



Universidad Politécnica de Cataluña  
Máster en Ingeniería Estructural y de la Construcción  
Ingeniería de Estructuras

**TRABAJO DE CURSO 2014-15, INGENIERÍA DE ESTRUCTURAS**

Realizado por:

**Héctor Posada**

**NIE: Y3649501J**

## Tabla de contenido

PRESA MATERIALES SUELTOS (S-23) .....	3
Enunciado .....	3
Elección de MEF y Software .....	4
Modelo 2D (Deformación Plana).....	5
Pre-Proceso .....	5
Post-Proceso.....	7
Modelo 3D (Sólido 3D) .....	14
Pre-proceso .....	14
Post-Proceso.....	16
TORRE DE ENFRIAMIENTO (L-49) .....	21
Enunciado .....	21
Elección de MEF y Software .....	22
Modelo Lámina de Revolución.....	22
Pre-Proceso .....	22
Post-Proceso.....	24

## PRESA MATERIALES SUELTOS (S-23)

### Enunciado

Dimensionar y calcular una presa de materiales sueltos de 80 m de altura con núcleo de arcilla. La anchura en coronación debe ser de 6 m. con las restricciones geométricas que se indican. Realizar el proyecto mediante un análisis bidimensional y posteriormente en 3D para verificar el diseño utilizando en ambos casos las siguientes hipótesis:

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

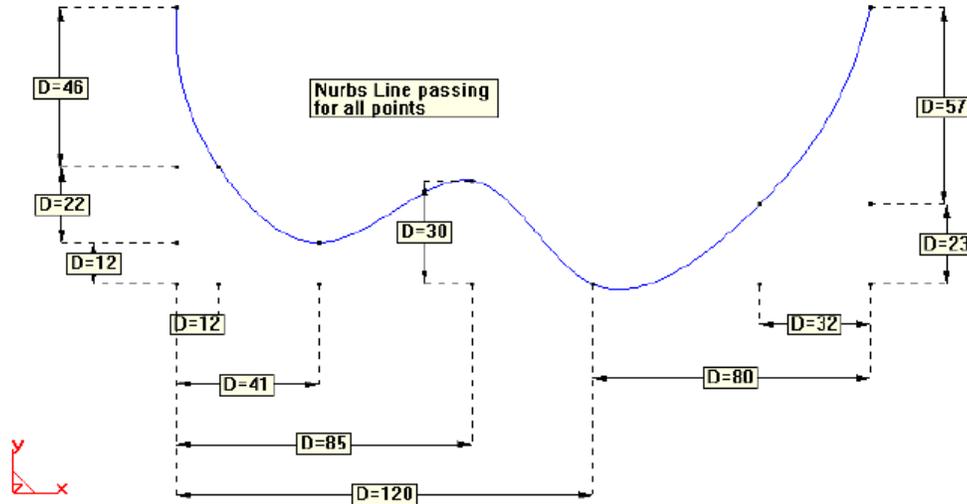
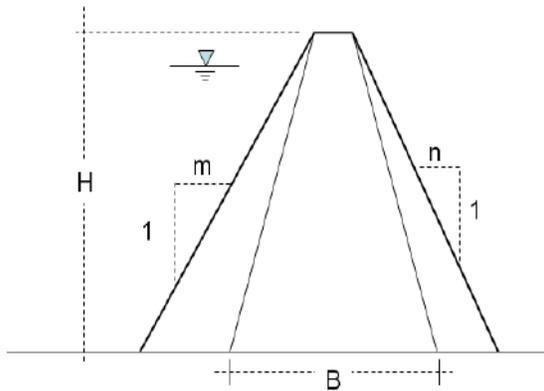
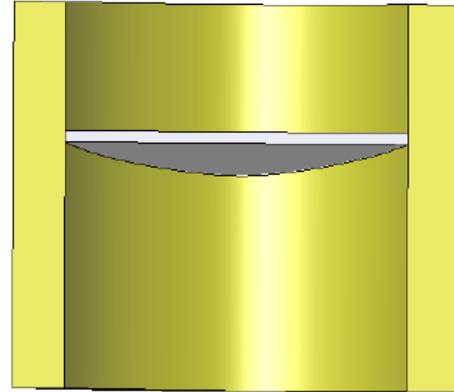
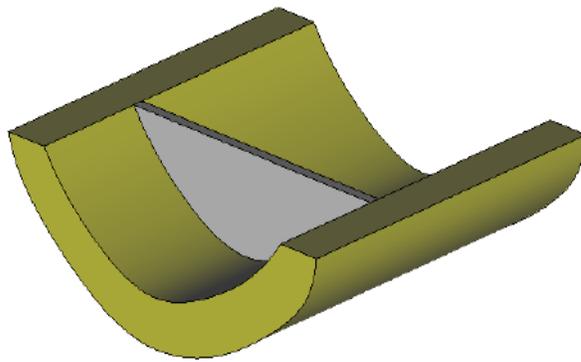


Ilustración 1 Perfil del terreno de emplazamiento de la presa.

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



$$1.5 < m < 2.0$$

$$1.5 < n < 2.0$$

$$B > 0.3 H$$

Ilustración 2 Geometría de diseño de la presa.

### Elección de MEF y Software

Para este problema, en el enunciado se pide modelar la presa de materiales suelos mediante método de elementos finitos en 2D y posteriormente verificar los resultados con un modelo 3D, por lo tanto se decide realizar varias etapas de análisis, primero se modelará la presa en 2D (Deformación Plana) en el software GID a través de Ram Series Educational en dos estados; teniendo en cuenta sólo el peso propio de la presa (sin agua) y luego considerando la acción del agua con la respectiva carga hidrostática y gravitatoria. Se refinarán varias mallas para llegar a la convergencia de los desplazamientos verticales en la corona de la presa, de esta manera se encontrará el estado tensional correcto para verificar que las tensiones en la presa no superen los 2 MPa.

Realizado lo explicado anteriormente, se procede a modelar la presa en 3D con la ayuda de los mismos software, en donde también se realiza un análisis teniendo en cuenta la acción del agua y sin ella, de esta manera se obtiene la información necesaria para realizar un análisis del estado tensional de la presa y verificar que en ningún punto de esta se superen tensiones superiores a 2MPa.

## Modelo 2D (Deformación Plana)

### Pre-Proceso

El primer paso para modelar la presa en 2D es definir la geometría, se dice en el enunciado que las pendientes de la presa tienen unas limitantes, así como la base del núcleo del arcilla, en este caso se analizó con las mínimas pendientes y longitudes, posteriormente se comprobó que los estados tensionales eran correctos según los valores de diseño, por lo tanto no hubo necesidad de modificar de nuevo la geometría. Finalmente la configuración geométrica modelada fue la siguiente:

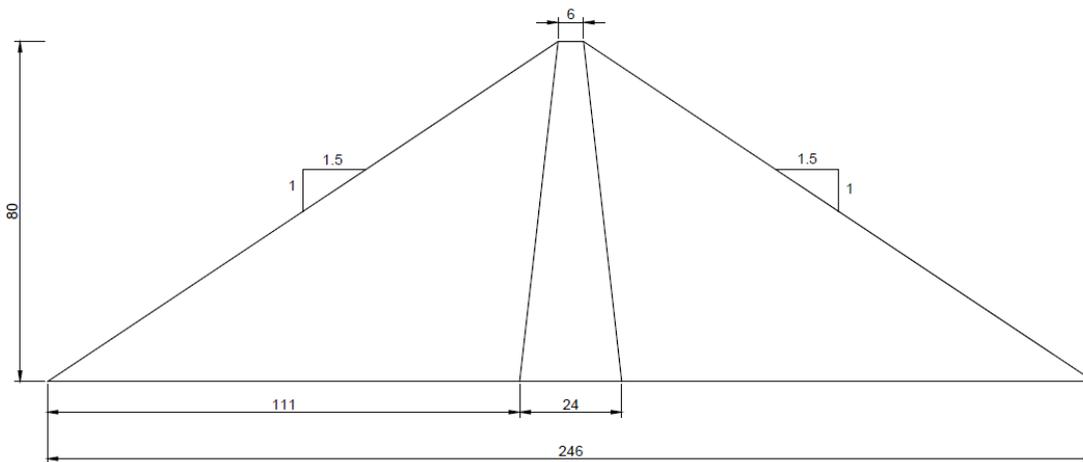


Ilustración 3 Geometría definida de la presa.

