

DISEÑO PRESA

PROBLEMA S-23

MANEL MATEU CASAN

Fecha de entrega: 26/01/2015

## Contenido

1.	PROBLEMA PLANTEADO.....	3
2.	Análisis bidimensional.....	4
2.1.	Análisis teórico .....	4
2.2.	Malla usada .....	5
2.3.	Análisis de convergencia .....	7
2.4.	Diseño presa. Variación pendiente taludes. ....	8
2.4.1.	Pendientes taludes $m=1.6$ y $n=1.6$ .....	8
2.4.1.1.	Peso propio .....	8
2.4.1.2.	Peso propio más empuje hidrostático .....	9
2.4.2.	Pendientes taludes $m=1.9$ y $n=1.6$ .....	10
2.4.2.1.	Peso propio .....	10
2.4.2.2.	Peso propio más empuje hidrostático .....	11
2.4.3.	Pendientes de talud $m=1.9$ y $n=1.9$ .....	11
2.4.3.1.	Peso propio .....	11
2.4.3.2.	Peso propio más empuje hidrostático .....	12
3.	Análisis tridimensional .....	13
3.1.	Análisis teórico .....	13
3.2.	Malla utilizada .....	14
3.3.	Análisis de convergencia .....	14
3.4.	Verificación del modelo en 3D .....	14
4.	CONCLUSIONES .....	18

**Índice de figuras**

Figura 1 Perfil emplazamiento.....	3
Figura 2 Sección presa con los pendientes a optimizar .....	3
Figura 3 Condiciones de contorno usadas.....	4
Figura 4 Cargas actuantes en la presa en el caso de considerar además del peso propio el agua de llenado.....	4
Figura 5 Desplazamientos verticales obtenidos con los parámetros dados inicialmente .....	4
Figura 6 Desplazamientos verticales obtenidos con los parámetros de los materiales corregidos .....	5
Figura 7 Malla triangular de 3 nodos no estructurada de tamaño máximo de 8m .....	6
Figura 8 Malla irregular triangular de 3 nodos con tamaño máximo de elemento de 3m.....	6
Figura 9 Análisis convergencia asentamiento presa.....	7
Figura 10 Convergencia tensión vertical.....	7
Figura 11 Análisis convergencia tensión principal Si .....	8
Figura 12 Tensiones verticales $S_y$ con peso propio, $m=1.6$ y $n=1.6$ .....	8
Figura 13 Tensiones principales $S_i$ con peso propio, $m=1.6$ y $n=1.6$ .....	9
Figura 14 Detalle concentración tensiones en el terreno junto con la unión con la base de la presa .....	9
Figura 15 Tensiones verticales $S_y$ con peso propio más carga hidrostática $m=1.6$ y $n=1.6$ .....	9
Figura 16 Tensiones principales $S_i$ con peso propio más carga hidrostática $m=1.6$ y $n=1.6$ .....	10
Figura 17 Tensiones verticales $S_y$ con peso propio, $m=1.9$ y $n=1.6$ .....	10
Figura 18 Tensiones principales $S_i$ con peso propio, $m=1.9$ y $n=1.6$ .....	10
Figura 19 Tensiones verticales $S_y$ con peso propio más carga hidrostática $m=1.9$ y $n=1.6$ .....	11
Figura 20 Tensiones principales $S_i$ con peso propio más carga hidrostática $m=1.9$ y $n=1.6$ .....	11
Figura 21 Tensiones verticales $S_y$ con peso propio, $m=1.9$ y $n=1.9$ .....	11
Figura 22 Tensiones principales $S_i$ con peso propio, $m=1.9$ y $n=1.9$ .....	12
Figura 23 Tensiones verticales $S_y$ con peso propio más carga hidrostática $m=1.9$ y $n=1.9$ .....	12
Figura 24 Tensiones principales $S_i$ con peso propio más carga hidrostática $m=1.9$ y $n=1.9$ .....	12
Figura 25 Condiciones de contorno impuestas en el modelo tridimensional .....	13
Figura 26 Vista plana de la geometría de la presa intersecada con el terreno .....	13
Figura 27 Asignación de grupos de volúmenes y modificación de la transparencia para una correcta manipulación.....	14
Figura 28 Modelo 3d presa solamente considerando peso propio. Tamaño máximo elemento tetraédrico 4 nodos de 15m. ....	14
Figura 29 Tensiones principales $S_i$ teniendo en cuenta el empuje hidrostático (77m altura agua) .....	15
Figura 30 Alzado de la presa des del lado llenado de agua. Los círculos en gris muestran las zonas de concentración de tensiones. ....	15
Figura 31 Tensiones principales en unión de la presa con el terreno en pared vertical .....	16
Figura 32 Desplazamientos verticales presa debido a peso propio y carga hidrostática. Malla de tetraedros de tamaño máximo igual a 10m .....	16
Figura 33 Desplazamiento en dirección longitudinal de la presa .....	17

**Índice de tablas**

Tabla 1 Propiedades de los materiales dadas .....	3
Tabla 2 Propiedades de los materiales modificadas .....	5
Tabla 3 Refinamiento de la malla llevado a cabo con elemento triangular de 3 nodos.....	6

### 1. PROBLEMA PLANTEADO

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

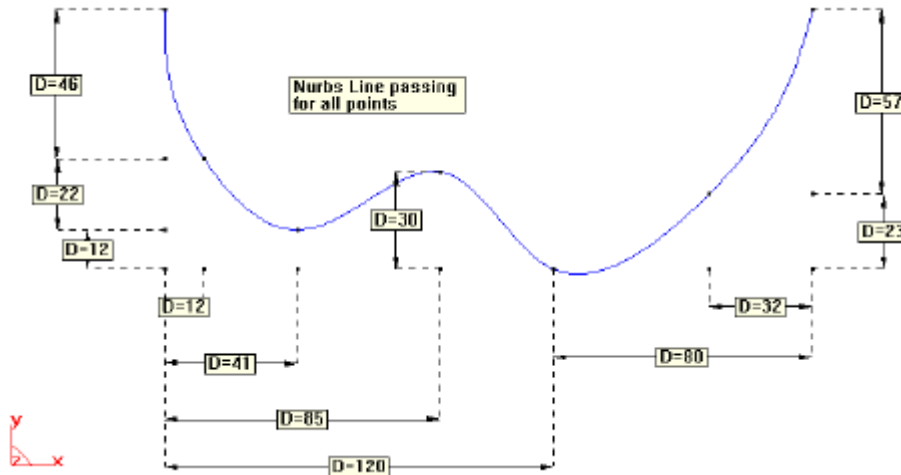


Figura 1 Perfil emplazamiento

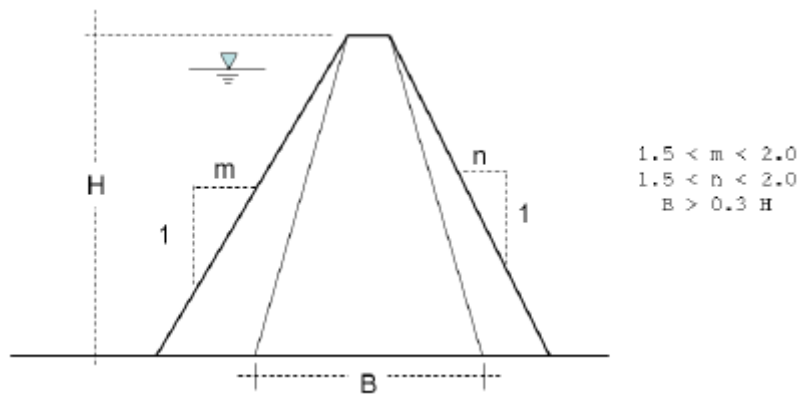


Figura 2 Sección presa con los pendientes a optimizar

Material	Módulo Elasticidad(N/m <sup>2</sup> )	Coficiente Poisson	Peso específico(N/m <sup>3</sup> )
Arcilla (núcleo)	8e6	0.4	19000
Material de construcción	9.9e6	0.285	20000
Cimentación(terreno)	3.5e10	0.3	20000

Tabla 1 Propiedades de los materiales dadas

## 2. Análisis bidimensional

### 2.1. Análisis teórico

Se analiza la sección de la presa que tiene 80m de altura por ser la que tendrá las condiciones más desfavorables (mayores tensiones debido al peso propio y también la carga hidrostática máxima).

