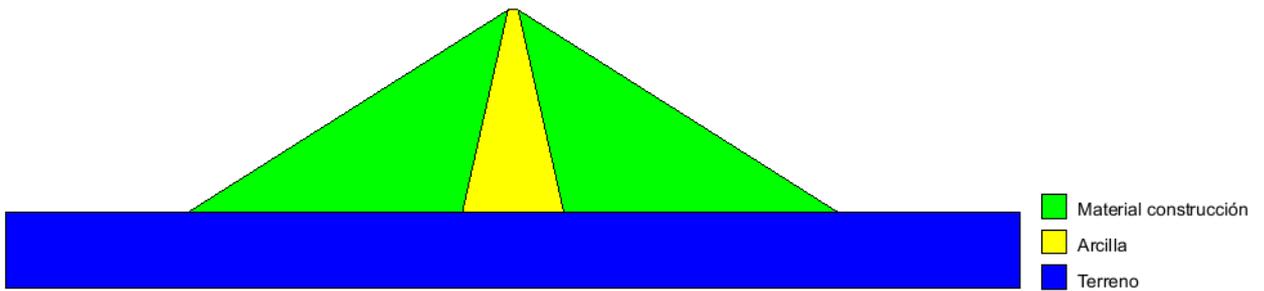


Figura 29. Distribución de materiales.

4.3.1.5 Cargas

El problema planteado hay que analizarlo paralelamente proponiendo dos combinaciones de cargas: combinación de cargas 1 que incluya el peso propio y combinación de cargas 2 que incluya el peso propio y la carga de empuje hidrostático.

El empuje hidrostático se ha aplicado mediante una carga uniformemente repartida para el fondo de la presa (sobre el terreno) de valor de $9,8 \text{ kN/m}^2 \cdot 77\text{m}$ de altura de agua (teniendo en cuenta que en deformación plana se calcula por unidad de espesor de sección transversal) que dan $754,6 \text{ kN/m}$. La carga hidrostática actuante en la presa se ha considerado como carga triangular que tiene el valor de $754,6 \text{ kN/m}$ en el fondo y 0 kN/m en la cota de agua a 77m de altura. La verificación final del problema, es decir que no se supere $0,5 \text{ MPa}$ de esfuerzo a tracción, se realizara mediante las dos combinaciones de cargas existentes en el enunciado.

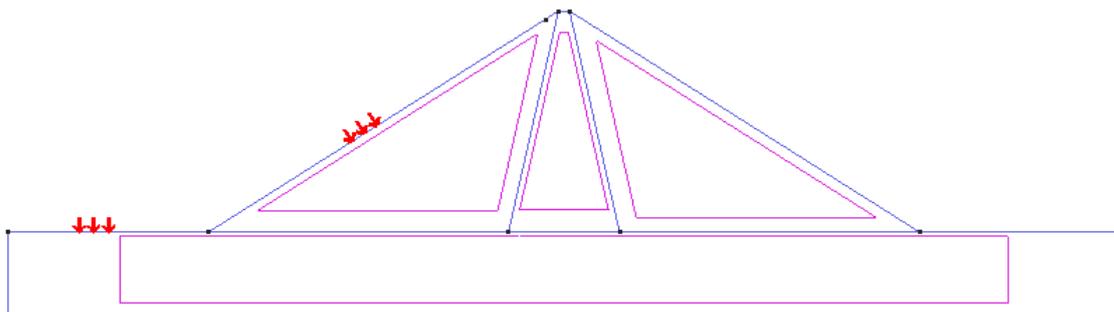
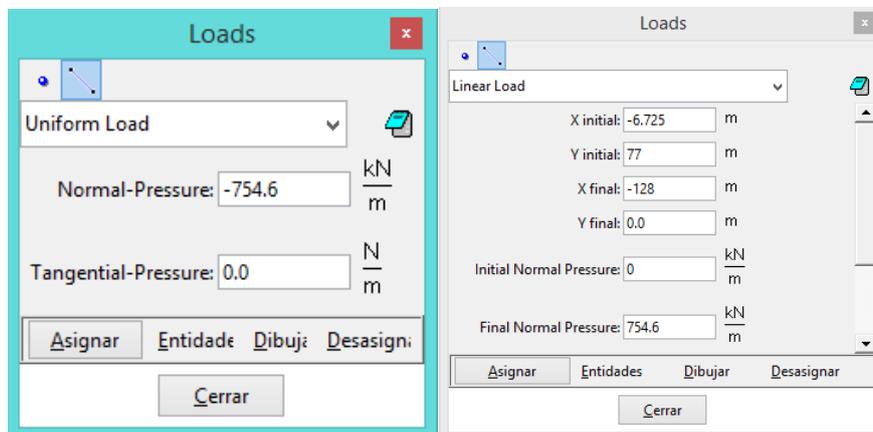


Figura 30. Localización y carga hidrostática.

4.3.1.6 Mallado

Para la resolución del ejercicio se utilizara una malla de elementos triangulares DKT (lineales de 3 nodos) para la cual se estudiará más adelante la convergencia de resultados para distintos espesor. La malla se refinara con los siguientes grosores: 5 m, 4 m, 3m, 2m, 1 m y 0,8 m.

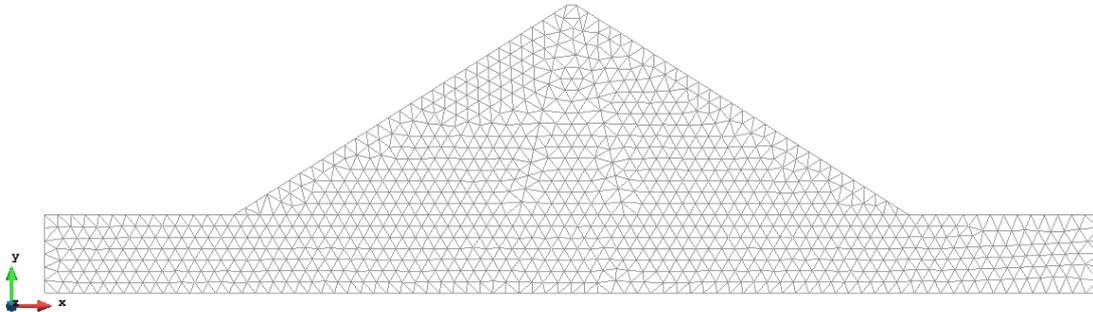


Figura 31. Malla elementos DKT tamaño 5 m.

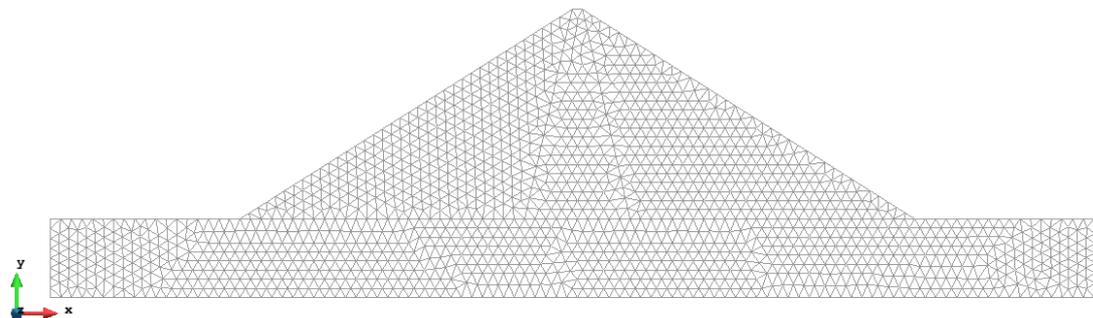


Figura 32. Malla elementos DKT tamaño 4 m.