Definida esta geometría se procede a dibujar en GID, en donde se consideró una profundidad del suelo de apoyo adecuada de tal manera que no interfiera con los resultados de las tensiones en la presa, además de establecer las condiciones de contorno adecuadas como se muestra en la siguiente figura:

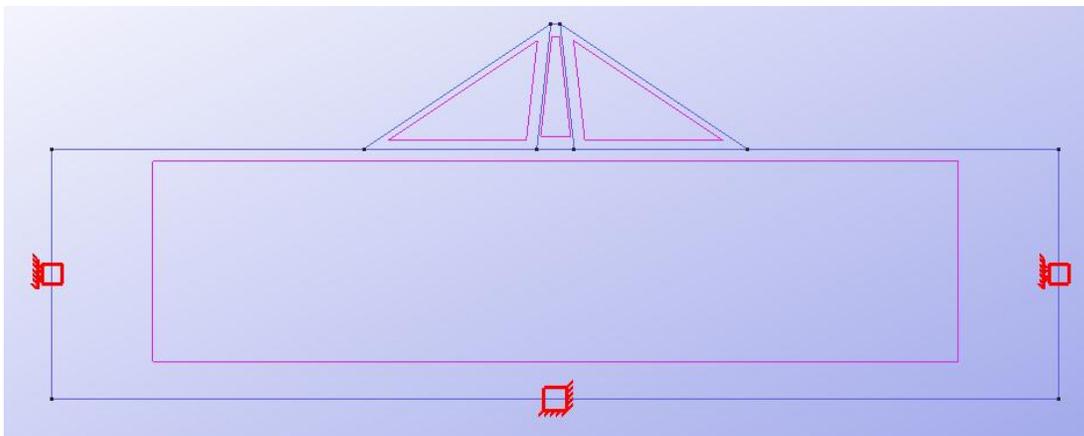


Ilustración 4 Condiciones de contorno de la presa.

Se establecen restricciones horizontales para confinar el suelo y evitar desplazamientos erróneos, además se considera empotrado el fondo del suelo, asumiendo que se encuentra apoyado en un suelo suficientemente duro que tiende a la infinidad.

El siguiente paso es asignar los materiales a las superficies correspondientes con los valores proporcionados en el enunciado:

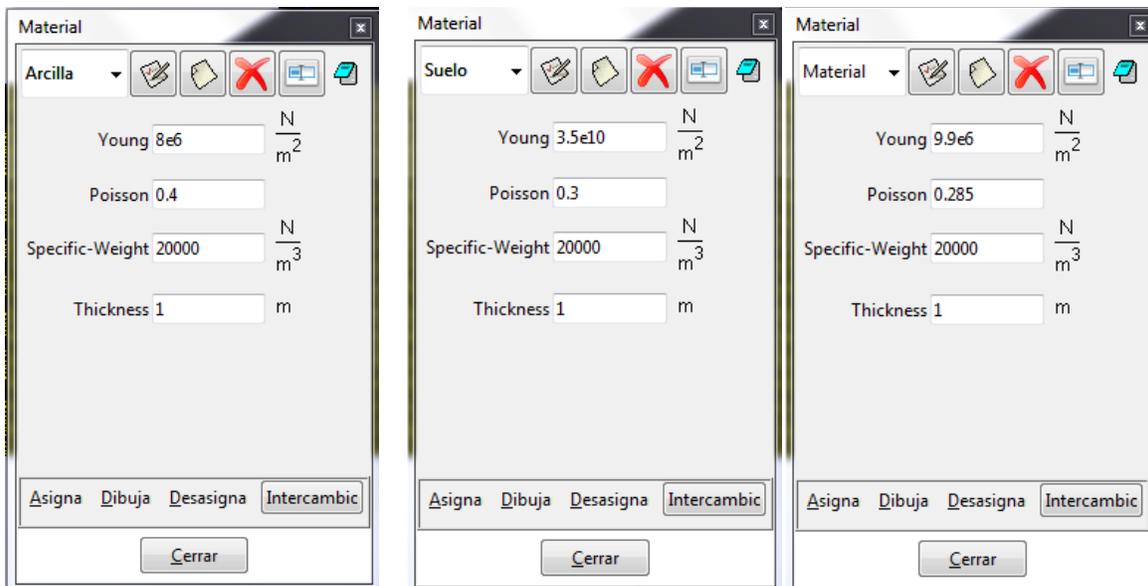
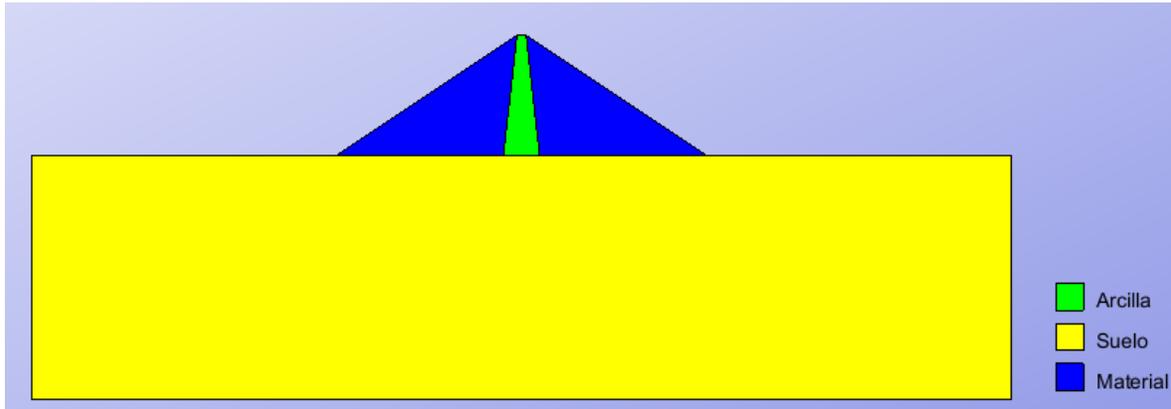


Ilustración 5 Materiales definidos para la presa.

Luego de tener la geometría y los materiales definidos, se puede iniciar el modelado de la malla para posteriormente realizar el cálculo y obtener el post-proceso.

### Post-Proceso

Se utilizaron elementos triangulares de 3 nodos cada uno con dos grados de libertad para construir mallas estructuradas que lleguen más rápido a la convergencia. A continuación se muestran las mallas utilizadas:

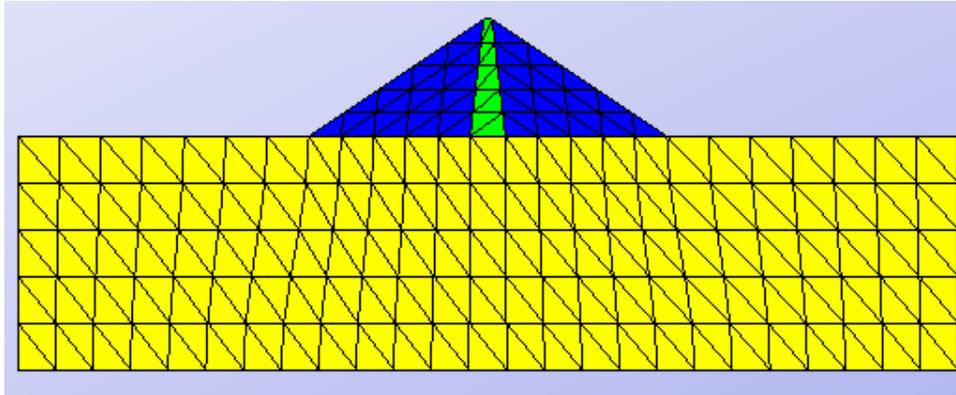


Ilustración 6 Malla triangular estructurada de tamaño 30 m.

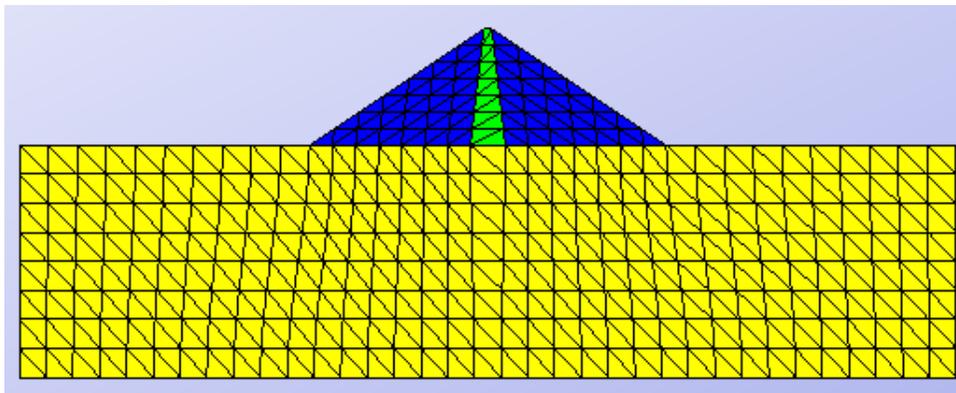


Ilustración 7 Malla triangular estructurada de tamaño 20 m.