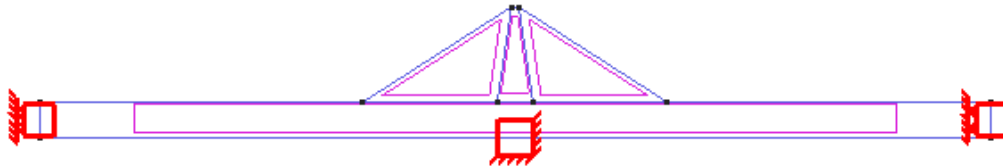


Figura 3 Condiciones de contorno usadas

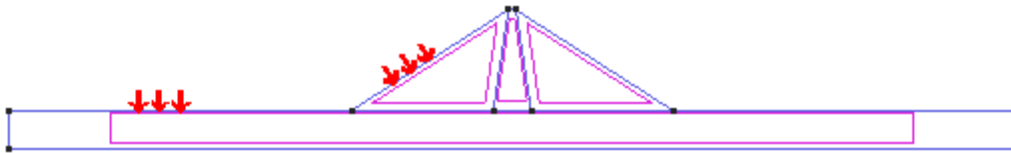


Figura 4 Cargas actuantes en la presa en el caso de considerar además del peso propio el agua de llenado

Sucede que con los módulos de elasticidad proporcionados para la arcilla y el material de construcción, se obtienen los siguientes desplazamientos verticales en el caso de peso propio y con pendientes  $m=1.6$  y  $n=1.6$ :

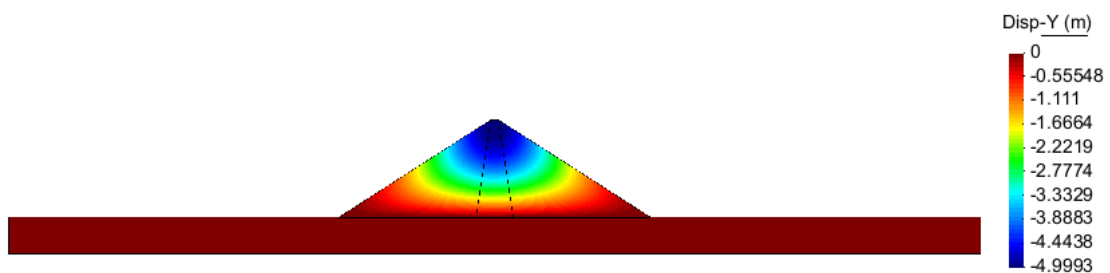


Figura 5 Desplazamientos verticales obtenidos con los parámetros dados inicialmente

Si la intención es que la presa opere con una cota del nivel de agua de 77m, tener un desplazamiento de 5m en el punto más alto de la presa de 80m, implicaría que no cumpliría con su función de contener el agua. Se propone por lo tanto aumentar los módulos de elasticidad de estos materiales para reducir estos movimientos. A la práctica esto supondría tener que proveerse de un material con estas especificaciones si no estuviera in situ, con su coste correspondiente de transporte.

Las propiedades de los materiales serán las siguientes tras el incremento del módulo de elasticidad de la arcilla y el material de construcción de la presa:

Material	Módulo Elasticidad(N/m <sup>2</sup> )	Coefficiente Poisson	Peso específico(N/m <sup>3</sup> )
Arcilla (núcleo)	<b>8e8</b>	0.4	19000
Material de construcción	<b>9.9e8</b>	0.285	20000
Cimentación(terreno)	3.5e10	0.3	20000

Tabla 2 Propiedades de los materiales modificadas

Ahora ya obtenemos unos desplazamientos verticales más acorde a la obra que se propone construir:

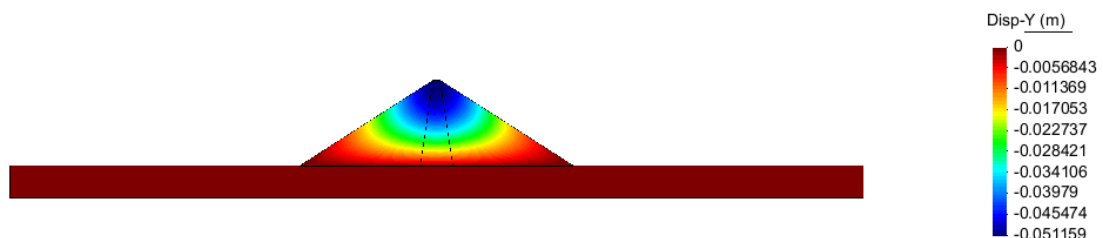


Figura 6 Desplazamientos verticales obtenidos con los parámetros de los materiales corregidos

## 2.2. Malla usada

La malla empleada para el cálculo de la presa es de tipo no estructurada triangular de 3 nodos. El hecho de no usarla estructurada es debido al hecho de que al haber áreas de forma distinta a paralelepípedos, la única forma de mallar es tal como se ha hecho. En la siguiente figura se puede observar ilustrativamente la disposición de los nodos para una malla de tamaño máximo del elemento de 8m como una inicial aproximación:

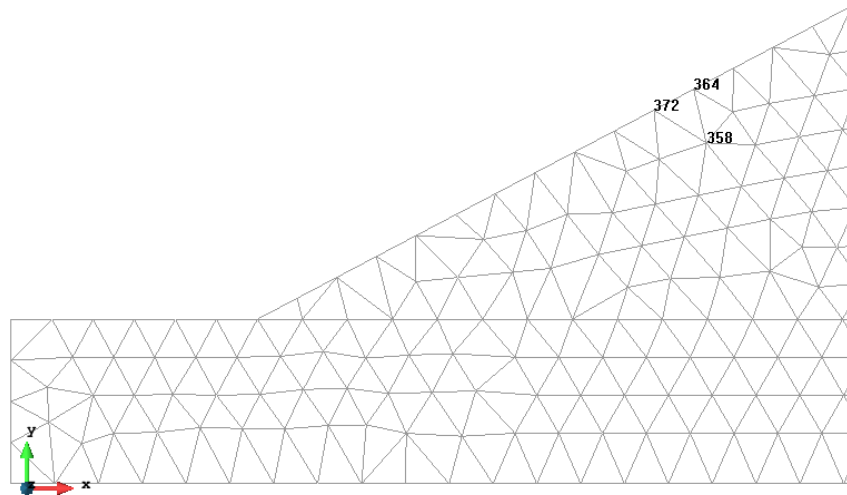


Figura 7 Malla triangular de 3 nodos no estructurada de tamaño máximo de 8m

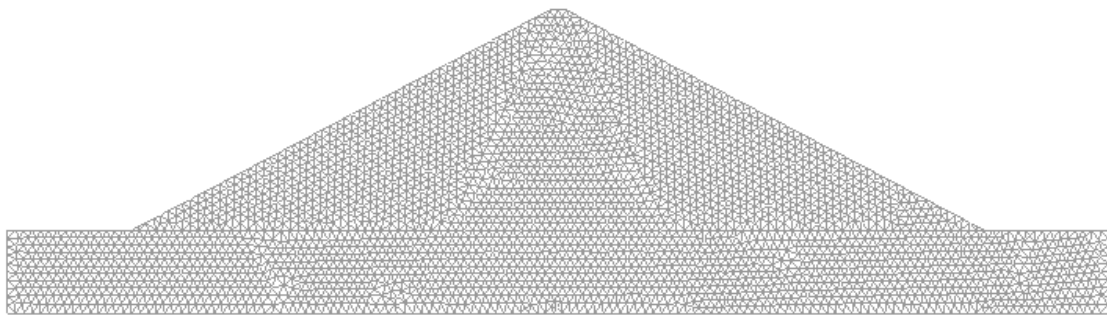


Figura 8 Malla irregular triangular de 3 nodos con tamaño máximo de elemento de 3m

Tamaño máx. elemento	Número de nodos
0,9m	35073
1m	28349
1,5m	24855
2m	13899
2,5m	4637
3m	3195

Tabla 3 Refinamiento de la malla llevado a cabo con elemento triangular de 3 nodos

Se ha tratado además de usar una malla estructurada grosera en el suelo que actúa como cimiento de la presa y otra no estructura más fina en la presa, no obstante ha sido fuente de error constante con lo que no se ha podido llegar en ninguna ocasión al post-proceso mediante esta técnica usada en otros problemas anteriormente y que permite optimizar el cálculo en zonas de interés de una estructura.

### 2.3. Análisis de convergencia

Un parámetro importante durante la construcción de una presa es el desplazamiento vertical de ésta, registrado normalmente en el punto más alto.

Las tensiones objeto de estudio serán  $S_y$  e  $S_x$ .  $S_x$  se observa que es de compresión, por lo que no será tratada en particular. El hecho de analizar  $S_i$  y no  $S_{ii}$  o  $S_{iii}$  es debido a que con la primera ya se estará tratando el valor más alto de tensión, por definición de éste.

El siguiente análisis de convergencia se ha hecho con el modelo bidimensional de presa sometido a presión hidrostática y peso propio con pendiente de taludes de 1.9 a ambos lados.

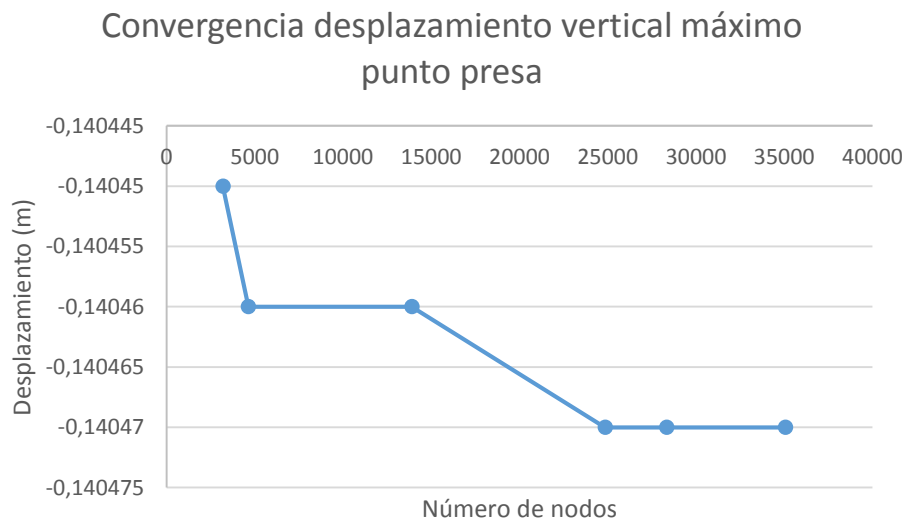


Figura 9 Análisis convergencia asentamiento presa

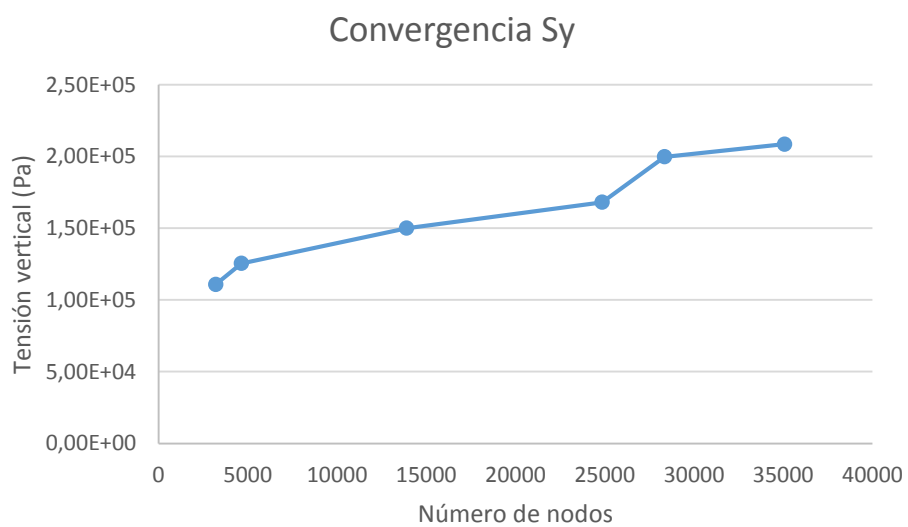


Figura 10 Convergencia tensión vertical



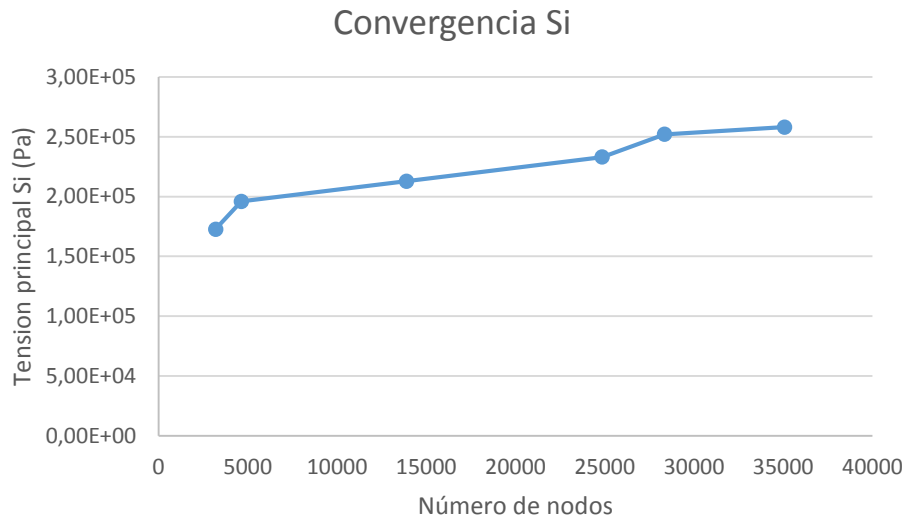


Figura 11 Análisis convergencia tensión principal Si

La convergencia del desplazamiento vertical es indudable a partir de una malla inferior a 1.5m de tamaño máximo del elemento. En cambio para las dos tensiones que nos interesan, no acaba produciéndose una convergencia destacada antes de que sea imposible llevar a buen puerto la resolución del sistema de ecuaciones planteado con un refinamiento inferior a 0.9m. Por lo tanto, de aquí en adelante se usará este tamaño para el cálculo de los diseños propuestos.

