

E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona



Máster en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos

INGENIERÍA DE LAS ESTRUCTURAS

S-12

DIMENSIONAMIENTO Y ANÁLISIS DEL
COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DE
UNA PRESA DE GRAVEDAD DE HORMIGÓN
EN MASA

9 DE JUNIO DE 2015

EL ALUMNO
JOAQUÍN PERTIERRA BRASA

ÍNDICE:

1.- MEMORIA:	3
1.1 Introducción:.....	3
1.2 Objeto de la práctica:	3
2.- Caso a analizar:	3
3.- Modelización 2D:	4
3.1 Estudio de convergencia:.....	4
3.2 Análisis de los resultados obtenidos:	4
4.- Modelización 3D:	6
4.1 Estudio de convergencia:.....	6
4.2 Análisis de los resultados obtenidos:	8
5.- COMPARACIÓN DE RESULTADOS:	11

1.- MEMORIA:

1.1 Introducción:

En la presente memoria explicativa se detallan los pasos seguidos para la consecución del proyecto. En primera instancia se plantearán los problemas objeto de la práctica para seguir con las justificaciones y aclaraciones pertinentes para la completa comprensión de la misma.

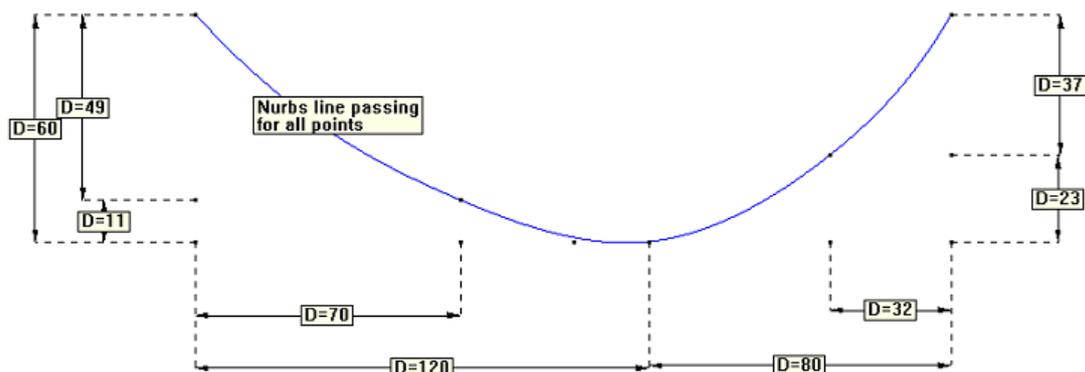
1.2 Objeto de la práctica:

El objeto de la presente práctica es la realización de un análisis sobre el comportamiento estructural de una presa de gravedad de hormigón en masa, de 60 metros de altura y 4 metros de anchura en coronación, mediante el uso del Método de los Elementos Finitos. Para ello se hará uso del programa GiD, creado y desarrollado por el CIMNE, y del solver RamSeries en su versión académica, en su apartado de cálculo mediante el MEF para estructuras en 3D, y en 2D bajo las hipótesis de deformación plana. Previamente se deberá optimizar la geometría con el fin de optimizar coste y aprovechar al máximo las características resistentes de la estructura.

2.- Caso a analizar:

Para la realización del análisis estructural, se llevará a cabo un estudio bajo modelo estructural de dos dimensiones y otro de 3D. Es consabido que ,gracias a la uniformidad de la carga aplicada sobre el paramento aguas arriba de la presa y la simetría geométrica de la misma, se puede ejecutar un análisis en 2D bajo la hipótesis de deformación plana. De esta manera se obtiene un resultado bastante bueno y con un coste computacional relativamente bajo, comparado con el modelo estructural en 3D. Por otro lado, con el modelo en 3D seremos capaces de modelar con mayor exactitud la geometría del modelo y el comportamiento estructural de las partes más próximas al terreno natural.

Para el estudio de ambos modelos se realizará un estudio de la convergencia hacia un resultado según se utilice un tipo de elemento u otro, y según el tamaño del elemento de malla utilizado. El resultado observado será la deflexión máxima según el eje Z, en el caso del modelo 3D, tomando dicho valor en su valor absoluto, y el desplazamiento máximo según el eje X, en el caso del modelo 2D. Los tipos de elementos a utilizar serán triangulares de 3 nodos, para el caso del modelo en dos dimensiones, y de tetraedros de cuatro nodos, en el caso del modelo en tres dimensiones. A continuación se muestran los datos geométricos del problema, así como las características mecánicas de los materiales a utilizar y las acciones a considerar:



Módulo de Young: $E = 22.000 \text{ MPa}$

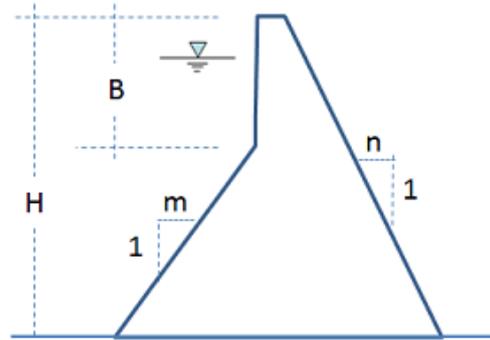
Coefficiente de Poisson: $\nu=0.2$

Peso específico del Hormigón: $\gamma=2500 \text{ Kg/m}^3$

Modulo de Young (terreno): $E=37.000 \text{ MPa}$

Coefficiente de Poisson: $\nu=0.3$

Peso específico del Terreno: $\gamma=2000 \text{ Kg/m}^3$



Figuras 1 y 2. Geometría de la cerrada de la presa, de la sección y características mecánicas de los materiales

Se impone la condición de que la tracción máxima en la cimentación sea de 2 MPa. Además, se establece una longitud de terreno de 800 metros de desarrollo y 30 metros de espesor. Las condiciones a satisfacer por la geometría de la sección transversal de la presa son:

$$\begin{aligned} 2.0 < m < 4.0 \\ 2.0 < n < 3.5 \\ 0.1 H < B < 0.3 H \end{aligned}$$

Siendo adoptados, finalmente, los valores que se muestran a continuación:

$$\begin{aligned} m &= 2 \\ n &= 2 \\ B &= 0.3 \times H = 18 \text{ metros} \end{aligned}$$

Ante estos valores cabe destacar que, pese a no ser los valores de m y n los que optimizan las funciones objetivo, debido a la altura de 60 metros que tiene la presa, la anchura máxima de cimentación era exageradamente grande. Por ello, se decidió minimizar dicha anchura a sabiendas de que esto no pondría en peligro el cumplimiento de la condición tensional existente.