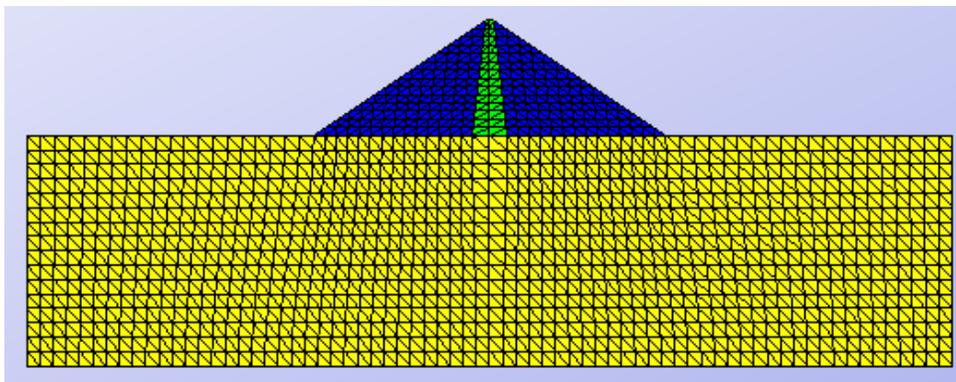


Ilustración 8 Malla triangular estructurada de tamaño 10m.

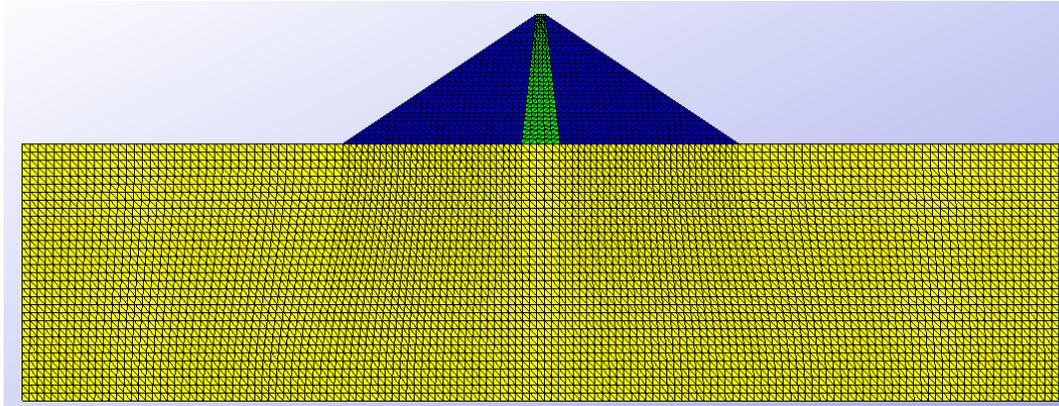


Ilustración 9 Malla triangular estructurada de tamaño 5 m.

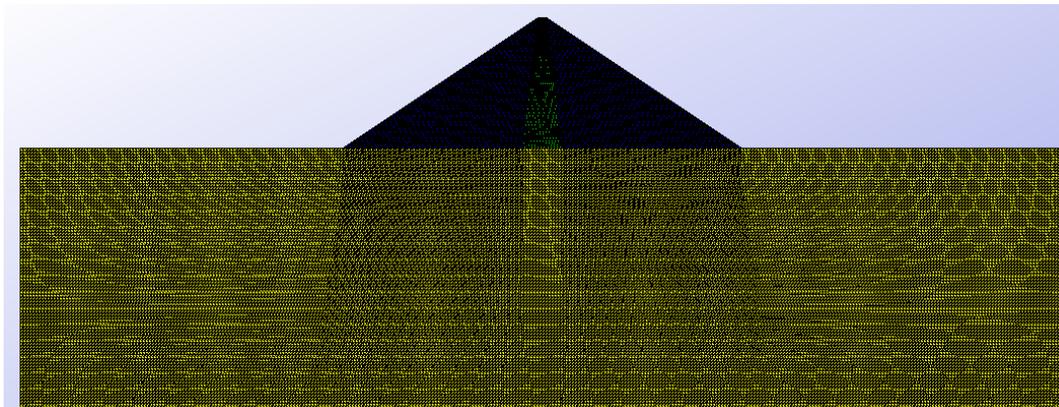


Ilustración 10 Malla triangular estructurada de tamaño 2m.

Definidas las mallas utilizadas, se procede a realizar la convergencia de los desplazamientos verticales para obtener el estado tensional adecuado, esta convergencia esta expresada en la siguiente tabla y gráfica:

Desplazamiento en la corona (v)			
Tamaño malla (m)	v (m)	Nodos	GDL
30	4.1582	186	372
20	4.1714	380	760
10	4.1559	1431	2862
5	4.1538	5738	11476
2	4.1533	34965	69930

Tabla 1 Convergencia del mallado modelado.

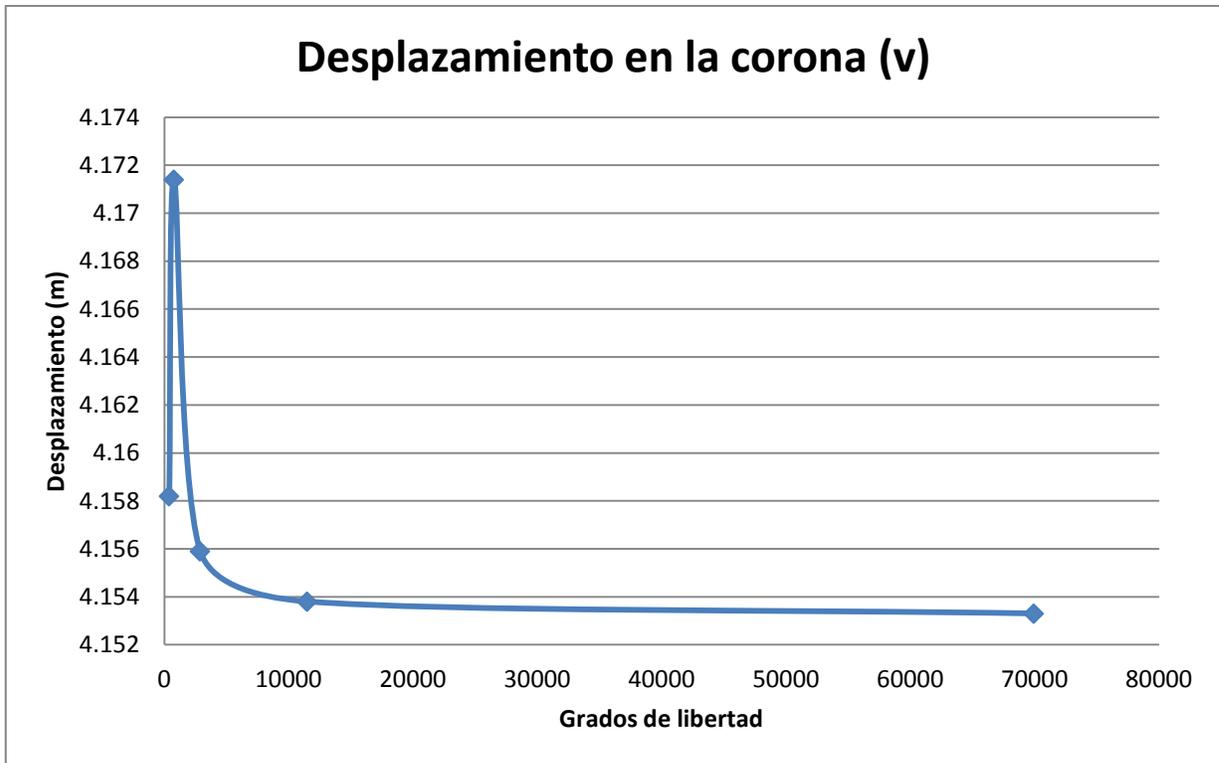


Ilustración 11 Gráfica de convergencia del desplazamiento en la corona de la presa.