## 2.4. Diseño presa. Variación pendiente taludes.

### 2.4.1. Pendientes taludes m=1.6 y n=1.6

#### 2.4.1.1. Peso propio

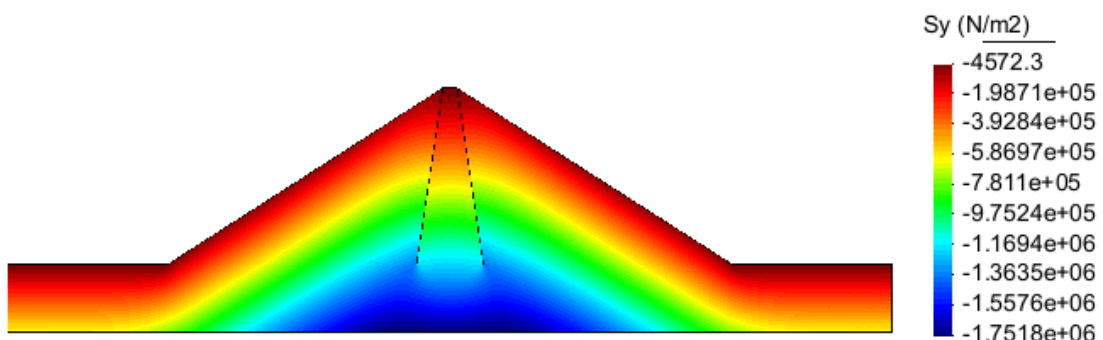


Figura 12 Tensiones verticales Sy con peso propio, m=1.6 y n=1.6

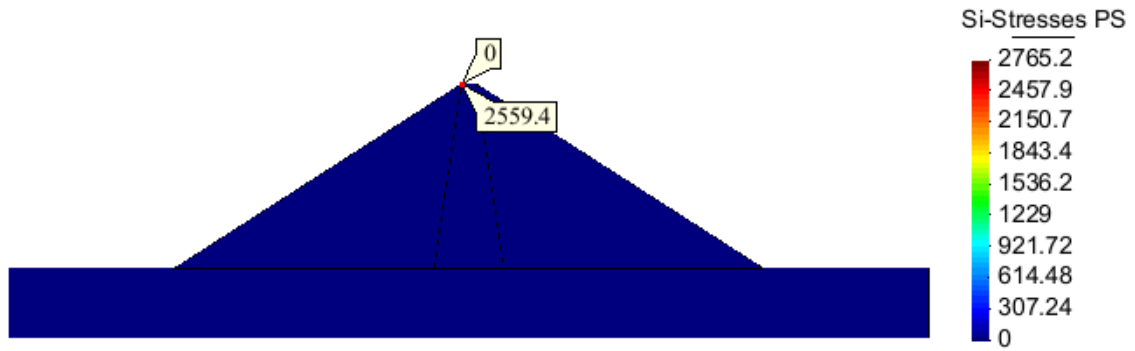


Figura 13 Tensiones principales Si con peso propio,  $m=1.6$  y  $n=1.6$

En la unión de la presa con el cimiento, en el paramento interior se produce una concentración de tensiones pero que no es objeto de estudio, pues la condición de 0.2Mpa máximo en tracciones se limita a puntos de la presa.

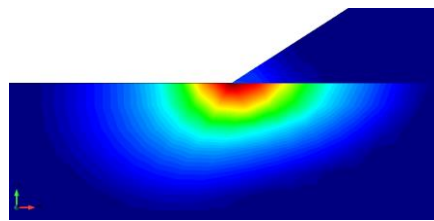


Figura 14 Detalle concentración tensiones en el terreno junto con la unión con la base de la presa

2.4.1.2. Peso propio más empuje hidrostático

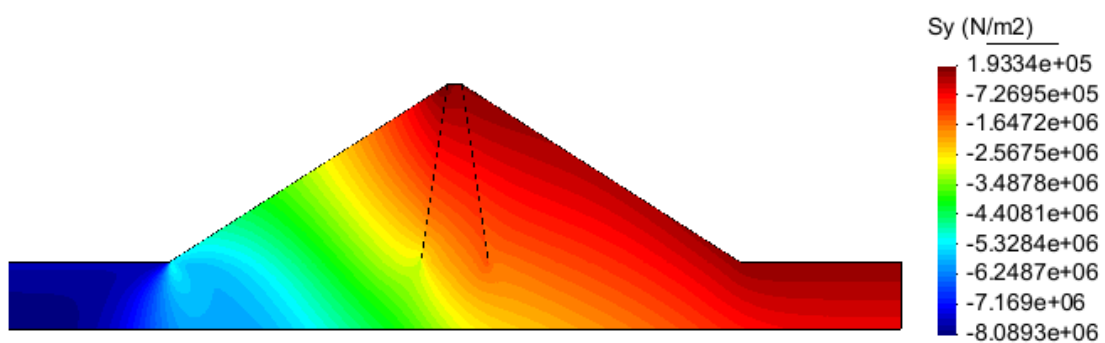


Figura 15 Tensiones verticales Sy con peso propio más carga hidrostática  $m=1.6$  y  $n=1.6$

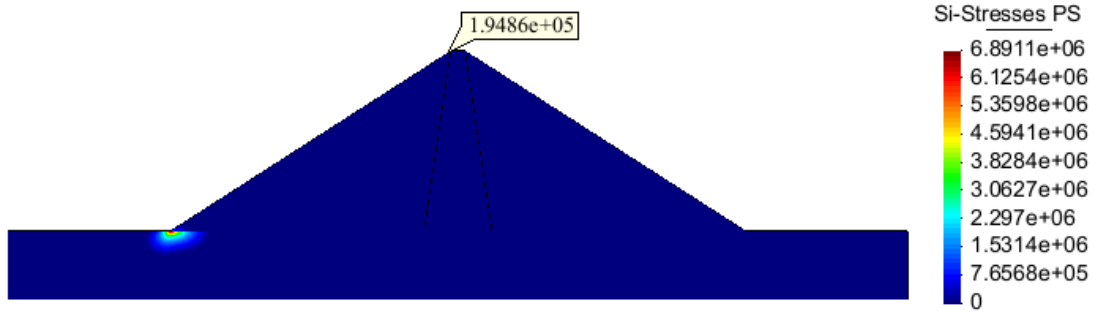


Figura 16 Tensiones principales Si con peso propio más carga hidrostática  $m=1.6$  y  $n=1.6$