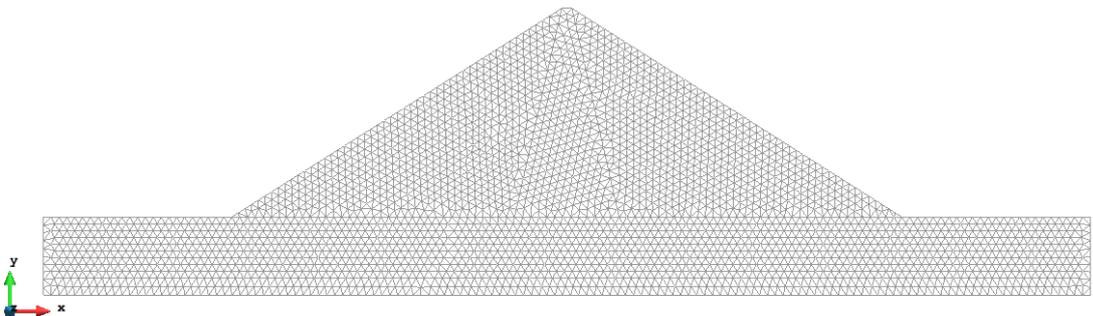


Figura 33. Malla elementos DKT tamaño 3 m.

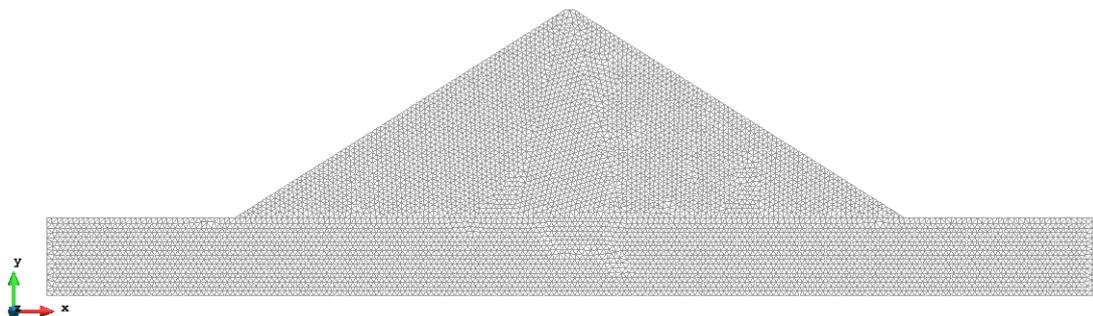


Figura 34. Malla elementos DKT tamaño 2 m.

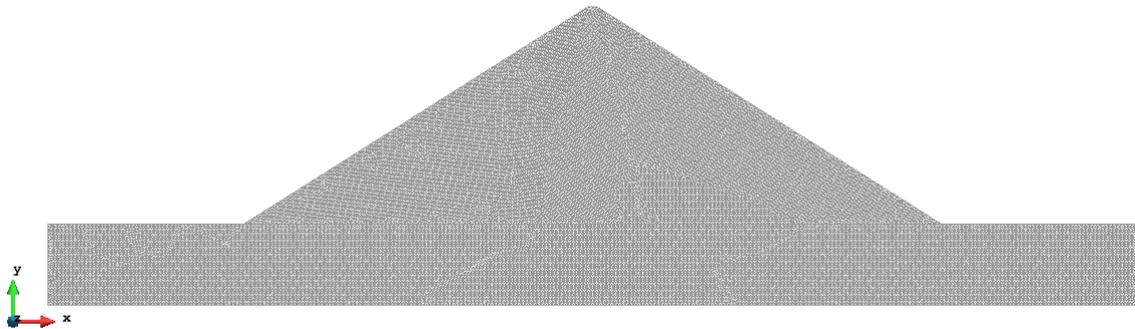


Figura 35. Malla elementos DKT tamaño 1 m.

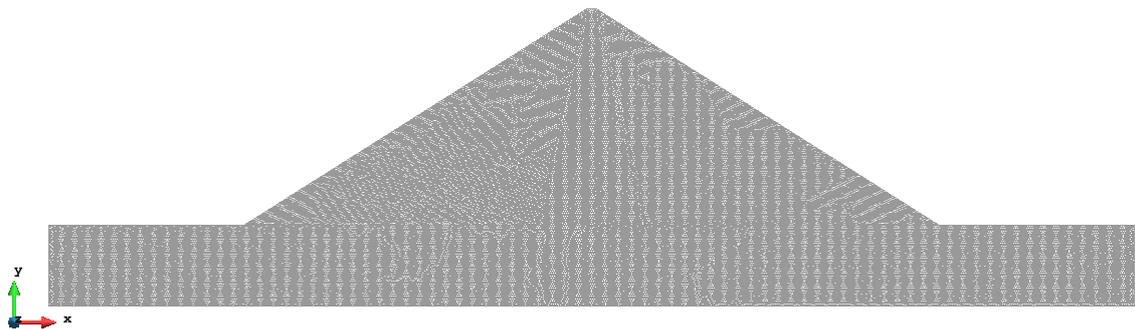


Figura 36. Malla elementos DKT tamaño 0,8 m.

4.3.2 PROCESO

Después de la asignación de la malla, se procede al cálculo. Este proceso lo realiza el programa “Ramseries Educational 2D”.

4.3.3 POSTPROCESO

4.3.3.1 Análisis de convergencia

Tal y como se comentó anteriormente, en este caso se utilizarán mallas de elementos triangulares lineales de 3 nodos DKT, y se comparan para diferentes refinamientos de malla hasta que se obtiene la convergencia de la solución.

Para realizar el estudio de la convergencia utilizaremos los parámetros de desplazamientos en el eje Y que sufre el problema.

De esta forma analizaremos 6 mallas de diferentes grosores: 5 m, 4 m, 3 m, 2m, 1 m y 0,8 m. A continuación se mostrará la tabla y grafica que muestra los resultados obtenidos.

Convergencia Problema Bidimensional					
Tipo de malla	Tamaño elementos	Número de elementos	Numero de nodos	Nº grados de libertad	Desplazamiento Y (m)
Elementos triangulares DKT	5,00	2017	1100	2200	-4,1176
	4,00	3051	1640	3280	-4,1254
	3,00	5522	2913	5826	-4,1299
	2,00	12624	6540	13080	-4,1324
	1,00	50599	25754	51508	-4,133
	0,80	79685	40411	80822	-4,1332

Tabla 3. Tabla de datos de convergencia de mallas.