Como se observa en la gráfica, se llegó a la convergencia del desplazamiento en la corona, de esta manera podemos tener más certeza de que el estado tensional que se analiza es el adecuado, el cual se describe en las siguientes imágenes:

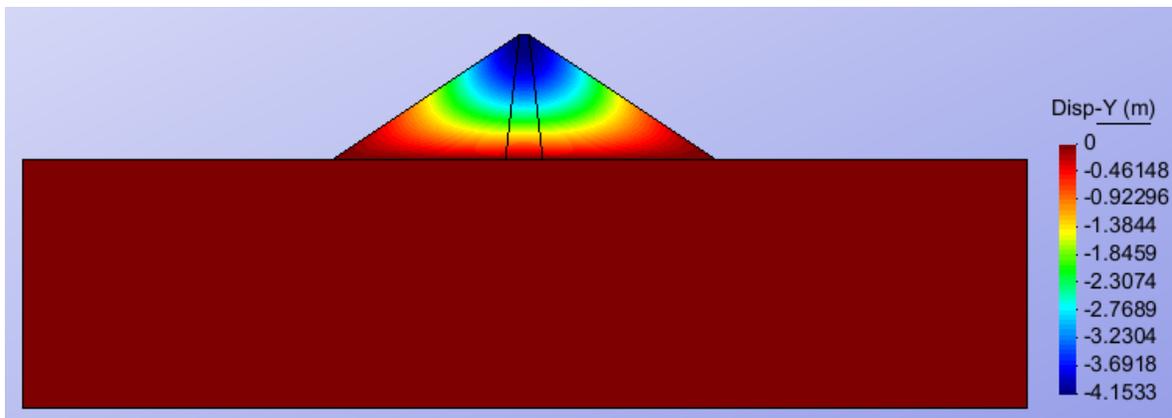


Ilustración 12 Resultados del desplazamiento vertical para la presa sin agua.

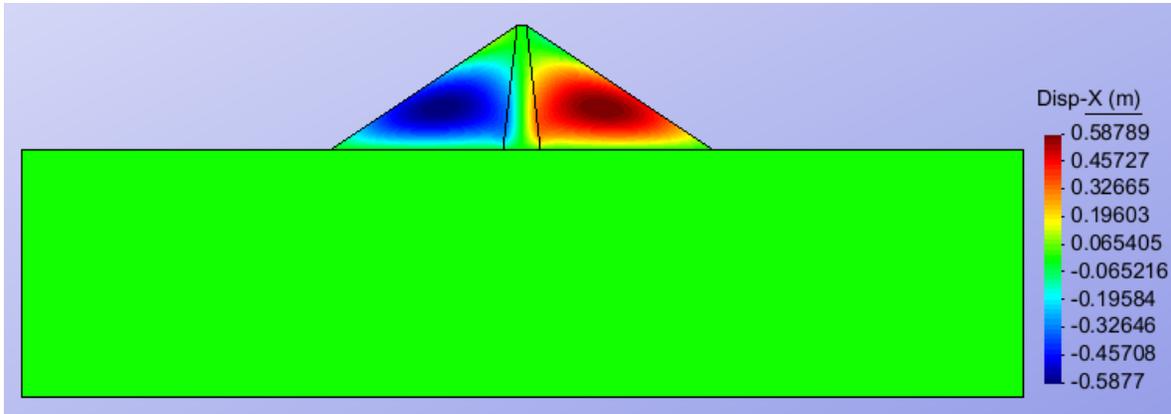


Ilustración 13 Resultados del desplazamiento horizontal para la presa sin agua.

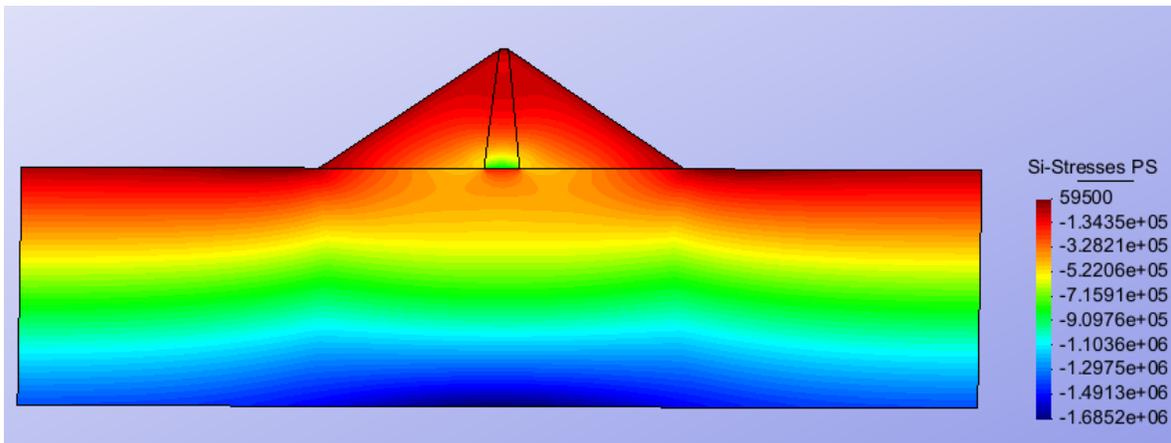


Ilustración 14 Resultados de la tensión principal Si para la presa sin agua.

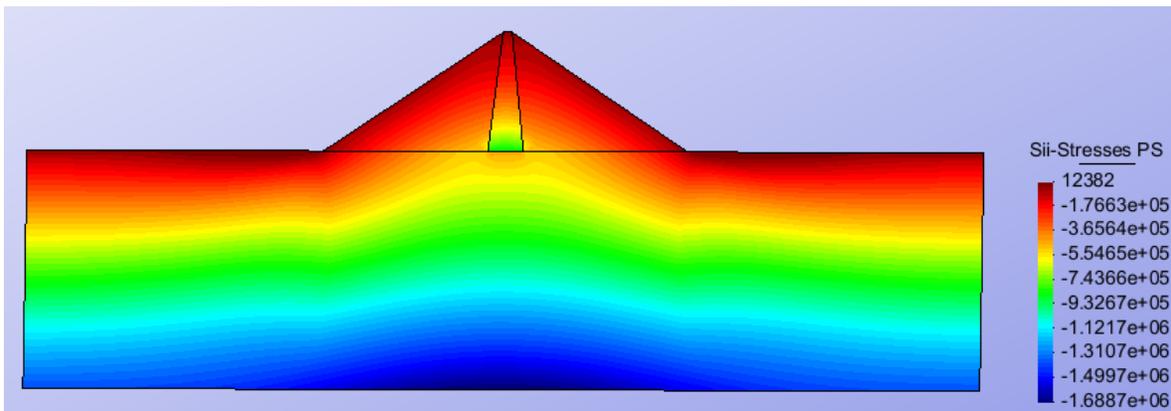


Ilustración 15 Resultados de la tensión principal Sii para la presa sin agua.

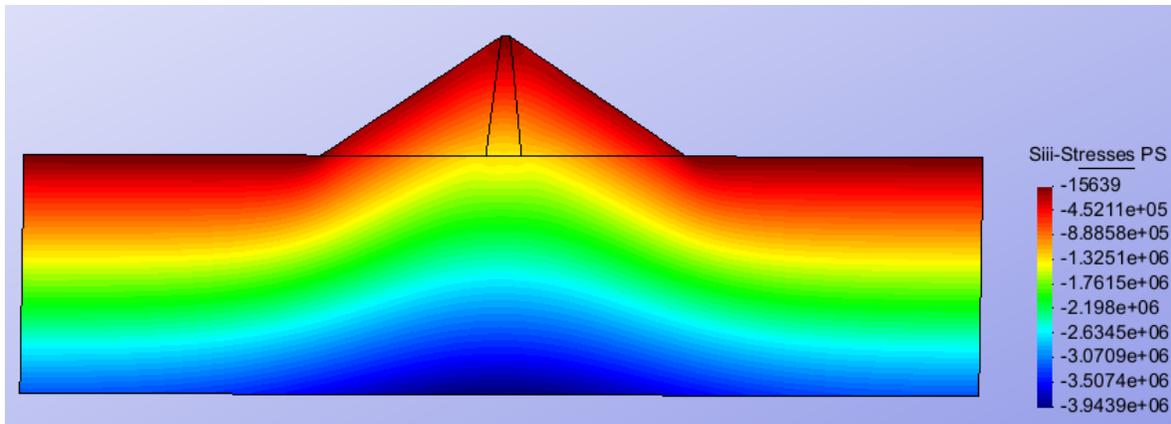


Ilustración 16 Resultados de la tensión principal Siii para la presa sin agua.

Se puede observar que en ningún caso las tensiones superan los 2 MPa exigidos en el enunciado, en el suelo se encuentran algunas deformaciones superiores a este valor, los cuales no afectan a la presa, además varios de estos resultados se ven influenciados por las condiciones de contorno por lo tanto no representan un criterio significativo en el análisis.

Con respecto a los desplazamientos verticales, se observa que el suelo de apoyo no se alcanza a desplazar en esta dirección, situación esperada ya que el módulo de elasticidad del suelo es mucho mayor que el de los materiales de la presa, por lo tanto posee propiedades mecánicas superiores que impiden la deformación de este.

Aunque el desplazamiento máximo es de 4.15 metros en la corona de la presa, este desplazamiento se analiza como el total que se produciría, sin embargo se sabe que este tipo de presas se va construyendo por capas y compactando a una densidad específica, por lo tanto esto no representa problemas en la presa y la cota a la que se proyecta se alcanza sin inconvenientes.