### 2.4.2. Pendientes taludes $m=1.9$ y $n=1.6$

#### 2.4.2.1. Peso propio

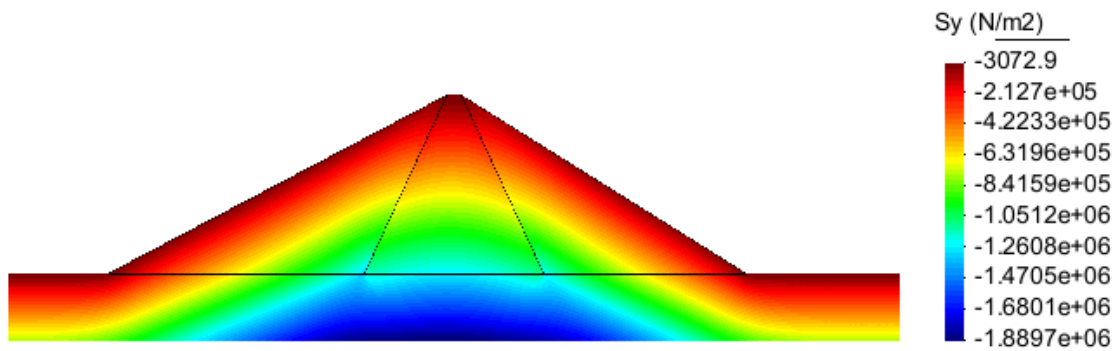


Figura 17 Tensiones verticales Sy con peso propio,  $m=1.9$  y  $n=1.6$

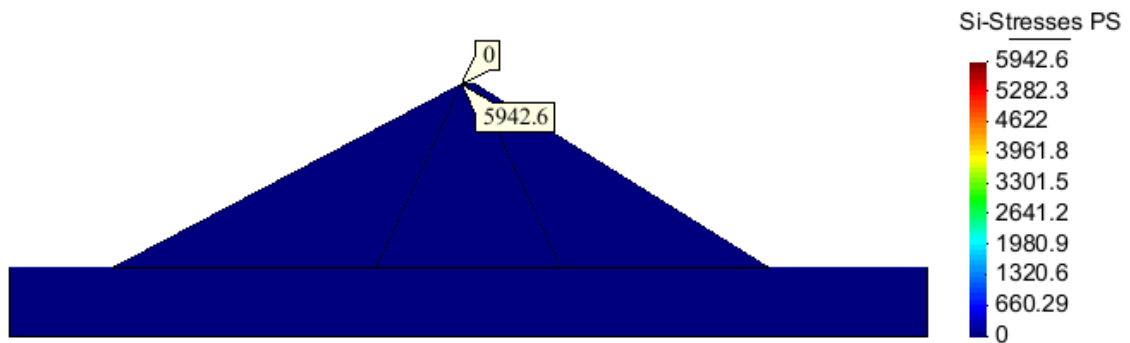


Figura 18 Tensiones principales Si con peso propio,  $m=1.9$  y  $n=1.6$

2.4.2.2. Peso propio más empuje hidrostático

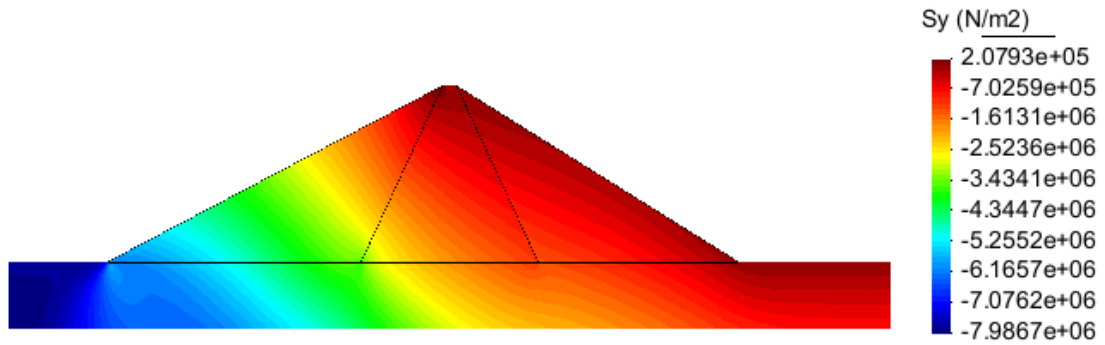


Figura 19 Tensiones verticales  $S_y$  con peso propio más carga hidrostática  $m=1.9$  y  $n=1.6$

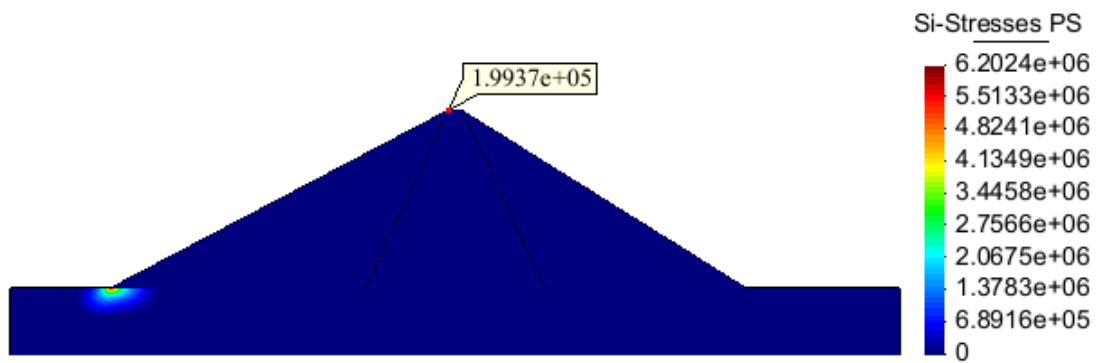


Figura 20 Tensiones principales  $S_i$  con peso propio más carga hidrostática  $m=1.9$  y  $n=1.6$