En cuanto a situaciones de cálculo, se pide que se compruebe la presa a embalse vacío, considerando solamente el peso propio tanto de la presa como del terreno, y a embalse a un nivel de 58 metros de cota de agua, siendo la cota 0 el fondo del embalse y la cota 60 la de coronación. Con el fin de resumir, y aligerar así el presente informe, se ha calculado la segunda situación, puesto que se entendía que ya englobaba la otra y, en este caso debido a la exagerada geometría de la presa, no resultaba nada interesante el cálculo de la presa con el embalse vacío.

3.- Modelización 2D:

3.1 Estudio de convergencia:

Como en todo análisis estructural realizado mediante el MEF, se ha llevado a cabo un estudio de convergencia hacia un resultado, con el fin de escoger la malla más eficiente con la que obtener los resultados.

A la vista de la geometría y sabiendo que lo que se busca es las tensiones en la base de la presa, se lleva a cabo una combinación de dos mallas. Para el cuerpo de la presa se utiliza una malla no estructurada con elementos tipo triángulo de tres nodos. Sin embargo, para el terreno natural se utiliza una malla estructurada de elementos tipo cuadrilátero de cuatro nodos. De esta manera se minimiza el coste computacional, ya que se introduce una malla estructurada en la parte del terreno y, además, se escogen elementos cuadrangulares que se adaptan mejor a la geometría modelada para dicho terreno.

Para este caso, se han estudiado distintas mallas atendiendo al tamaño de los elementos triangulares que la componen:

	TAMAÑO	Nº NODOS	NºGDL	Desp. X (m)
<i>Triángulos 3N + Cuadriláteros 4N</i>	30	1223	3669	0.0015514
	25	1223	3669	0.0015507
	20	1222	3666	0.0015494
	15	1226	3678	0.0015513
	12.5	1229	3687	0.0015499
	10	1239	3717	0.0015533
	5	1396	4188	0.0015561
	4	1537	4611	0.0015565
	3	1851	5553	0.0015568
	2	2744	8232	0.0015569
	1	7610	22830	0.001557

Figura 3. Tabla de los datos para el estudio de convergencia

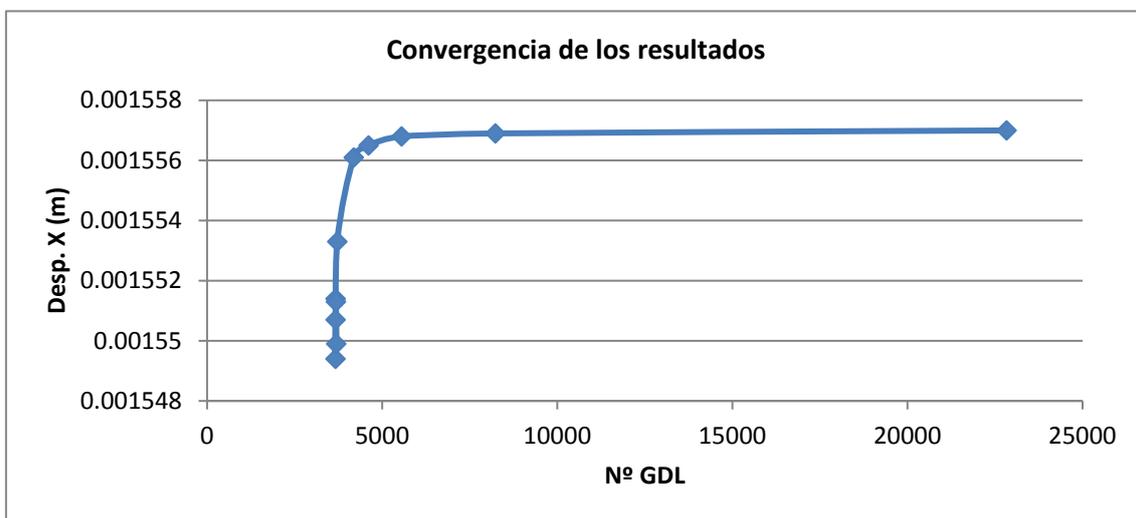


Figura 4. Gráfica del estudio de convergencia

Como se puede apreciar en las figuras 3 y 4, los resultados parece ser que se vayan a estabilizar en torno a un valor de 0.001557 metros de desplazamiento máximo según el eje X. Por todo ello para el análisis del comportamiento estructural del depósito, se hará uso de una **MALLA NO ESTRUCTURADA DE ELEMENTOS TRIANGULARES DE TRES NODOS Y TAMAÑO 3, PARA EL CUERPO DE LA PRESA, COMBINADA CON UNA MALLA ESTRUCTURADA DE ELEMENTOS CUADRILÁTEROS DE CUATRO NODOS Y TAMAÑO 5, PARA EL TERRENO NATURAL.** Cabe aclarar que no se toma el valor de 1 para el tamaño del

elemento triangular puesto que el coste computacional es muy elevado y ambos puntos parecen estar en la parte casi horizontal de la gráfica de convergencia.