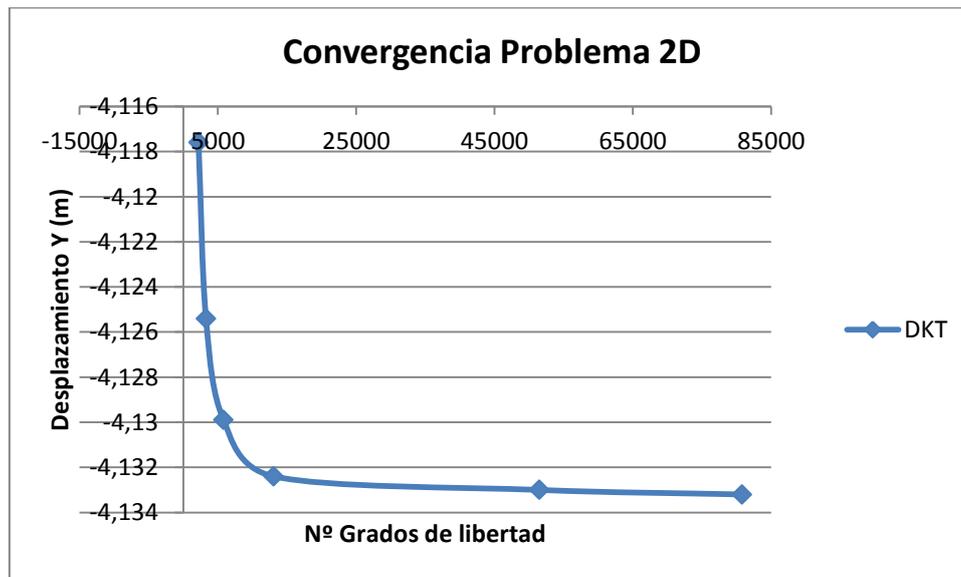


Gráfico 3. Gráfico de convergencia de mallas.

Como se preveía a medida que reducimos el tamaño de la malla se van obteniendo unos resultados más precisos. A partir de la malla 2 m se han comenzado a hallar soluciones que convergen, obteniendo finalmente un desplazamiento en el eje y de -4,1332 m.

Finalmente utilizaremos la malla de espesor 0,8 m, ya que es la que al utilizar un mayor número de elementos, nodos y grados de libertad, arroja resultados más precisos.

4.3.3.2 Análisis de resultados

Una vez determinada la malla que se va a usar, se obtienen y analizan los resultados. Se debe comprobar que el diseño de la presa cumpla con las indicaciones marcadas por el enunciado, es decir, que tanto en la combinación de cargas 1 (peso propio) como la combinación de cargas 2 (peso propio + carga hidrostática) no superen tracciones superiores a 0,5 MPa.

A continuación se muestran los resultados obtenidos.

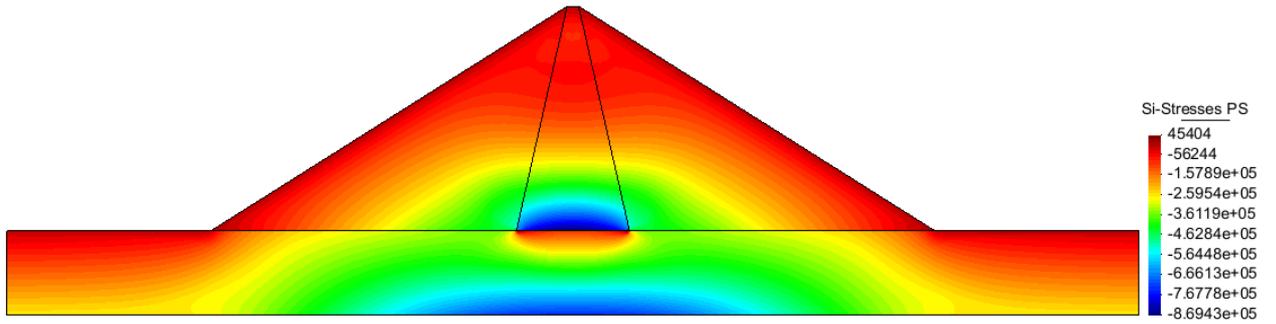


Figura 37. Mapa de tensiones Si combinación de cargas 1.

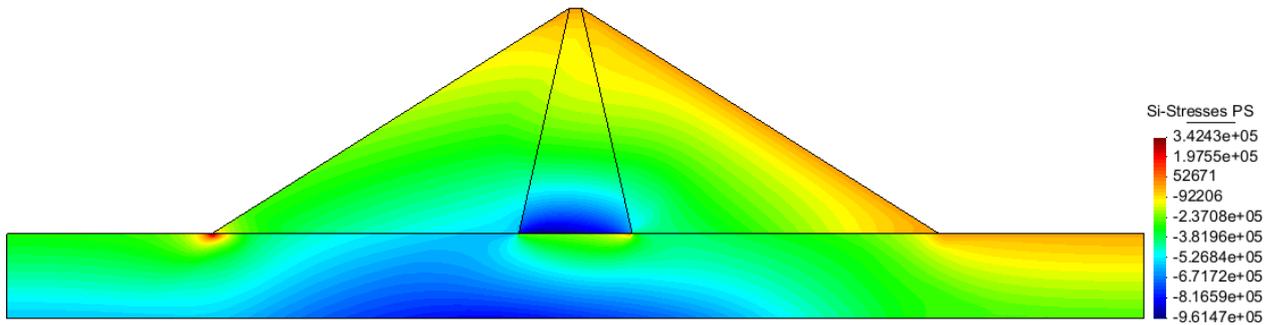


Figura 38. Mapa de tensiones Si combinación de cargas 2.

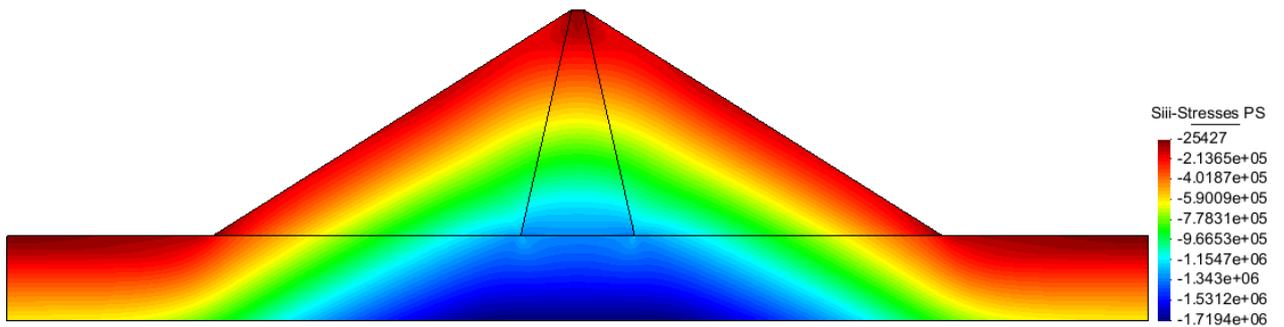


Figura 39. Mapa de tensiones Siii combinación de cargas 1.