El siguiente paso es introducir la carga hidrostática y gravitatoria de la presa y utilizar los mismos tamaños de malla que en el modelo sin agua para poder comparar valores al final. Los resultados de convergencia fueron los siguientes:

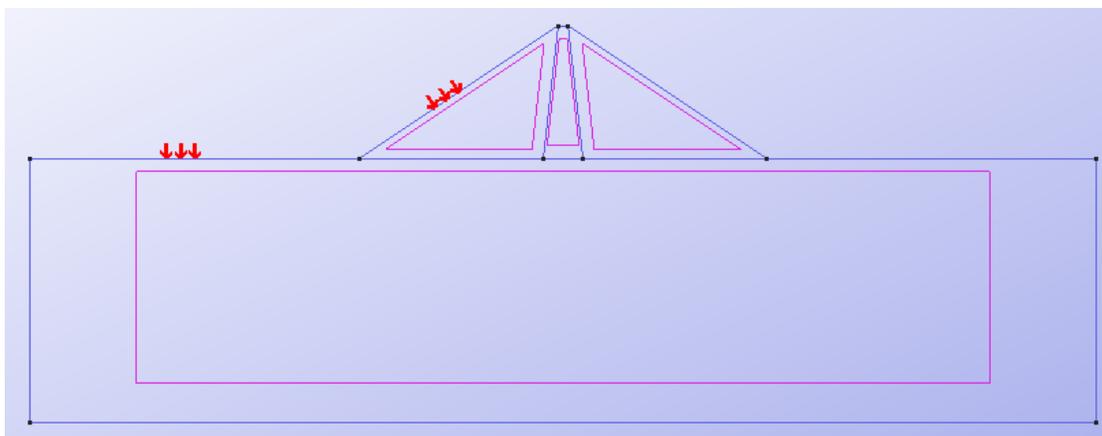


Ilustración 17 Carga gravitatoria e hidrostática para introducir el efecto del agua.

Desplazamiento en la corona (v)			
Tamaño malla (m)	v (m)	Nodos	GDL
30	4.1728	186	372
20	4.1623	380	760
10	4.1627	1431	2862
5	4.1728	5738	11476
2	4.176	34965	69930

Tabla 2 Convergencia del mallado para el desplazamiento vertical en la corona de la presa con el efecto del agua.

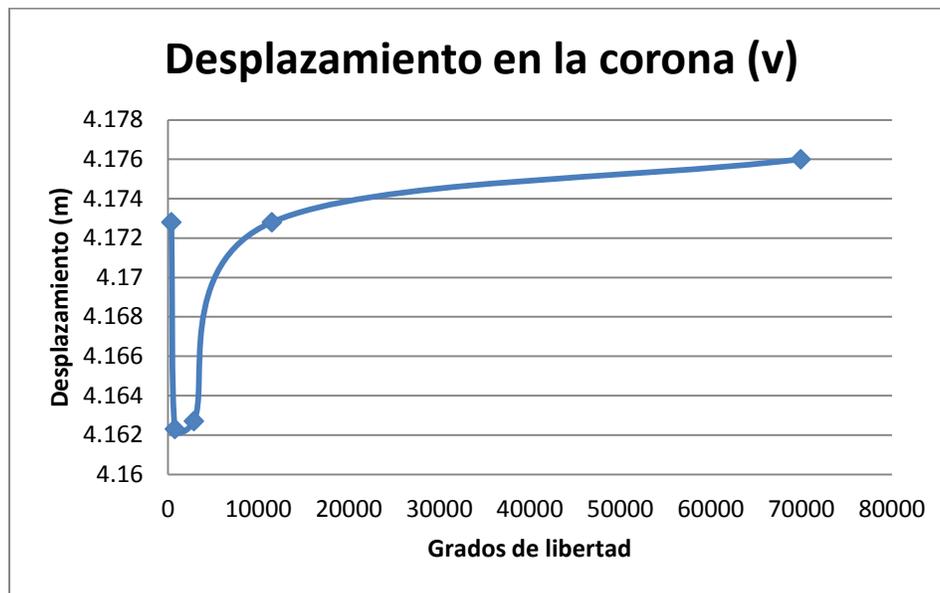


Ilustración 18 Gráfica de convergencia para el desplazamiento en la corona de la presa con el efecto del agua.

Logrando la convergencia mostrada anteriormente, se puede analizar el estado tensional óptimo de la presa 2D en deformación plana con la acción del agua incluida, la cual se presenta a continuación:

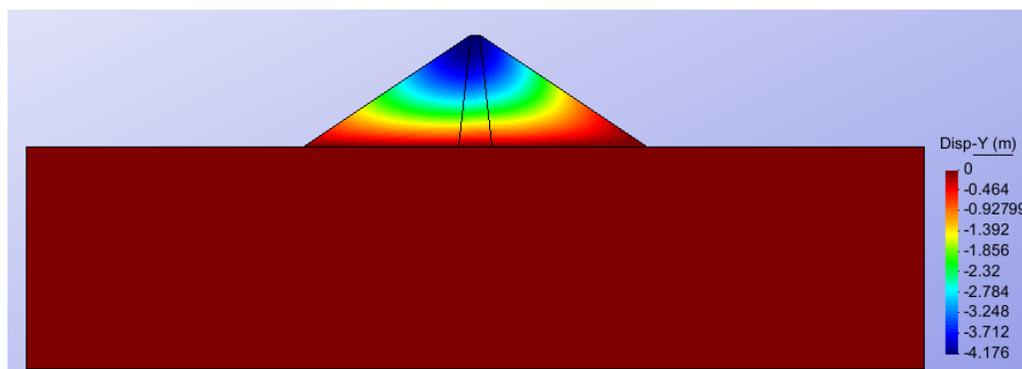


Ilustración 19 Resultados del desplazamiento vertical para la presa con agua.

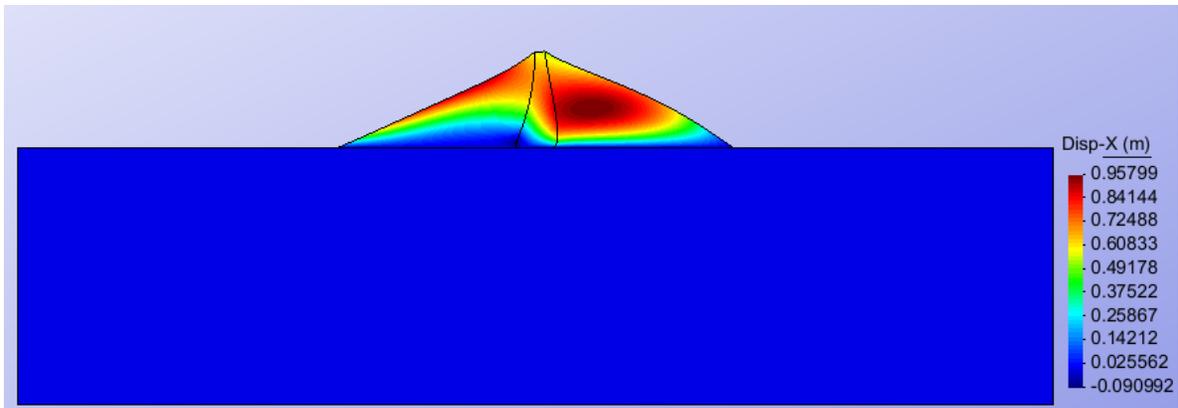


Ilustración 20 Resultados del desplazamiento horizontal para la presa con agua.

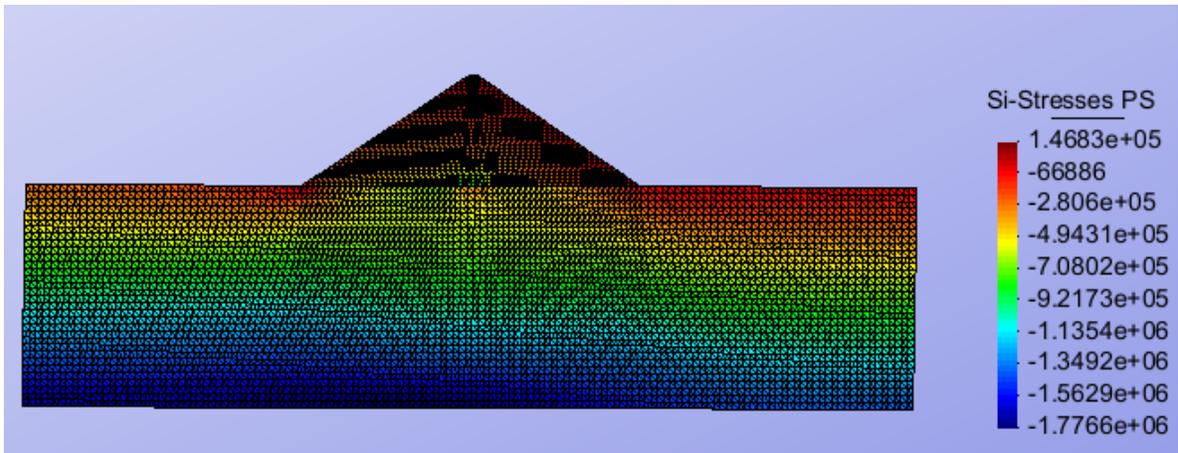


Ilustración 21 Resultados de la tensión principal Si para la presa con agua.