2.4.3. Pendientes de talud  $m=1.9$  y  $n=1.9$

2.4.3.1. Peso propio

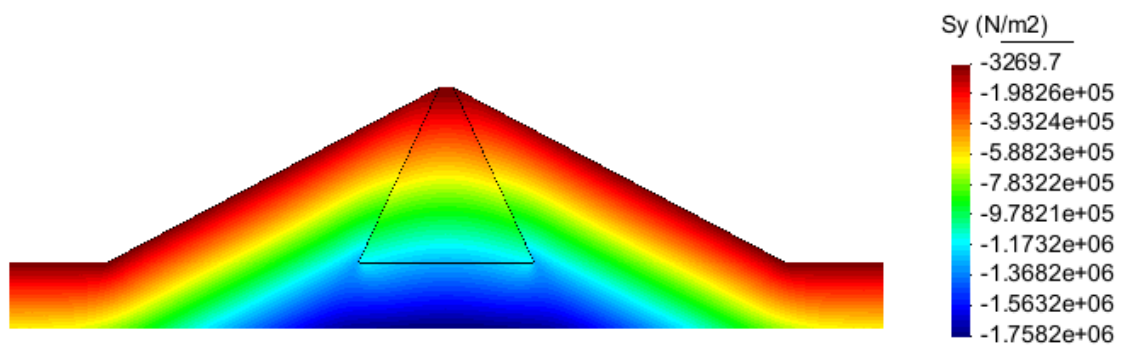


Figura 21 Tensiones verticales  $S_y$  con peso propio,  $m=1.9$  y  $n=1.9$

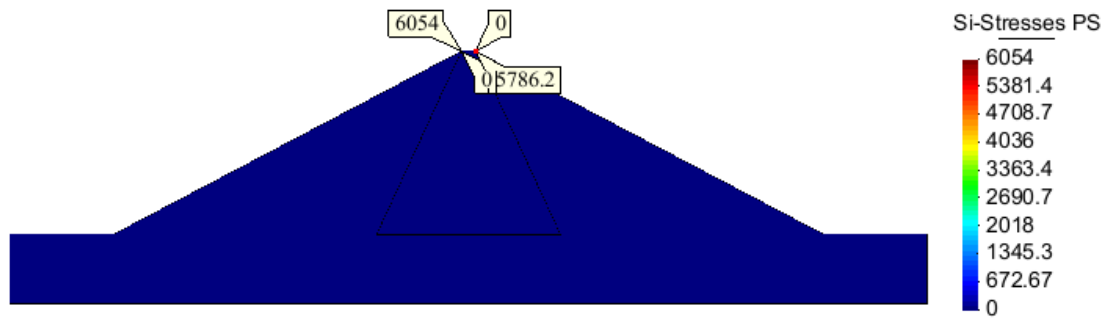


Figura 22 Tensiones principales Si con peso propio,  $m=1.9$  y  $n=1.9$

2.4.3.2. Peso propio más empuje hidrostático

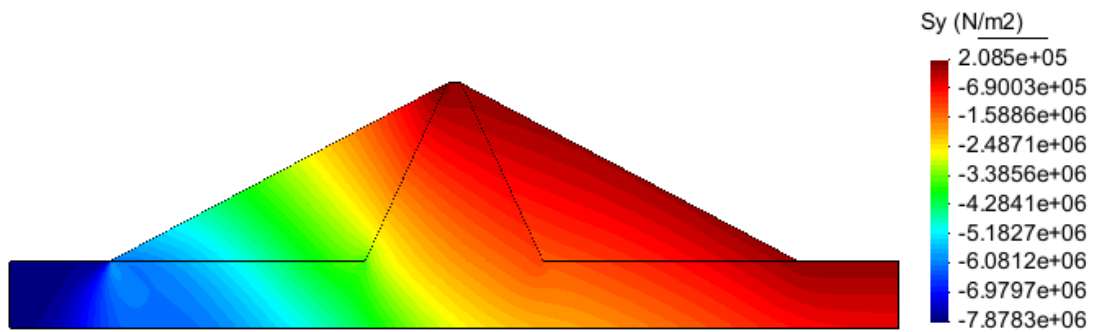


Figura 23 Tensiones verticales Sy con peso propio más carga hidrostática  $m=1.9$  y  $n=1.9$

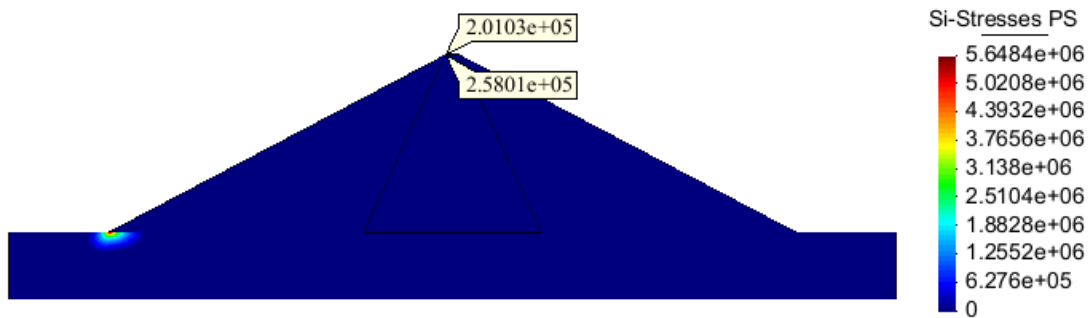


Figura 24 Tensiones principales Si con peso propio más carga hidrostática  $m=1.9$  y  $n=1.9$

### 3. Análisis tridimensional

Se comprobará mediante este modelo que se siguen cumpliendo las condiciones exigidas para el diseño seleccionado en el análisis bidimensional.

#### 3.1. Análisis teórico

Este problema es resuelto mediante la modelización en 3 dimensiones que posibilita el módulo *3D Solids* de Ramseries, previamente instalado en el software GiD.

La manera de introducir el modelo consistirá en ir intersecando planos para más tarde crear volúmenes que nos permitirá trabajar con el núcleo, material de construcción (o relleno) y la cimentación.

Las condiciones de contorno son idénticas al caso bidimensional con la diferencia que ahora se aplican sobre toda una superficie en vez de línea como antes.

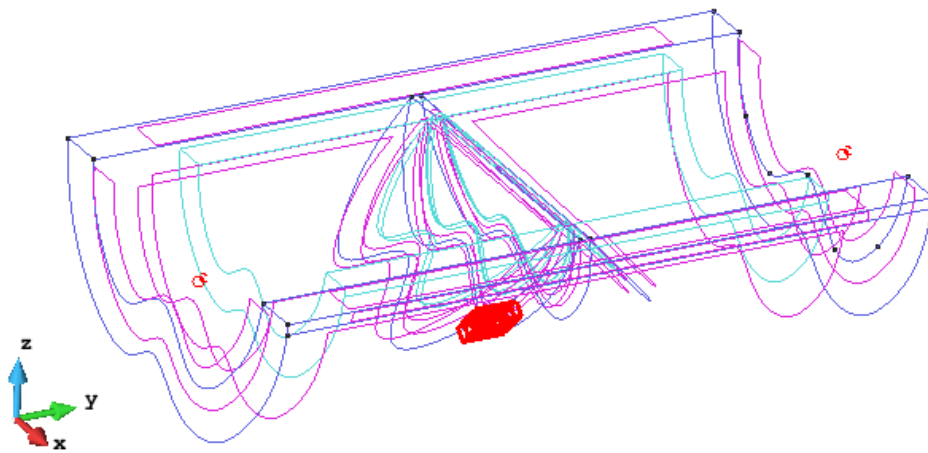


Figura 25 Condiciones de contorno impuestas en el modelo tridimensional

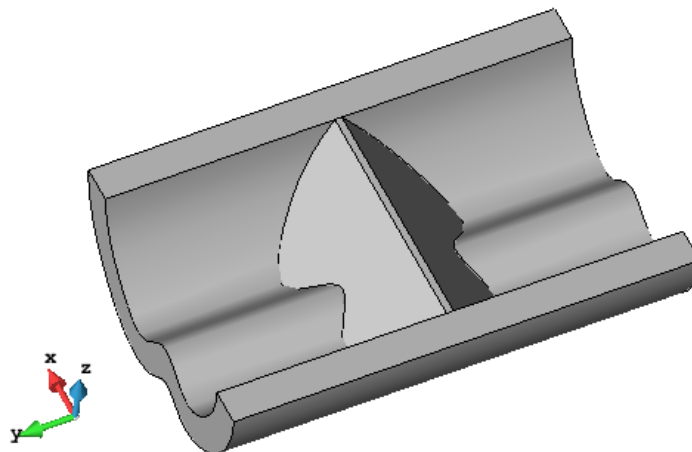


Figura 26 Vista plana de la geometría de la presa intersecada con el terreno

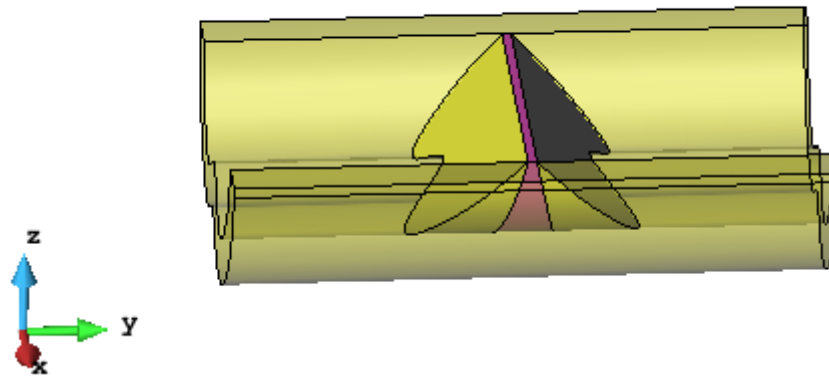


Figura 27 Asignación de grupos de volúmenes y modificación de la transparencia para una correcta manipulación

### 3.2. Malla utilizada

Al tratarse de un sólido tridimensional, la malla por excelencia cuando se requiera desestructurada será compuesta por tetraedros. En nuestro caso serán de 4 nodos debido a la magnitud del problema.