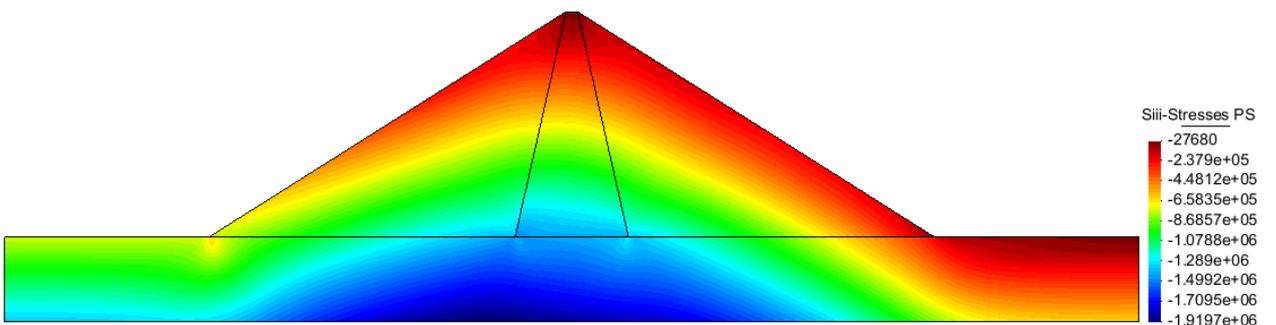


Figura 40. Mapa de tensiones Siii combinación de cargas 2.

Como podemos ver en los resultados obtenidos, las tracciones máximas que se tienen en el caso de combinación de cargas 1 son de 0,0454 Mpa, mientras que las tracciones máximas en la combinación de cargas 2 son de 0,342 MPa.

Con respecto a las compresiones máximas, para la combinación de cargas 1 son de 1,72 MPa y para la combinación de cargas 2 son de 1,92 MPa.

Por lo tanto el diseño cumple con las indicaciones del enunciado del problema ya que para las dos combinaciones de cargas las tracciones máximas son inferiores a 0,5 MPa.

Tal y como era previsible, la combinación de cargas 2 es más crítica, ya que provoca tensiones tanto de compresión como de tracción de mayor magnitud en comparación con la combinación 1.

Cabe destacar que existe un punto crítico en la estructura que se produce en la unión de la base de la presa con la pared vertical en la cara que se aplica la carga hidrostática. Este punto se corresponde con la tracción máxima producida en la estructura, por lo tanto se deberá tener en cuenta para siguientes procesos del diseño. La compresión máxima que se encuentra en el problema se produce en el centro del terreno, es decir, la zona del terreno donde apoya el núcleo de arcilla de la presa.

A continuación se analizará la solución del diseño de la presa mediante un problema tridimensional, y de esta forma comprobar el comportamiento de la estructura.

4.4 ANALISIS TRIDIMENSIONAL

En este apartado se pretende verificar los resultados obtenidos mediante el análisis bidimensional pero con un análisis tridimensional. Para ello habrá que realizar un pre-proceso en el cual dibujamos la geometría en 3D y posteriormente asignarle las condiciones de contorno, datos del análisis, cargas y materiales a la presa y al terreno.

4.4.1 PREPROCESO

4.4.1.1 Datos del Problema

Para la resolución de la presa mediante un modelo tridimensional, utilizaremos “Ramseries Educational – Solidos 3D”.

4.4.1.2 Geometría

Se ha creado la geometría tridimensional de acuerdo al perfil que indica el enunciado del problema y el diseño de la presa utilizado en el análisis bidimensional realizado anteriormente.

Para facilitar el diseño y el análisis de la estructura, se han creado dos capas, una que contiene el terreno y otra la presa, compuesta por los materiales sueltos y el núcleo de arcilla.

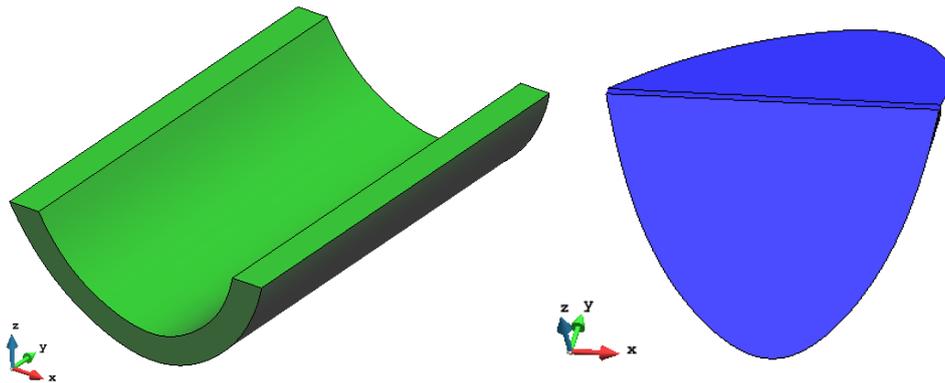


Figura 41. Detalle de la geometría del perfil del terreno y de la presa.

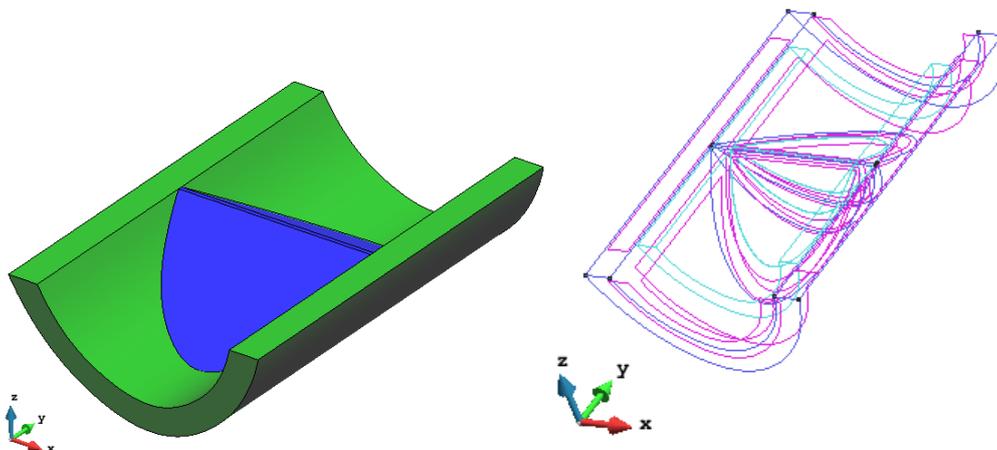


Figura 42. Geometría del conjunto.

4.4.1.3 Condiciones de contorno

Las condiciones de contorno que aplicaran al modelo es el empotramiento de la base inferior del terreno. Por lo tanto se restringirán los ejes X, Y y Z en la base del terreno.

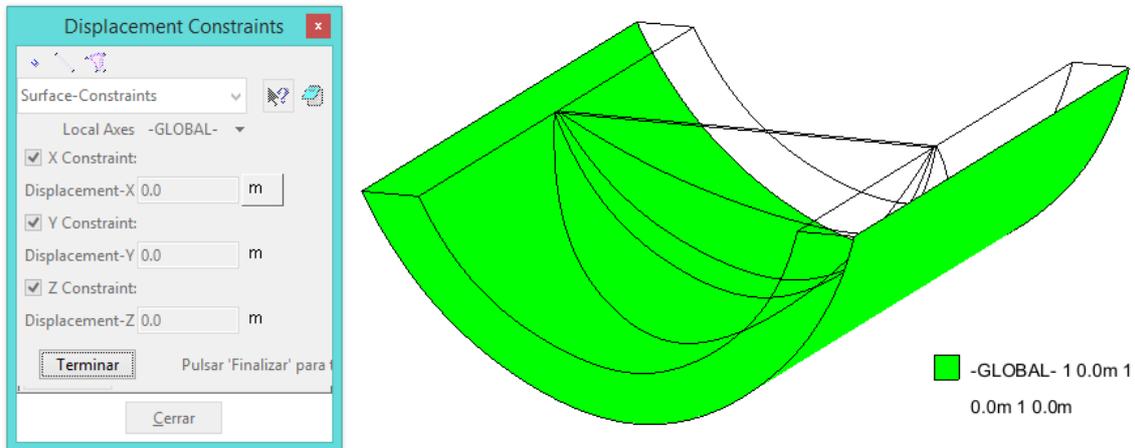


Figura 43. Condiciones de contorno.