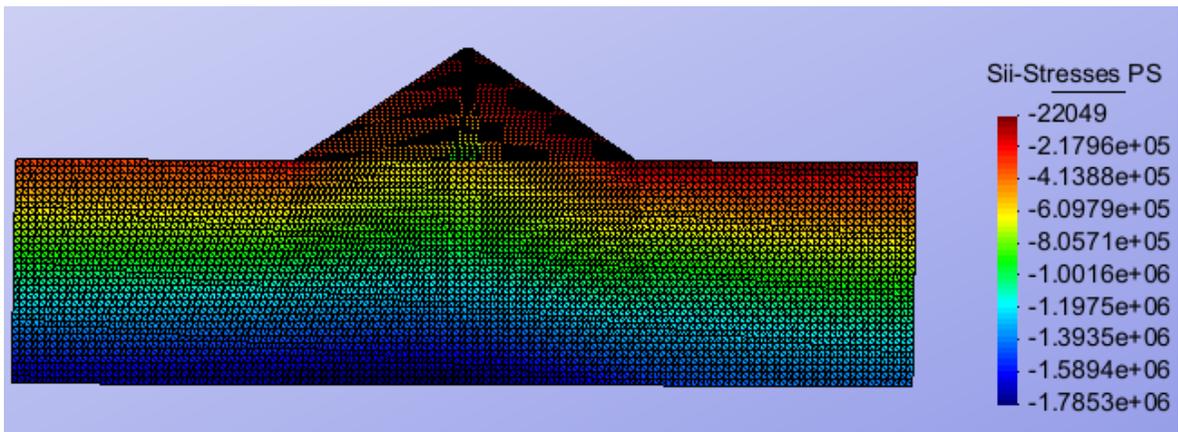


Ilustración 22 Resultados de la tensión principal Sii para la presa con agua.

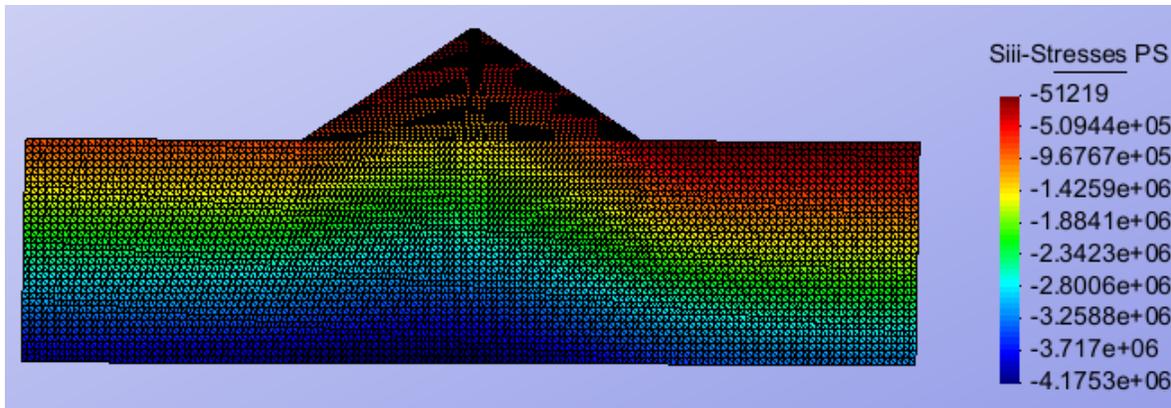


Ilustración 23 Resultados de la tensión principal  $S_{iii}$  para la presa con agua.

Se puede observar que el comportamiento del modelo con o sin agua es similar, las tensiones aumentan un poco y los desplazamientos también, sin embargo la magnitud en la que aumentan es relativamente pequeños. También se observa que en ningún caso las tensiones superan los 2MPa de diseño en cualquier punto de la presa.

Nuevamente el suelo en donde se apoya la presa no se desplaza en el eje vertical, apoyando la hipótesis de que las propiedades mecánicas del suelo lo hacen poco vulnerable a este tipo de desplazamientos.

Las tensiones más altas se encuentran en las condiciones de contorno, sin embargo esto no afecta a la presa y se puede establecer que el diseño verifica y la configuración geométrica definida es la óptima ya que es la mínima, por lo tanto sólo resta modelar la presa en 3D para comprobar los resultados obtenidos en el modelamiento 2D.

## Modelo 3D (Sólido 3D)

### Pre-proceso

Definida la geometría en el modelado 2D, se debe transformar a un modelo 3D, en donde se pueda generar las mallas que nos lleven a un estado tensional correcto que sirva de comparación con los modelos realizados en 2D. Cabe destacar que sólo se realiza el modelado en 3D teniendo en cuenta la acción del agua, ya que con esto es suficiente para tomar decisiones y analizar la presa. A continuación se muestra la geometría modelada con las respectivas condiciones de contorno:

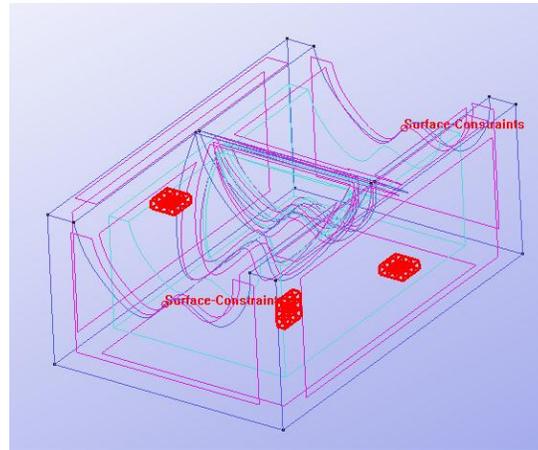


Ilustración 24 Condiciones de contorno de la presa en 3D.

Se aprecia que la geometría se confino en desplazamientos horizontales en cada superficie exterior del suelo, y se empotró la base de este para que no se presentaran errores de desplazamientos ni tensiones. A continuación se muestra cómo se asignaron los tipos de materiales a la presa:

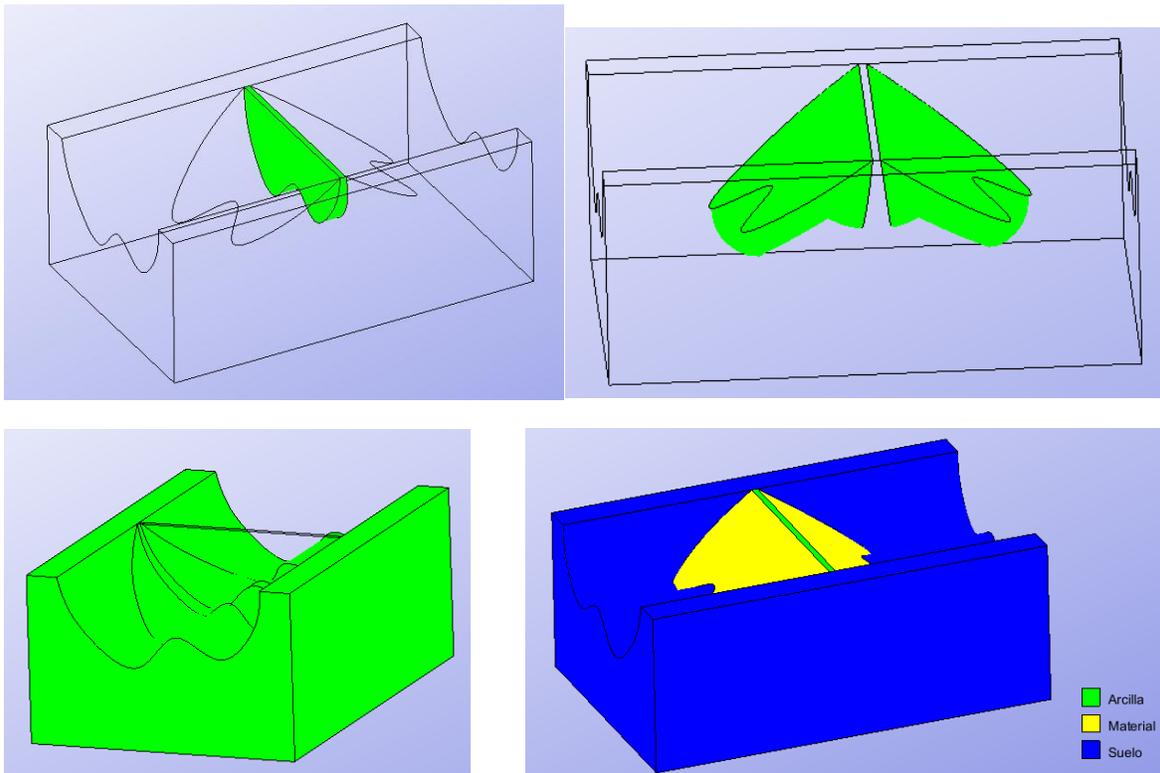


Ilustración 25 Definición de materiales por volumen para la presa en 3D.