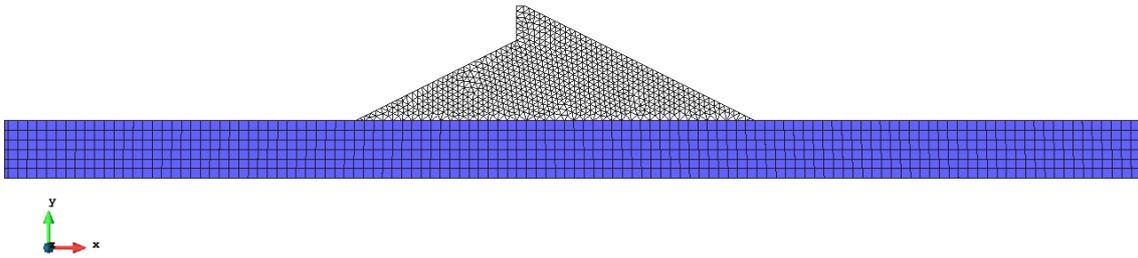


Figura 5. Malla de elementos finitos triangulares de tamaño 3 y malla de elementos cuadriláteros de tamaño 5.

Para la correcta consecución de un modelo estructural, no pueden faltar las condiciones de contorno a aplicar en los bordes del modelo. Dichas condiciones serán las siguientes:

GRADOS DE LIBERTAD	MOVIMIENTO X	MOVIMIENTO Y
EXTREMO IZO.	1	0
EXTREMO DCHO.	1	0
SUPERFICIE INFERIOR	0	1

* El grado de libertad tomará valor 1 cuando esté constreñido y valor 0 cuando no lo esté.

3.2 Análisis de los resultados obtenidos:

Una vez escogida la malla de elementos finitos, se ha analizado el estado tensional de la estructura obteniendo los resultados que se muestran ,de manera gráfica, a continuación:

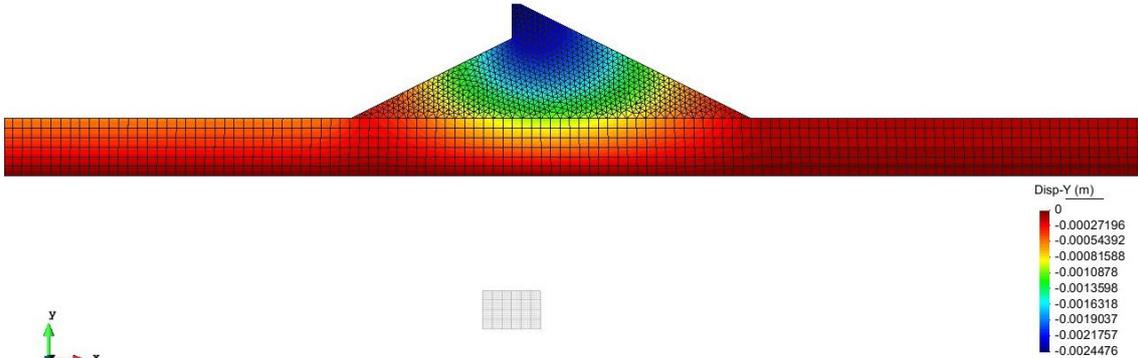


Figura 6. Mapa de isoáreas del desplazamiento según el eje Y

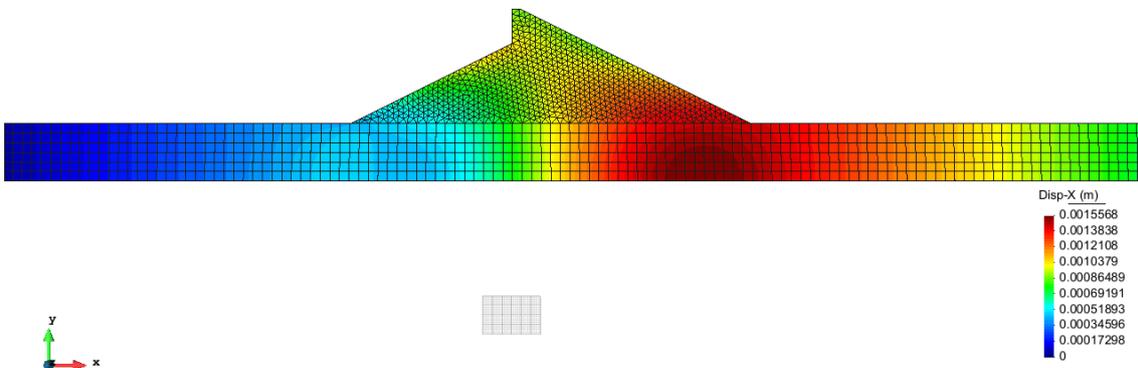


Figura 7. Mapa de isoáreas del desplazamiento según el eje X

En las dos figuras anteriores, la 6 y la 7, se puede observar cómo el efecto del agua embalsada empuja al cuerpo de la presa en sentido positivo del eje X, hacia la derecha de la figura; viéndose cómo el terreno se ve deformado de manera pseudo-simétrica en el caso de la figura que muestra los desplazamientos en el eje vertical, eje Y.