4.4.1.4 Materiales

Los materiales aplicados son los marcados por el enunciado del problema, es decir, terreno, materiales sueltos y núcleo de arcilla. Los datos son los siguientes:

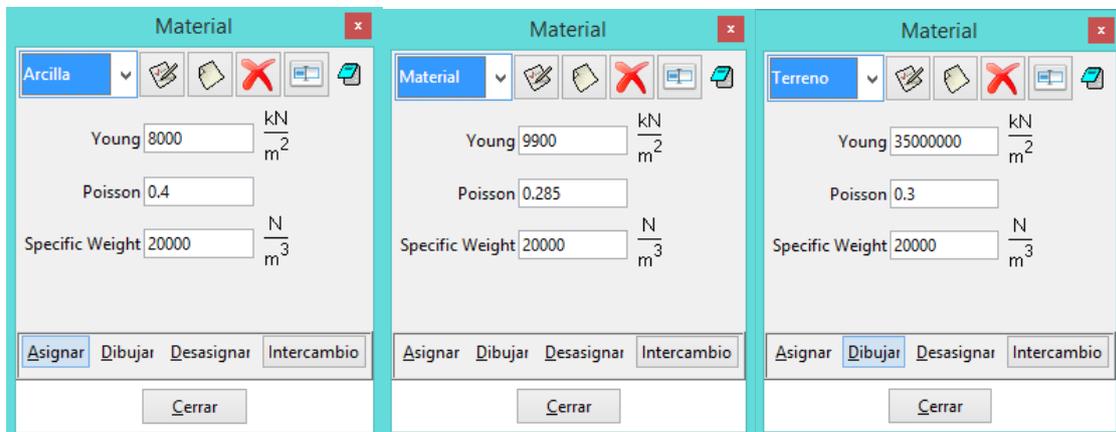


Figura 44. Características de los materiales.

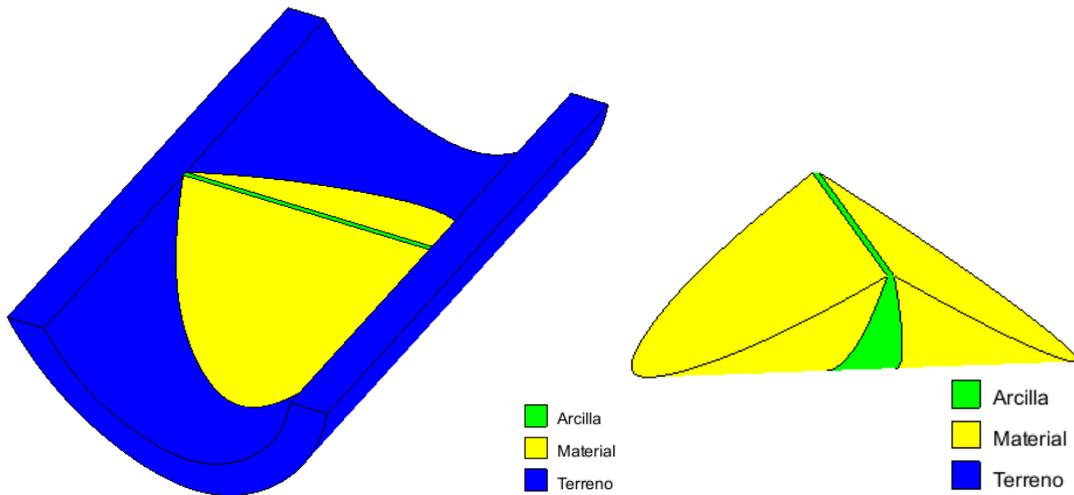


Figura 45. Gráfico de la ubicación de los materiales.

4.4.1.5 Cargas

Tal y como ocurrió en el caso del modelo bidimensional anterior, se aplicarán dos combinaciones de cargas, una en la que simplemente se aplica el peso propio y otra en la que se aplica el peso propio y la carga hidrostática.

Para la aplicación de la carga hidrostática, se usa la opción de presión hidrostática que proporciona el programa, y se indica el nivel del agua (77 m) y el peso específico del agua 9,8 kN/m. Dicha carga se aplica en el perfil del terreno y una cara de la presa, tal y como se mostrará a continuación.

Con respecto al peso propio, hay que tener presente que para que se produzca el correcto efecto en el modelo, es necesario que se ajusten bien los ejes, siendo el eje Z el plano vertical.

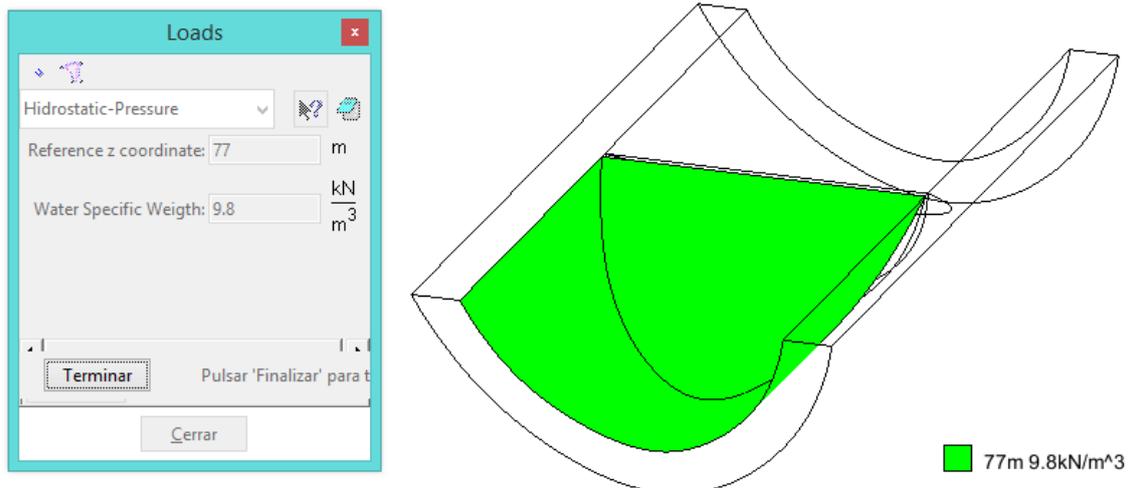


Figura 46. Características de la carga hidrostática.

4.4.1.6 Mallado

Se utilizarán mallas de elementos tetraedros lineales. Se aplicarán diversos espesores para analizar la convergencia. Los espesores serán: 30 m, 20 m, 15 m, 13 m y 12 m. El estudio de convergencia se encuentra en el apartado de postproceso. A continuación se muestran las imágenes de las mallas.