### 3.3. Análisis de convergencia

Debido al hardware del ordenador con el que se ha hecho el estudio, ha resultado inviable llevar a cabo un refinamiento progresivo de la malla ya que introduciendo tamaño máximo del elemento igual a 10m resulta en más de 1h y 30min para realizar la resolución del sistema.

### 3.4. Verificación del modelo en 3D

Primeramente se comprueba sin la acción hidrostática. En el apartado anterior, caso bidimensional, habíamos seleccionado el primer diseño ya que cumplía con la condición de tracciones máximas en toda la presa y a la vez ahorraba en volumen de material necesario para construirla.

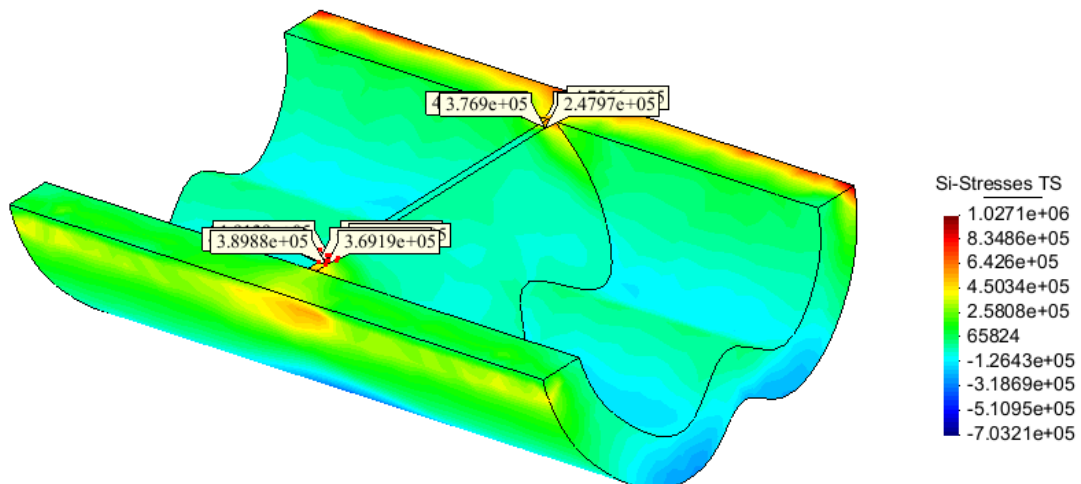


Figura 28 Modelo 3d presa solamente considerando peso propio. Tamaño máximo elemento tetraédrico 4 nodos de 15m.

Analizando las tensiones principales  $S_i$ , nos damos cuenta que debido a la interacción lateral que ahora tiene la presa con el terreno (o más bien dicho las paredes del valle), ya no es así.

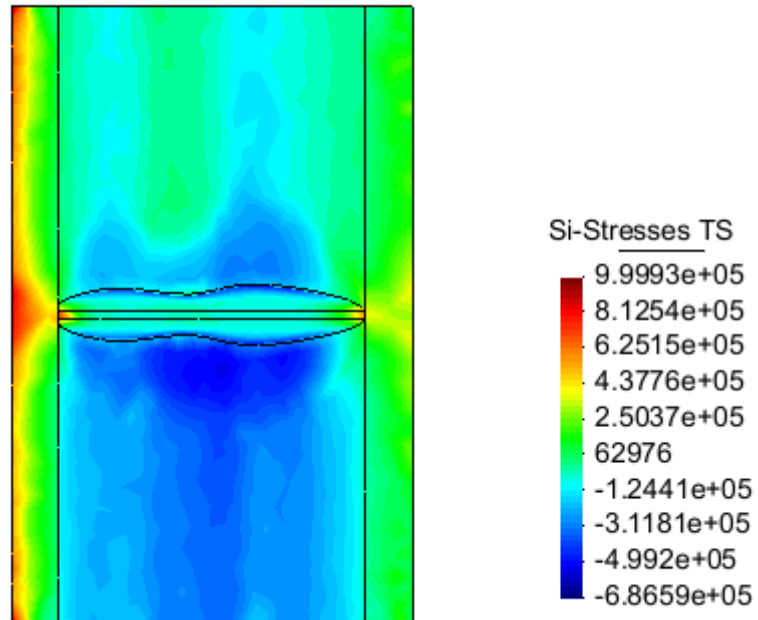


Figura 29 Tensiones principales  $S_i$  teniendo en cuenta el empuje hidrostático (77m altura agua)

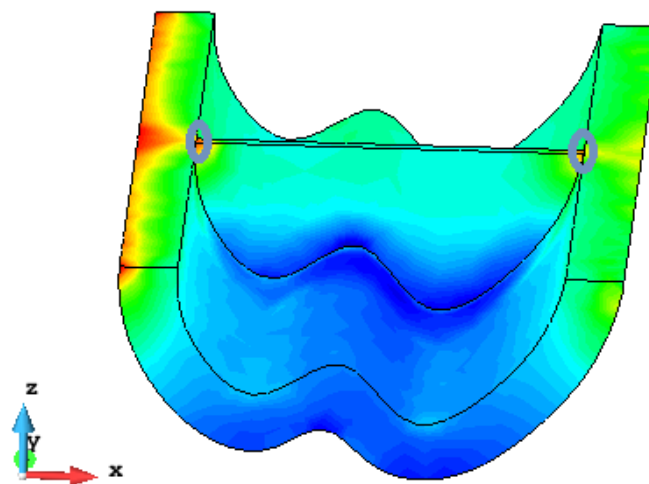


Figura 30 Alzado de la presa des del lado llenado de agua. Los círculos en gris muestran las zonas de concentración de tensiones.