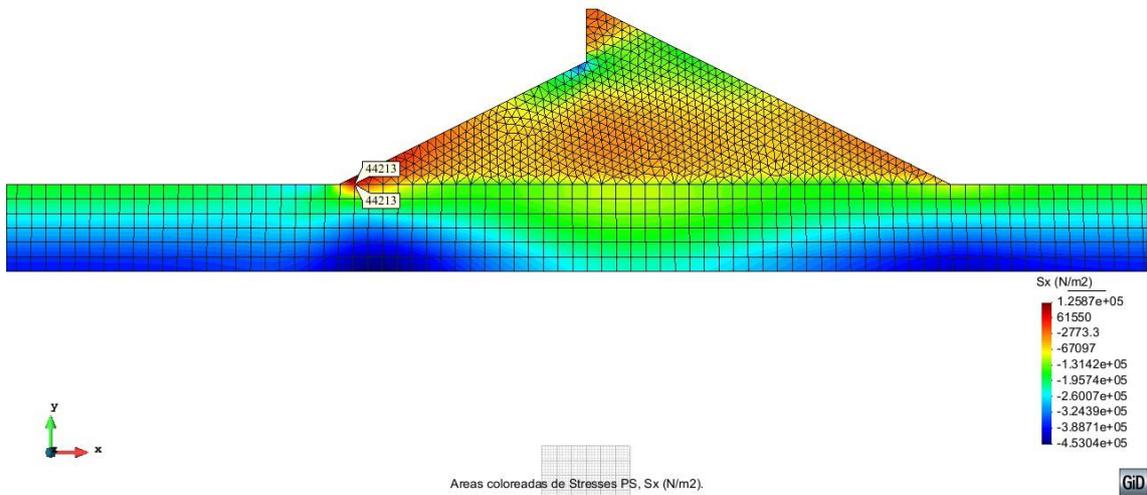


Figura 8. Mapa de isoáreas del esfuerzo Sx

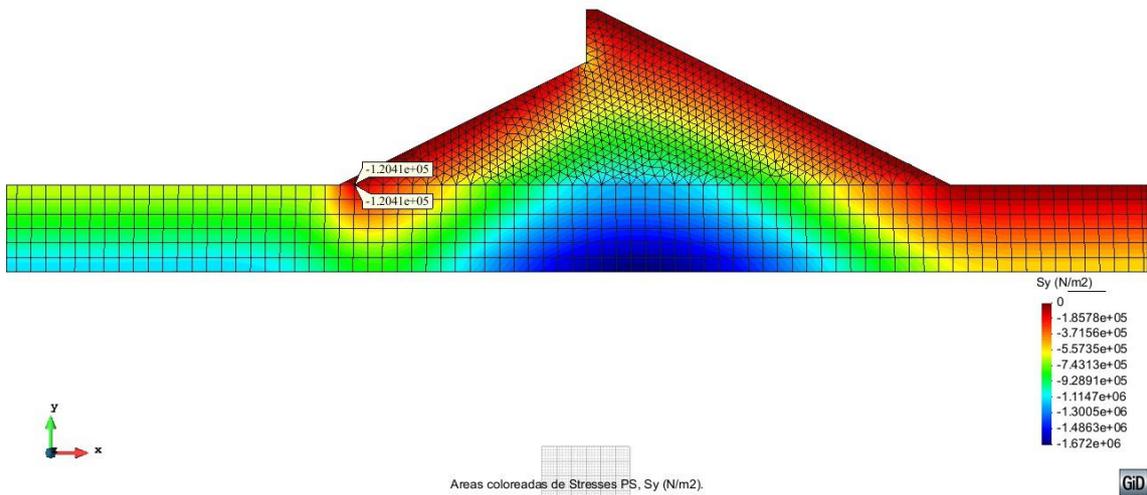


Figura 9. Mapa de isoáreas del esfuerzo Sy

En las figuras 8 y 9 se muestran los resultados obtenidos para las tensiones normales sobre en la dirección X y Y, respectivamente. Se comprueba que no se compromete la condición de 2 MPa como valor máximo para la tensión de tracción en el contacto presa cemento.

Por último, se muestran los resultados obtenidos para las tensiones de rotura según el criterio de Von Misses:

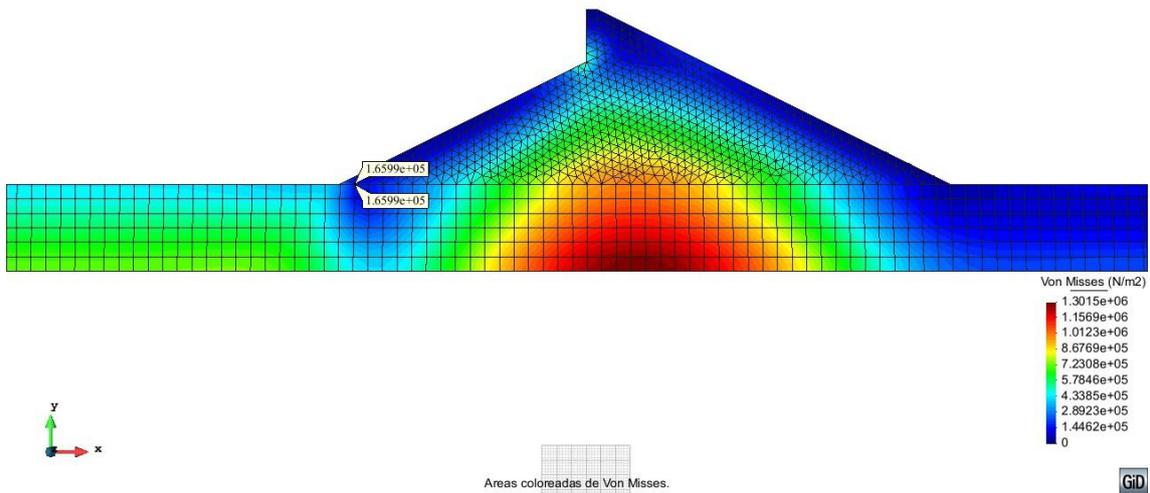


Figura 10. Mapa de isoáreas de la tensión de Von Mises

4.- Modelización 3D:

4.1 Estudio de convergencia:

Al igual que en el caso de la modelización en 2D, se ha llevado a cabo un estudio de convergencia hacia un resultado, con el fin de escoger la malla más eficiente con la que obtener los resultados.

En este caso se ha optado por la elección de una malla igual para los dos materiales: hormigón y terreno; siendo esta malla de tipo no estructurado y formada por tetraedros de cuatro nodos.