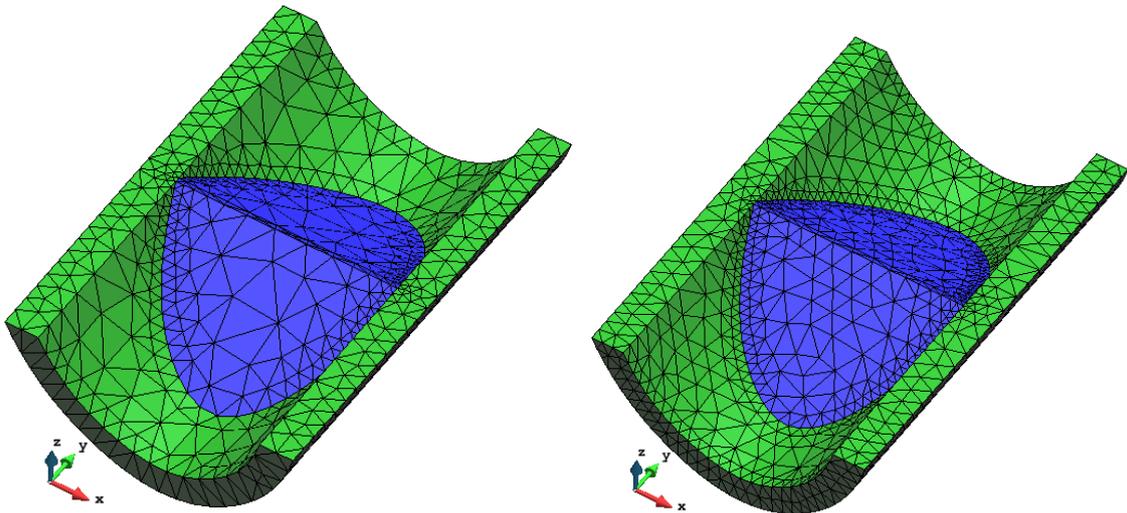


Figura 47. Malla de elementos tetraedros lineales tamaño 30 m (izquierda) y 20 m (derecha).

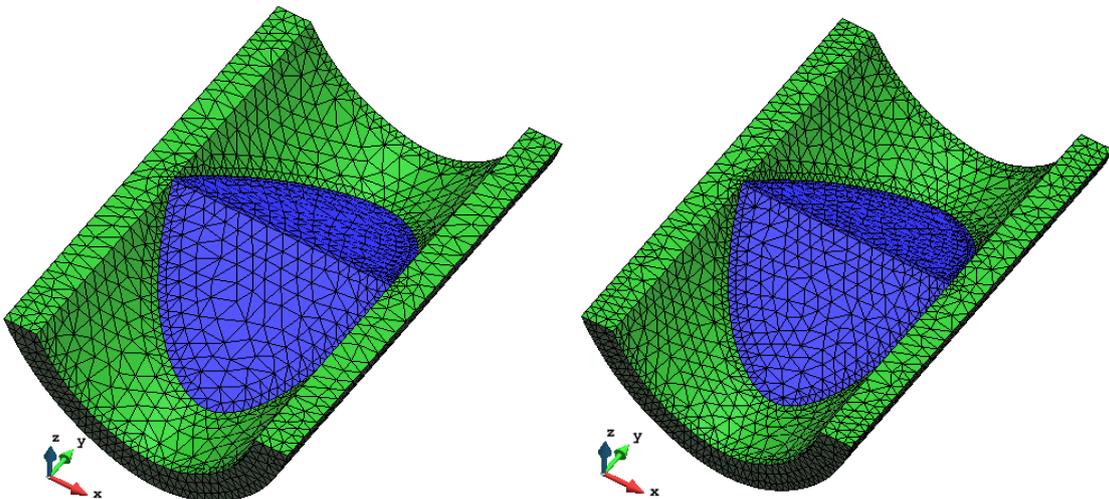


Figura 48. Malla de elementos tetraedros lineales tamaño 15 m (izquierda) y 13 m (derecha).

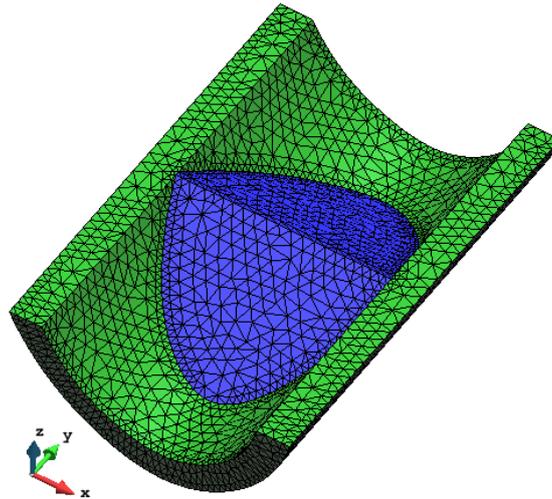


Figura 49. Malla de elementos tetraedros lineales tamaño 12 m.

4.4.2 PROCESO

Después de la asignación de la malla, se procede al cálculo. Este proceso lo realiza el programa “Ramseries Educational Solidos 3D”.

4.4.3 POSTPROCESO

4.4.3.1 Análisis de convergencia

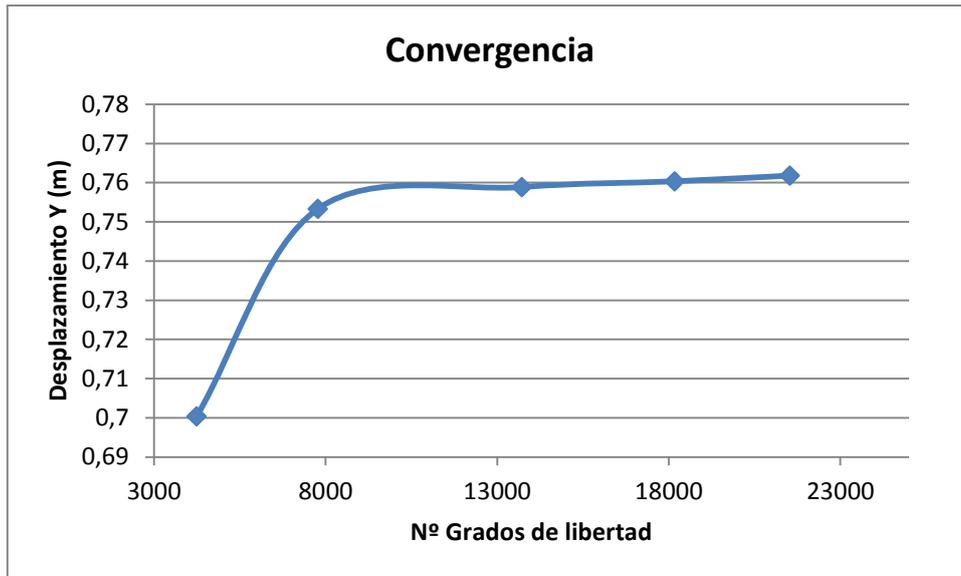
Tal y como se comentó anteriormente, en este caso se utilizaran mallas de elementos tetraedros lineales, y se comparan para diferentes refinamientos de malla hasta que se obtiene la convergencia de la solución.