Definido los materiales se procede a introducir las cargas debido a la presión hidrostática del agua y su fuerza gravitatoria:

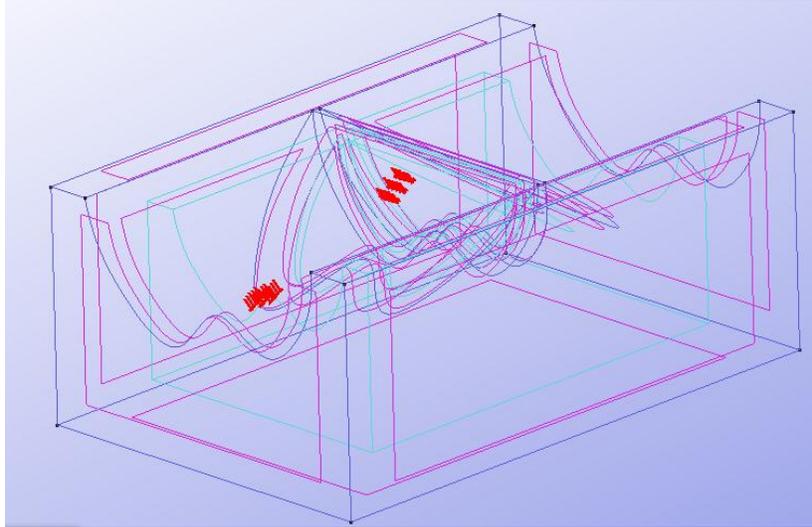


Ilustración 26 Carga hidrostática y gravitatoria para la presa en 3D por superficie.

### Post-Proceso

Teniendo definidas las cargas, los materiales y las condiciones de contorno, se procede a realizar los distintos mallados para llegar a la convergencia nuevamente de los desplazamientos en el eje vertical, a continuación se muestran las mallas modeladas, cabe destacar que el refinamiento se hizo en las superficies que pertenecen a los materiales de la presa, en el suelo se utiliza otra malla, ya que de este no necesitamos mucha información extendida sobre todo el volumen, lo que generaría excesos de elementos y más gasto computacional. Los elementos finitos a utilizar son tetraedros debido a la complejidad de la geometría:

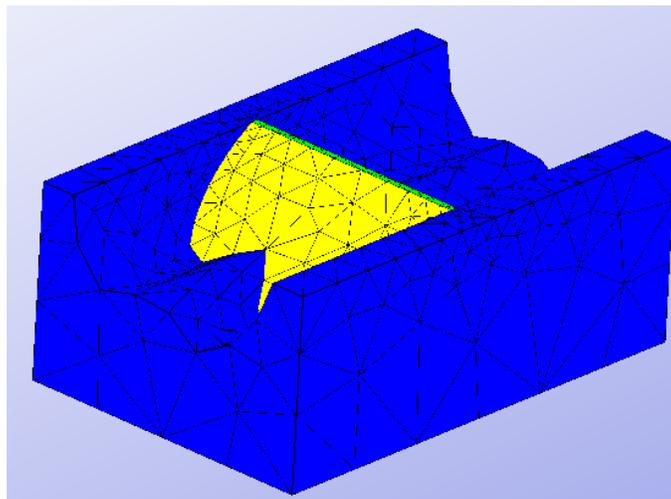


Ilustración 27 Mallado de tamaño 30 m para la presa en 3D.

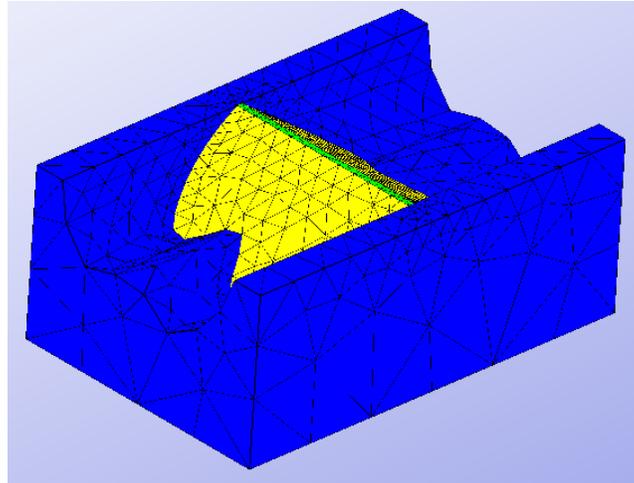


Ilustración 28 Mallado de tamaño 20 m para la presa en 3D.

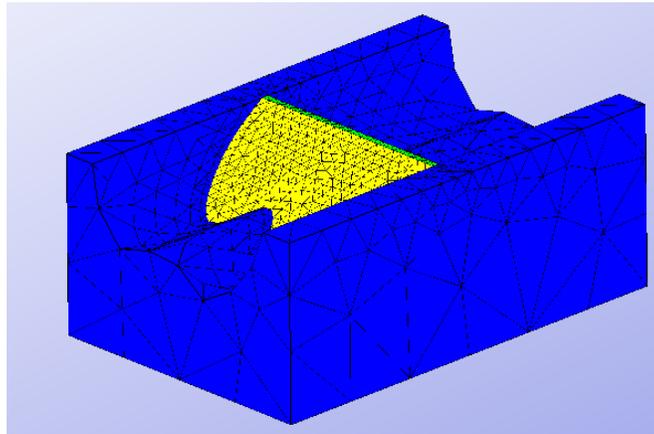


Ilustración 29 Mallado de tamaño 10 m para la presa en 3D.

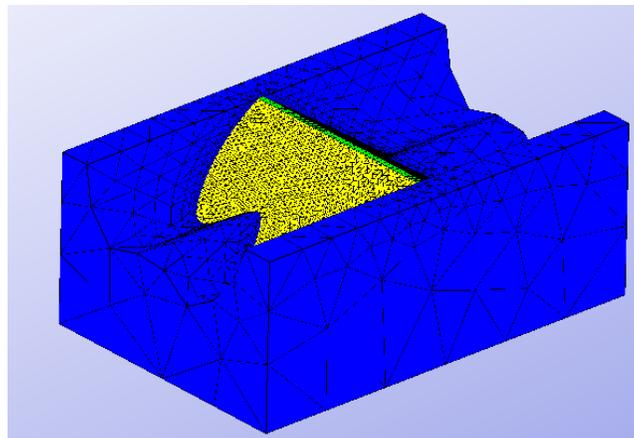


Ilustración 30 Mallado de tamaño 5 m para la presa en 3D.

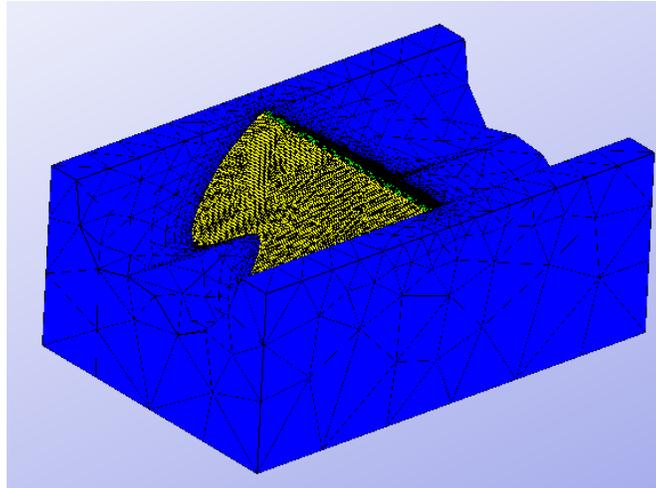


Ilustración 31 Mallado de tamaño 2 m para la presa en 3D.

Desplazamiento en la corona (w)			
Tamaño malla (m)	w (m)	Nodos	GDL
30	2.9686	1005	3015
20	3.2104	1147	3441
10	3.1523	2783	8349
5	3.0444	6417	19251

Tabla 3 Convergencia del mallado para la presa con agua en 3D.