Así, se han obtenido los siguientes resultados, en función del tamaño del elemento y comparando el desplazamiento máximo según el eje vertical, eje Z.

	TAMAÑO	Nº NODOS	NºGDL	Desp. X (m)
<i>Tetraedros 4N</i>	30	1348	8088	0.0017255
	25	1407	8442	0.0017909
	20	2014	12084	0.0019358
	15	3587	21522	0.001931
	12.5	6165	36990	0.001965
	10	9566	57396	0.001983

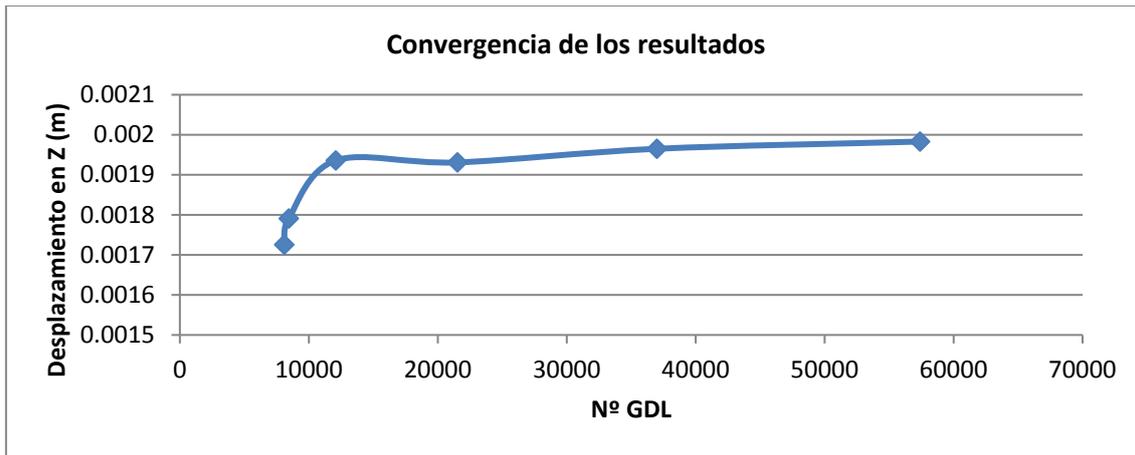


Figura 11. Gráfica del estudio de convergencia

Como se puede observar en la figura 11, se puede intuir que la solución convergerá hacia un resultado próximo a 0'002 metros de desplazamiento respecto al eje Z. Por ello, la se usará una **MALLA NO ESTRUCTURADA DE TETRAEDROS DE CUATRO NODOS Y TAMAÑO 10** para llevar a cabo el análisis tensional.



Figura 12. Malla de elementos finitos tetraedros de tamaño 10.

Para la correcta consecución de un modelo estructural, no pueden faltar las condiciones de contorno a aplicar en los bordes del modelo. Dichas condiciones serán las siguientes:

GRADOS DE LIBERTAD	MOVIMIENTO X	MOVIMIENTO Y	MOVIMIENTO Z
EXTREMO IZQ.	1	1	0
EXTREMO DCHO.	1	1	0
SUPERFICIE INFERIOR TERRENO	0	0	1

* El grado de libertad tomará valor 1 cuando esté constreñido y valor 0 cuando no lo esté.

4.2 Análisis de los resultados obtenidos:

Una vez escogida la malla de elementos finitos, se ha analizado el estado tensional de la estructura obteniendo los resultados que se muestran ,de manera gráfica, a continuación:

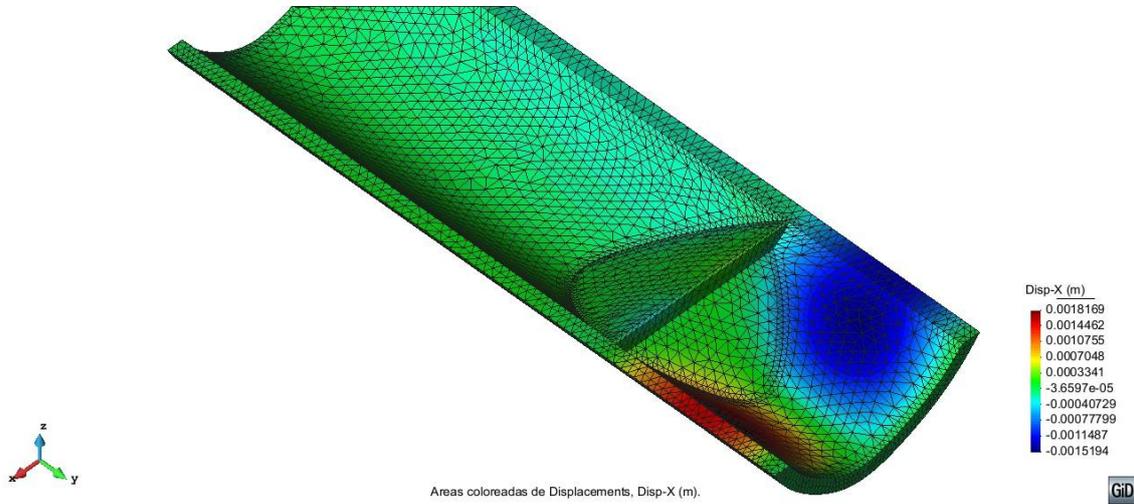


Figura 13. Desplazamiento respecto al eje X

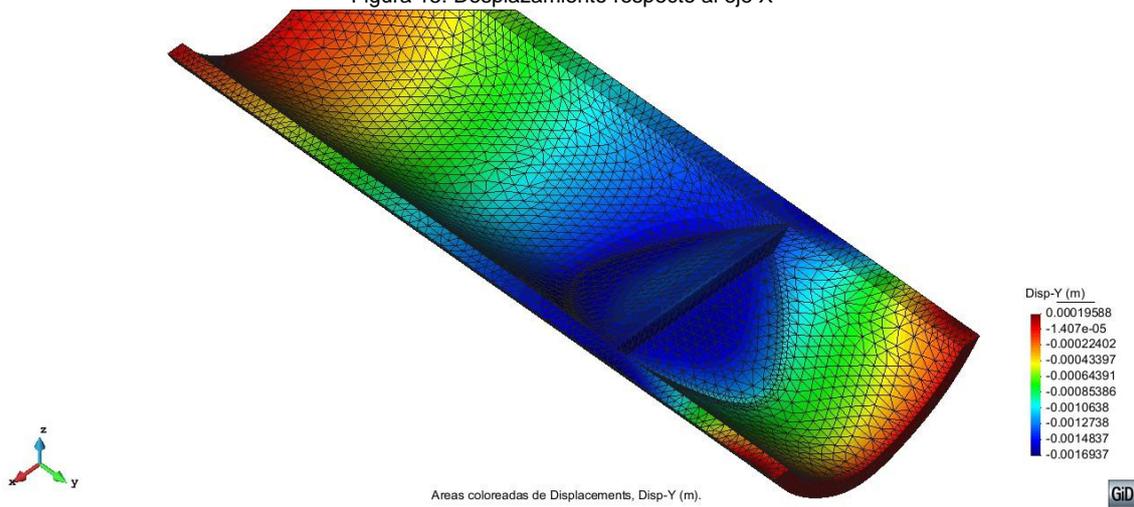


Figura 14. Desplazamiento respecto al eje Y

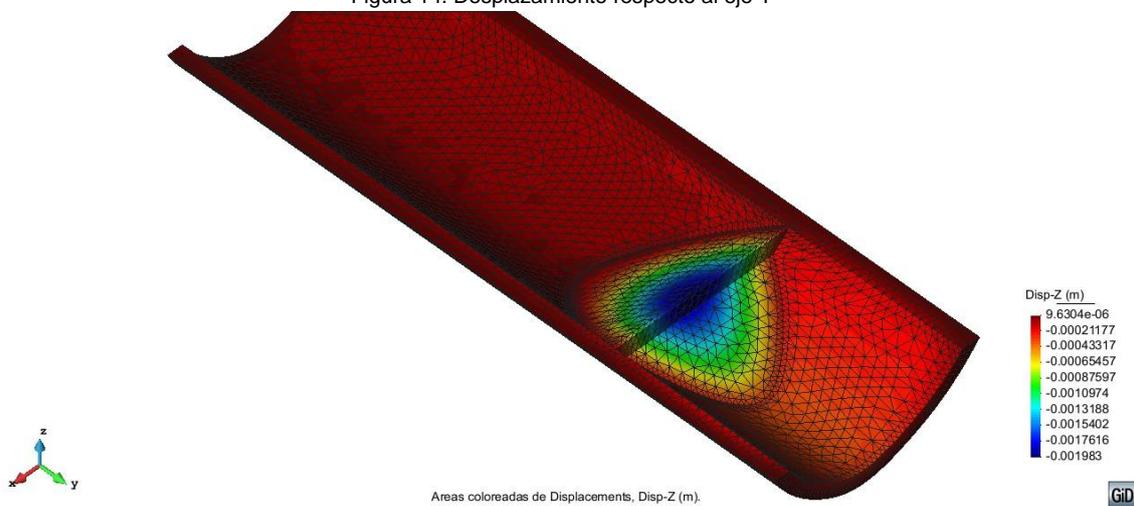


Figura 15. Desplazamiento respecto al eje Z

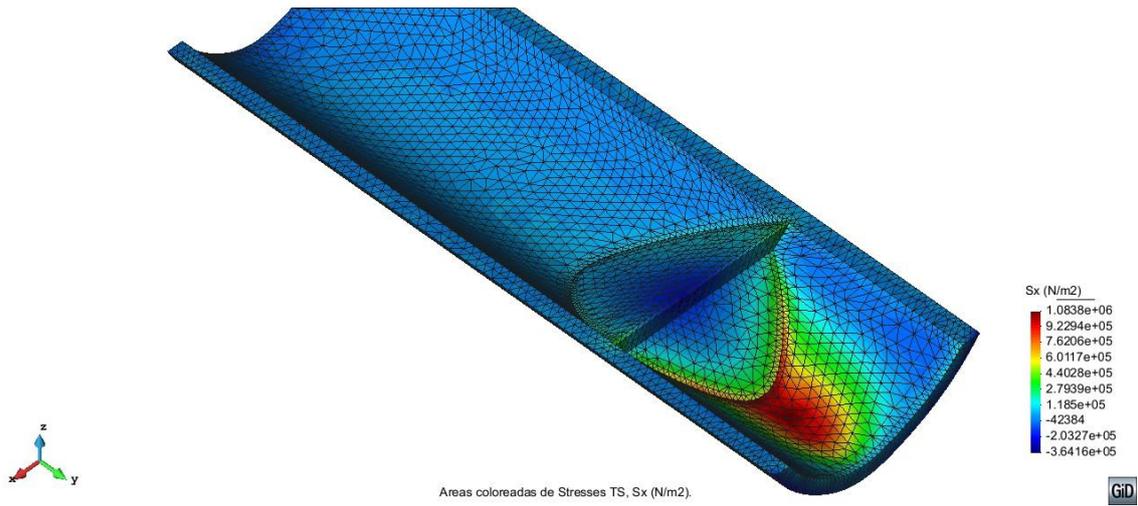


Figura 16. Tensiones respecto al eje X

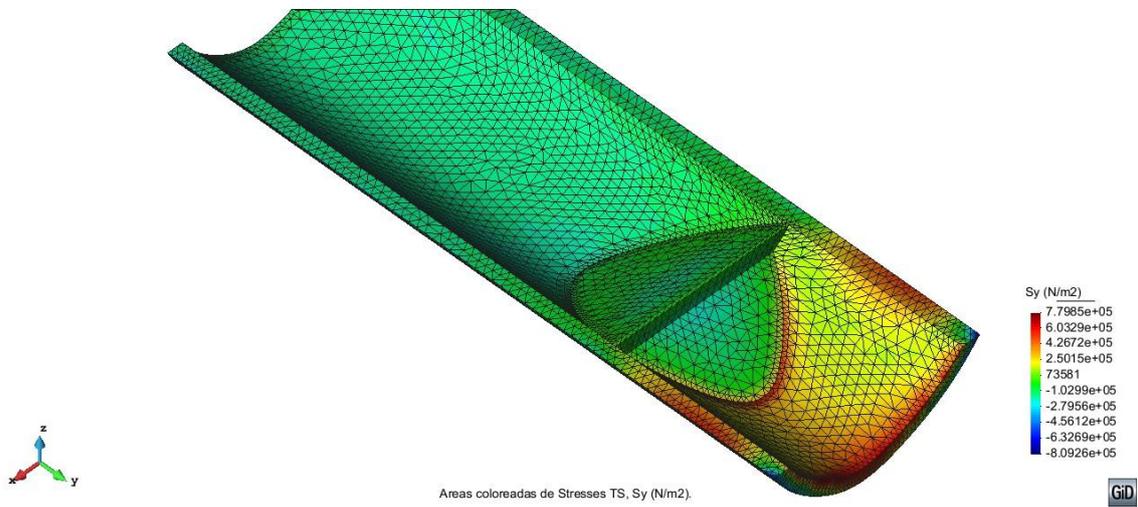


Figura 17. Tensiones respecto al eje Y

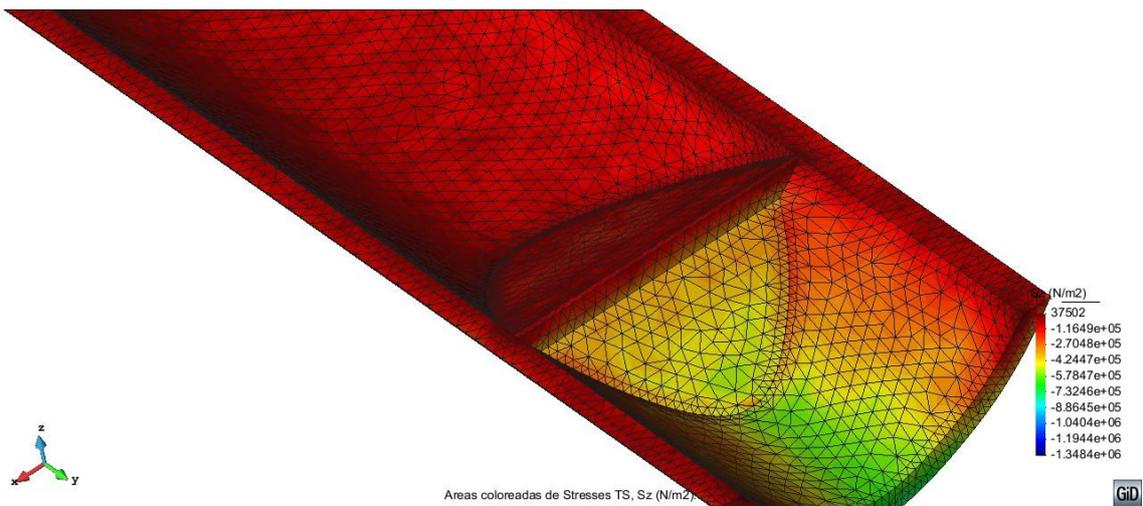


Figura 18. Tensiones respecto al eje Z

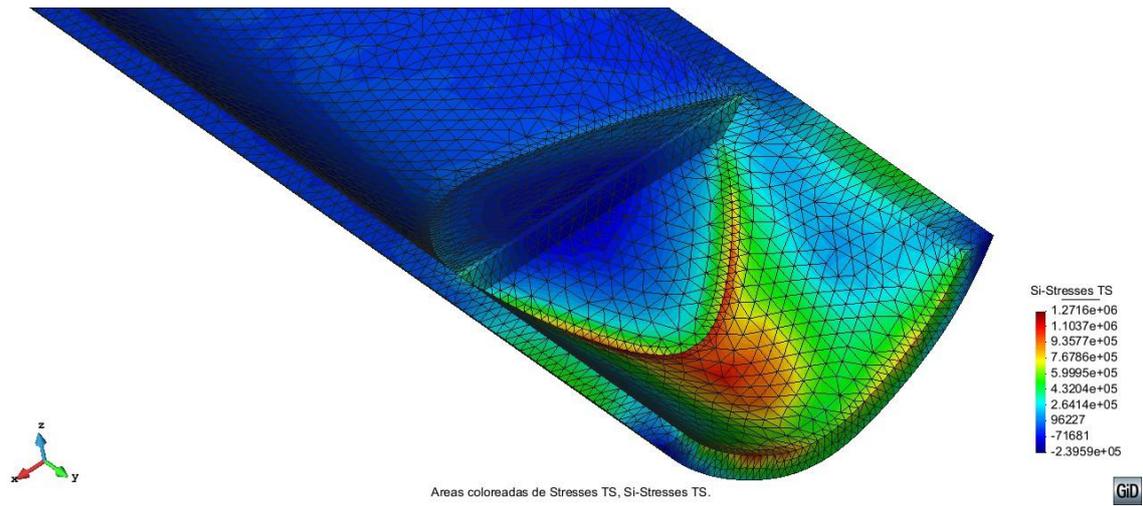


Figura 19. Tensiones principales S1

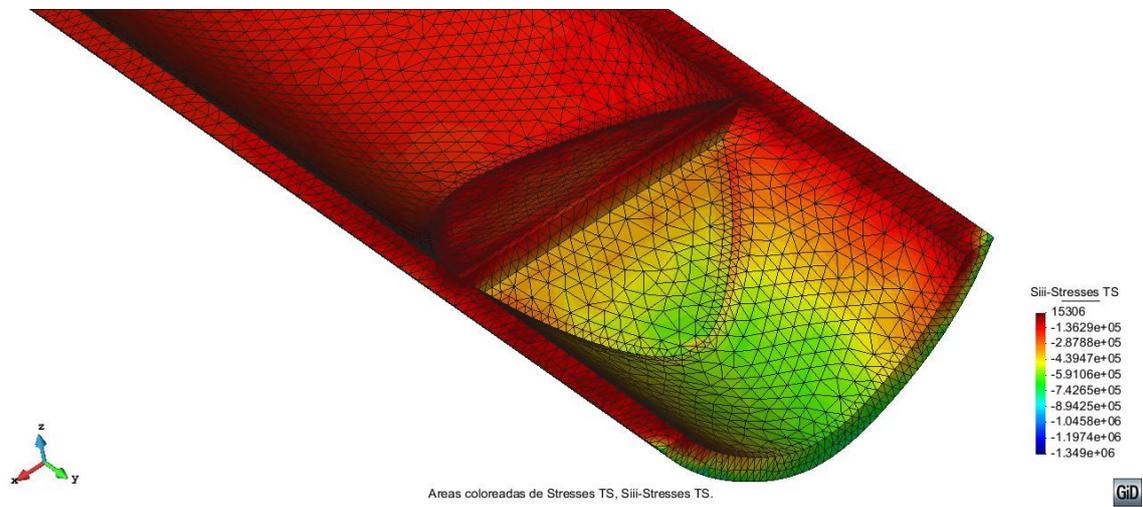


Figura 20. Tensiones principales S3

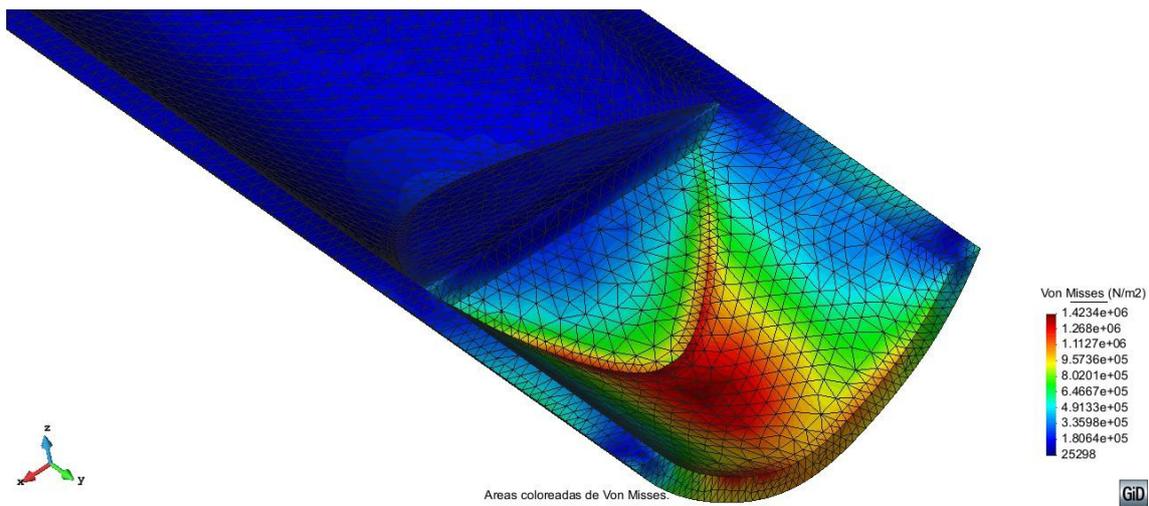


Figura 20. Tensiones rotura Von Mises