Para realizar el estudio de la convergencia utilizaremos los parámetros de desplazamientos en el eje Y que sufre el problema.

De esta forma analizaremos 5 mallas de diferentes grosores: 30 m, 20 m, 15 m, 13 m y 12 m. A continuación se mostrará la tabla y grafica que muestra los resultados obtenidos.

Convergencia Problema Tridimensional					
Tipo de malla	Tamaño elementos	Numero de elementos	Numero de nodos	Nº grados de libertad	Desplazamiento Y (m)
Elementos tetraedros lineales	30,00	5778	1416	4248	0,70039
	20,00	11253	2594	7782	0,75335
	15,00	20554	4575	13725	0,75888
	13,00	27742	6059	18177	0,76035
	12,00	33275	7176	21528	0,76181

Tabla 4. Tabla de datos de convergencia de mallas.



Gráfica 4. Gráfica de convergencia de mallas.

Como se preveía a medida que reducimos el tamaño de la malla se van obteniendo unos resultados más precisos. A partir de la malla 15 m se han comenzado a hallar soluciones que convergen, obteniendo finalmente un desplazamiento en el eje Y de 0,76 m. Finalmente utilizaremos la malla de espesor 12 m, ya que es la que al utilizar un mayor número de elementos, nodos y grados de libertad, arroja resultados más precisos.

4.4.3.2 Análisis de resultados

Una vez determinada la malla que se va a usar, se obtienen y analizan los resultados. Se debe comprobar que el diseño de la presa cumpla con las indicaciones marcadas por el enunciado, es decir, que no se superen tracciones superiores a 0,5 MPa. Para ello analizaremos la combinación de cargas 2 (peso propio + Carga hidrostática), ya que es la combinación más crítica. A continuación se muestran los resultados obtenidos.

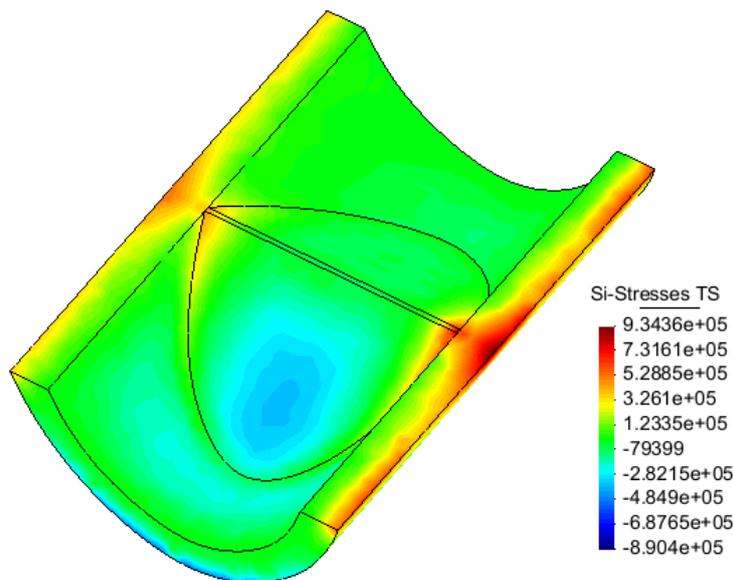


Figura 50. Mapa de tensiones Si combinación de cargas 2 (Peso propio + Carga hidrostática).

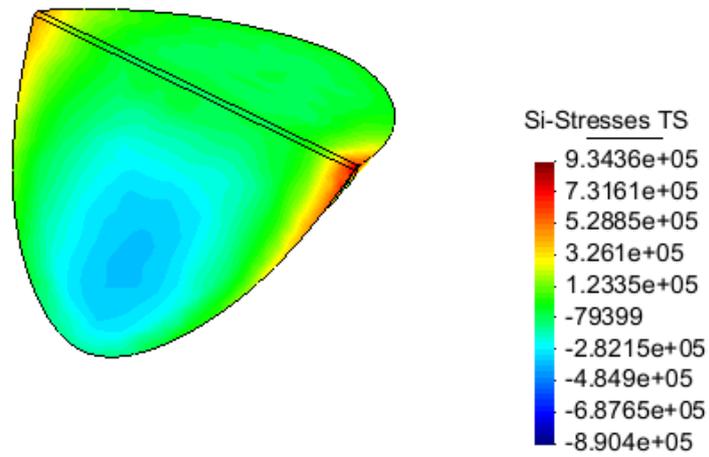


Figura 51. Mapa de tensiones Si combinación de cargas 2 (Peso propio + Carga hidrostática) de la presa.

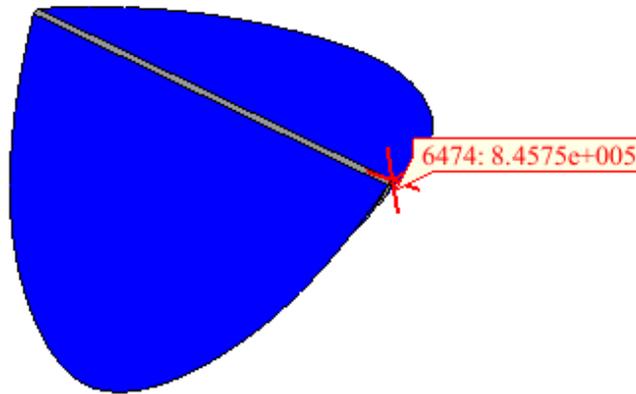


Figura 52. Tracción máxima producida en la presa.

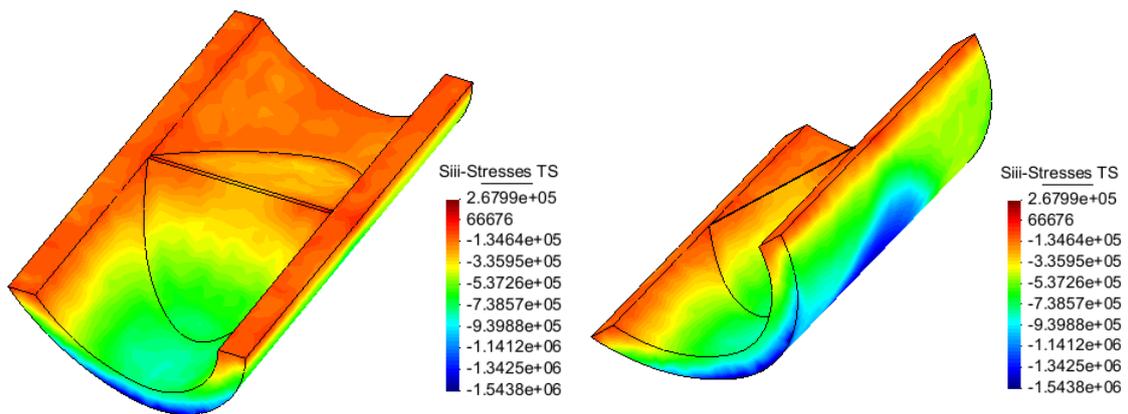


Figura 53. Mapa de tensiones Siii combinación de cargas 2 (Peso propio + Carga hidrostática).