Ampliando las zonas marcadas con un círculo gris en la figura anterior:



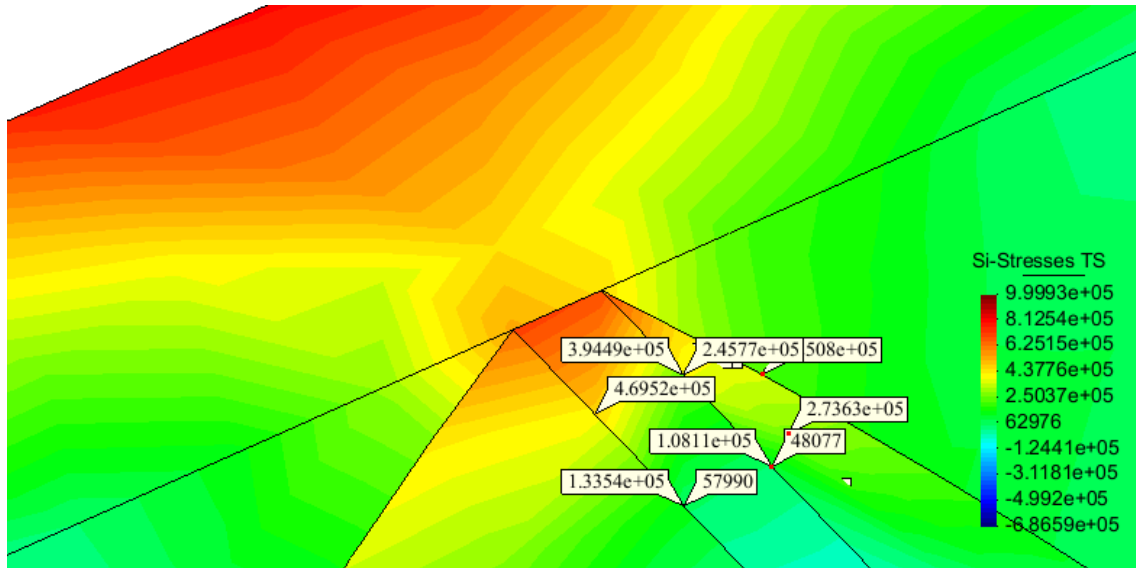


Figura 31 Tensiones principales en unión de la presa con el terreno en pared vertical

Se trata de una pequeña zona situada en la coronación de la presa, en ambos extremos con tracciones de 0.4MPa. Vemos que rápidamente decrece a valores admisibles, situándose por debajo de los 0.2MPa. Siendo conscientes de este fenómeno que se produce en uniones entre materiales especialmente angulosas o abruptas, se dará la solución por buena.

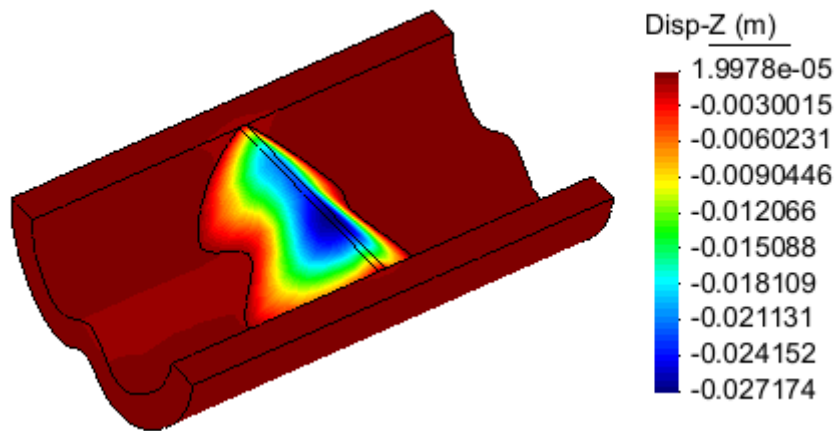
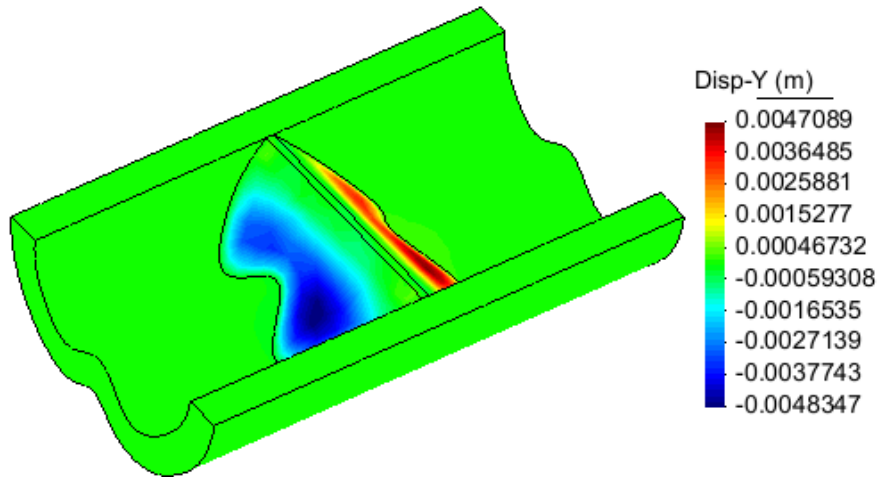


Figura 32 Desplazamientos verticales presa debido a peso propio y carga hidrostática. Malla de tetraedros de tamaño máximo igual a 10m

Por lo que respecta a los desplazamientos verticales, se continúan registrando sus valores máximos en los puntos de sección más desfavorable pero con un valor ligeramente superior al

calculado en el modelo bidimensional. En el modelo tridimensional, aunque muy pequeños, se obtienen desplazamientos ascendentes en las zonas en contacto con el terreno.



*Figura 33 Desplazamiento en dirección longitudinal de la presa*

Por lo que respecta a los desplazamientos en la dirección perpendicular a los paramentos, al contrario de lo que pueda parecer, en la cara en contacto con el agua irá en sentido contrario al de la presión hidrostática mientras que en el paramento exterior sí que se desplazará en el mismo sentido que el empuje citado.

## 4. CONCLUSIONES

Mediante la utilización del polivalente software GiD se ha tratado de modelizar un problema real con un nivel de aproximación de la representación bastante preciso. Por ejemplo, el fondo del valle no era una simple concavidad simétrica o había más de un material para la construcción de la presa.

Se han analizado distintos pendientes durante la resolución en dos dimensiones para el caso más desfavorable que es el sacado de analizar la sección con la altura de presa máxima respecto a la cimentación. El diseño hallado consiste en que los dos pendientes a cada lado sean iguales y los mínimos posibles. Y en donde se registran tensiones principales  $S_i$  de  $1.9 \cdot 10^5$  Pa.

A medida que se reducían los pendientes (caso extremo visto entre los permitidos por el rango de  $m$  y  $n$ , es decir, iguales a 1.9m) los valores de las tensiones principales se incrementaban.

La resolución del problema mediante análisis tridimensional ha dado la aparición de una concentración de tensiones anteriormente inexistente, la de los extremos de la coronación. Identificada como tal, se analizan el resto de puntos de material de la presa, ya sean pertenecientes al núcleo o a los paramentos, y se concluye que no se supera la condición de tracciones máximas iguales a 0.2Mpa. Se observa además que el paso del modelo bidimensional a este más desarrollado permite una visualización más precisa de los desplazamientos que hay. Además de la inclusión de un tercer desplazamiento que antes no podíamos visualizar al ser bidimensional. Los valores de estos desplazamientos siguen teniendo el mismo orden de magnitud que en el caso de dos dimensiones aunque doblan su valor en algunos puntos.

Durante la resolución de este problema se ha podido comprobar la exigencia en cuanto a recursos informáticos se refiere. Pasar de 2D a 3D ha significado poder llevar a cabo pocos cálculos y que éstos duraran horas. Resulta relevante pues en el caso de aplicar estos modelos a casos reales disponer de tiempo suficiente para llevar a cabo un buen refinamiento de la malla así como la capacidad del procesador.

Finalmente y a modo de recapitulación, destacar la importancia de escoger materiales de construcción de buenas propiedades mecánicas en obra pues así pueden evitarse problemas a largo término tales como el colapso de la presa debido a un asentamiento excesivo de sus materiales.