A la vista de los resultados se afirma que se cumple con la condición tensional impuesta, por la cual se establece que las tensiones máxima de tracción no serán superiores a 2 MPa, siendo en este caso iguales a 1'27MPa. Además, el desplazamiento máximo respecto al eje Y es de 0.001697 metros, en el sentido del flujo del rio, y de 0.001983 metros, con respecto al eje Z.

5.- COMPARACIÓN DE RESULTADOS:

Una vez analizada la presa mediante la técnica del modelaje en dos dimensiones y mediante la técnica del modelaje en tres dimensiones, se comparan los resultados obtenidos:

	MODELO 2D	MODELO 3D	ERROR RELATIVO
<i>Desplazamiento X,Y (m)</i>	0.0015568	0.001697	8%
<i>Desplazamiento Y,Z (m)</i>	-0.00244	-0.001983	23%
<i>Tensión máxima tracción (MPa)</i>	1.20	1.27	6%

De la tabla anterior se saca la conclusión de que los resultados obtenidos por el modelo de 2D son suficientemente buenos para llevar a cabo el dimensionamiento y comprobación de una presa de gravedad de hormigón en masa. Sin embargo, se produce un error relativo demasiado alto a la hora de la obtención del asiento de la presa en relación al terreno, esto puede ser producido a que, en el modelo 3D, la geometría es la exacta y no la aproximada mediante el modelo 2D, recordemos que implementamos la hipótesis de deformación plana. Es normal que el asiento salga mayor en el modelo 2D ya que, para este modelo, se supone una presa homogénea por metro de longitud, cuando realmente la cerrada es de contorno pseudo-cilíndrico.

Por todo lo anterior, y atendiendo a la latente ventaja computacional del modelo de 2D, aconsejaría el uso de dicho modelo antes que del modelo de 3D para casos generales, siendo interesante la aplicación del modelo de 3D cuando estamos frente a un caso mucho más específico debido a la geometría de la presa o del propio terreno.