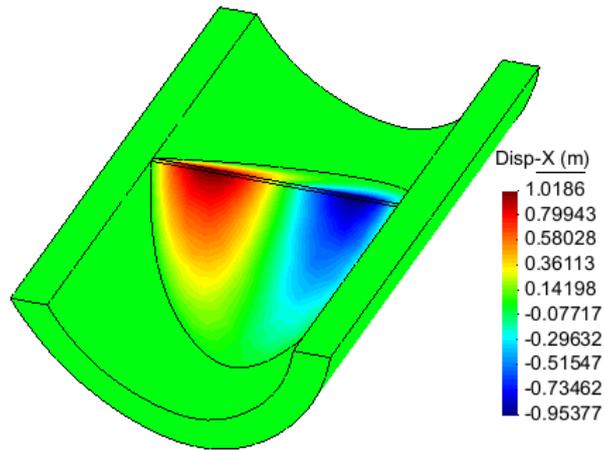


Figura 54. Mapa de desplazamientos en el eje X.

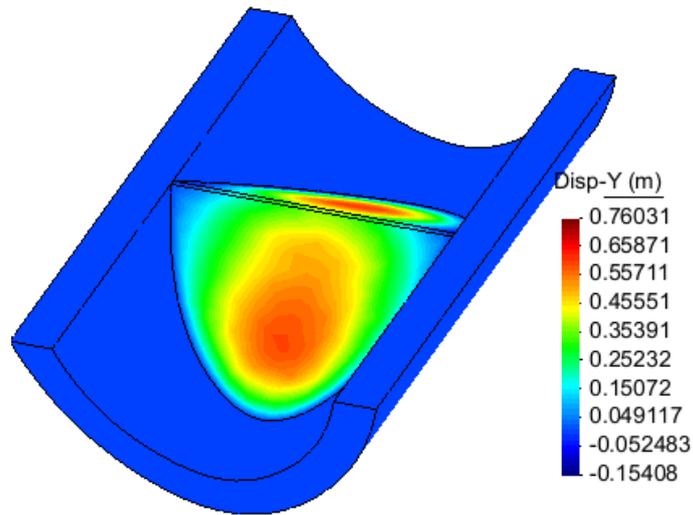


Figura 55. Mapa de desplazamientos en el eje Y.

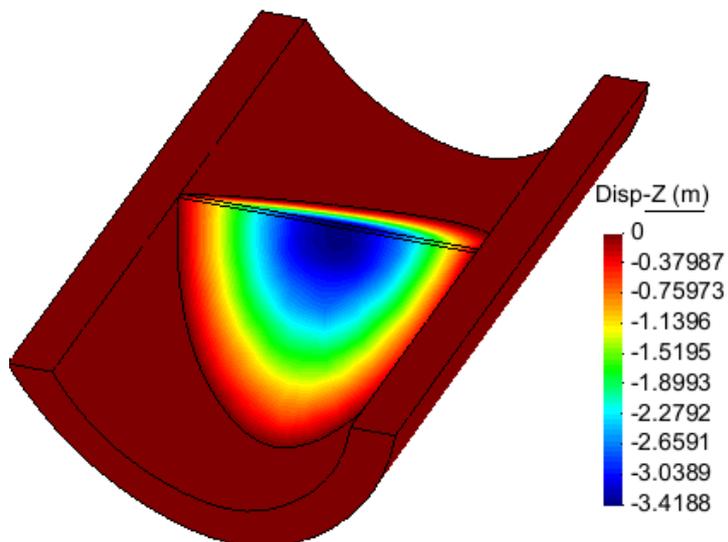


Figura 56. Mapa de desplazamientos en el eje Z.

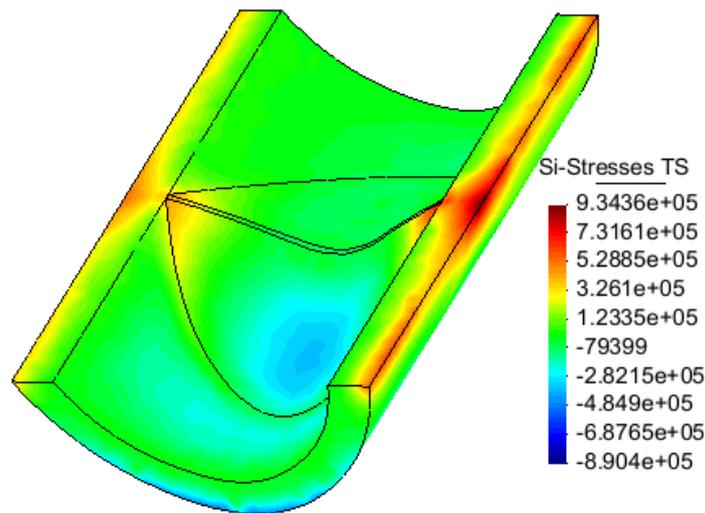


Figura 57. Deformación de la presa.

Como podemos ver, los resultados nos han mostrado como para la combinación de cargas más crítica (peso propio + carga hidrostática) ha producido en el conjunto estudiado una tracción máxima de 0,93 MPa. Analizando con más detalle este dato podemos comprobar que esta tracción no se produce en la presa sino en el terreno.

La tracción máxima producida en la presa tiene una magnitud de 0,8457 Mpa. Y se encuentra en la unión superior de la presa con el terreno en uno de los lados.

Por lo que podemos observar, el estudio tridimensional muestra como las tracciones máximas tanto de la presa como del terreno son superiores al valor requerido en el problema 0,5 MPa, es decir, el diseño no es aceptable.

Las tensiones de compresión máximas producidas en el conjunto arrojan un valor de -1.54 MPa y se encuentran localizadas en la base del perfil del terreno ubicadas en la zona de la presa.

La grafica de deformación de la presa muestra cómo se producen grandes desplazamientos en los ejes X, Y y Z, que causan un gran daño a la zona central de la presa. Tanto esta zona como los puntos de unión superiores entre el terreno y la presa tendrán que ser tenidos en cuenta y cuidados minuciosamente en las siguientes fases del diseño.

4.5 CONCLUSIONES

Como se ha podido apreciar, el análisis en teoría bidimensional de deformación plana y la verificación mediante teoría tridimensional de sólidos 3D no reflejan los mismos resultados. Los esfuerzos máximos de tracción que sufre la presa no se habrían podido identificar con el modelo bidimensional. Los esfuerzos a tracción máximos que se aprecian en el modelo 3D aparecen en la unión de la coronación de la presa con el terreno; localización no estudiada en el modelo bidimensional.

Por otra parte las tracciones máximas que se aprecian en el modelo bidimensional corresponden a las máximas sufridas por esa sección trasversal de la presa, no siendo las tracciones máximas que sufre el conjunto de la presa y el terreno.

Con respecto al dimensionado de la presa, ha quedado claro que aunque proporciona un resultado aceptable en el análisis bidimensional con la teoría de deformación plana, para el análisis mediante sólidos 3D no cumple con las especificaciones requeridas en el enunciado. Por lo tanto se requeriría otro diseño que aportara los requisitos necesarios de tensiones de tracción inferiores a 0,5 MPa.

Podemos concluir con los siguientes comentarios:

- El análisis bidimensional en teoría de deformación plana estudia el estado tensional de una sección de la presa por lo que no es suficiente para conocer la globalidad tensional real.
- En el análisis tridimensional se conoce el estado tensional global del problema aunque sea más complicado su modelado.