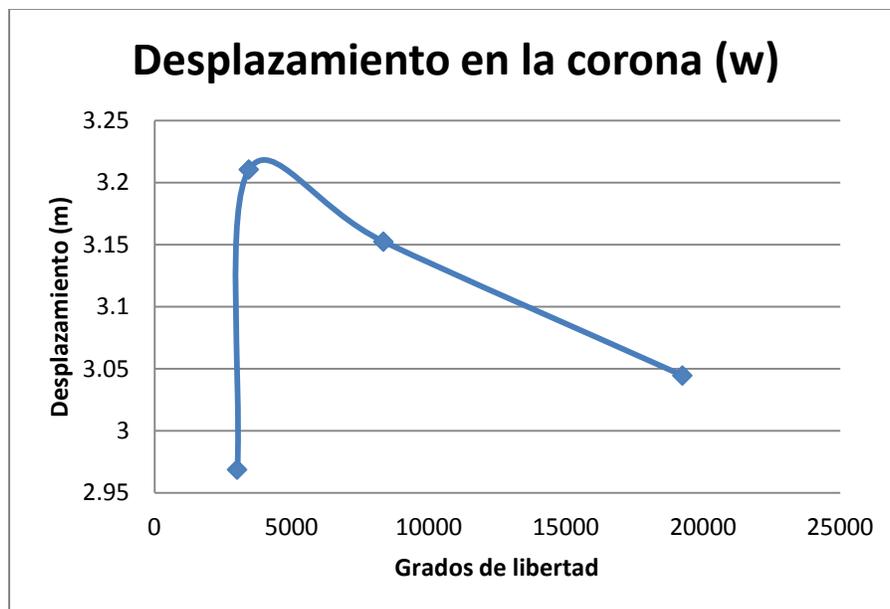


Ilustración 32 Gráfico de convergencia del mallado para la presa con agua en 3D.

Se aprecia que los valores empiezan a converger y normalizarse, no se llegó a un mallado más fino ya que el gasto computacional que representaba era muy alto y con la información ya obtenida era suficiente para llegar al estado tesional que se requería. Teniendo esto en cuenta a continuación se presenta el estado tensional último modelado:

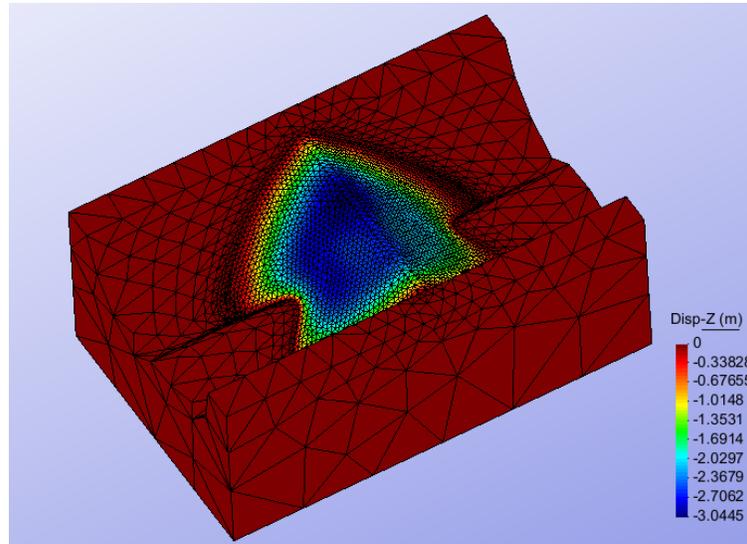


Ilustración 33 Resultados del desplazamiento vertical para la presa en 3D con agua.

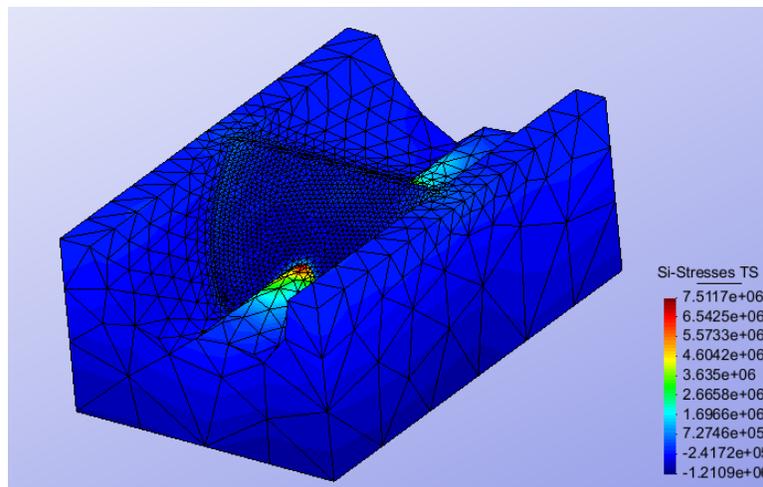


Ilustración 34 Resultados de la tensión principal Si para la presa en 3D con agua.

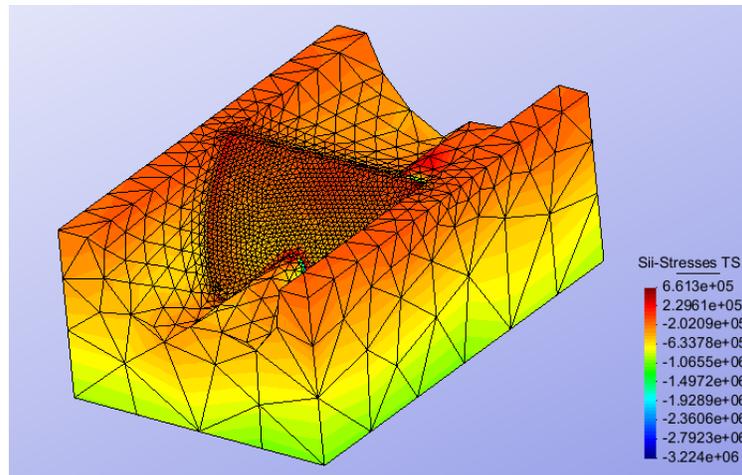


Ilustración 35 Resultados de la tensión principal Sii para la presa en 3D con agua.

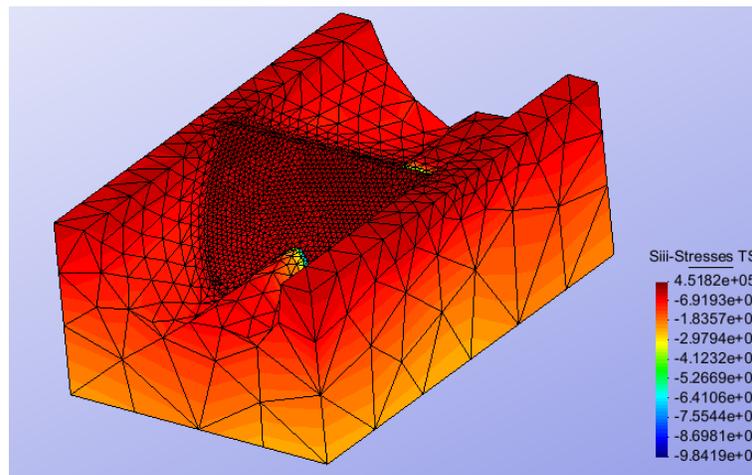


Ilustración 36 Resultados de la tensión principal Siii para la presa en 3D con agua.

Se puede apreciar que los esfuerzos no superan los 2MPa de diseño que se proponen en el enunciado, existen algunos puntos de concentración de tensiones debido a la geometría del terreno que es tan irregular, valores que pueden ser obviados. El desplazamiento vertical dio aproximadamente un metro menos que en el análisis 2D esto se debe a que en deformación plana se consideró un terreno regular en la base, lo que hace que la cantidad de material sea mayor que en el terreno irregular ya que la cota siempre es de 80 metros, sin embargo en el análisis 3D hay material que no llega a los 80 metros de altura desde la cota del cielo como referencia, lo que hace que se reduzcan las cargas de peso propio y nos encontremos con un desplazamiento menor más aproximado a la realidad.

Con respecto a las tensiones los valores son parecidos y no son excesivamente altos, por lo que se puede decir que la presa verifica según la limitación de diseño.

## TORRE DE ENFRIAMIENTO (L-49)

### Enunciado

La figura representa una torre de enfriamiento formada por una lámina de hormigón armado. Calcular el espesor mínimo de la torre capaz de soportar el peso propio de la estructura con las restricciones que se indican.

- 1) Las tracciones máximas en cualquier punto de la estructura no deben superar los 60 MPa.
- 2) Las compresiones máximas en cualquier punto de la estructura no deben superar los 60 MPa.
- 3) Las propiedades mecánicas del hormigón son:  $E = 19.8 \text{ KN/mm}^2$   $\nu = 0.18$ .
- 4) El apoyo proporcionado por las columnas se puede suponer como empotrado.

Cargas actuantes:

- a) Peso propio

Las dimensiones de la torre en metros:

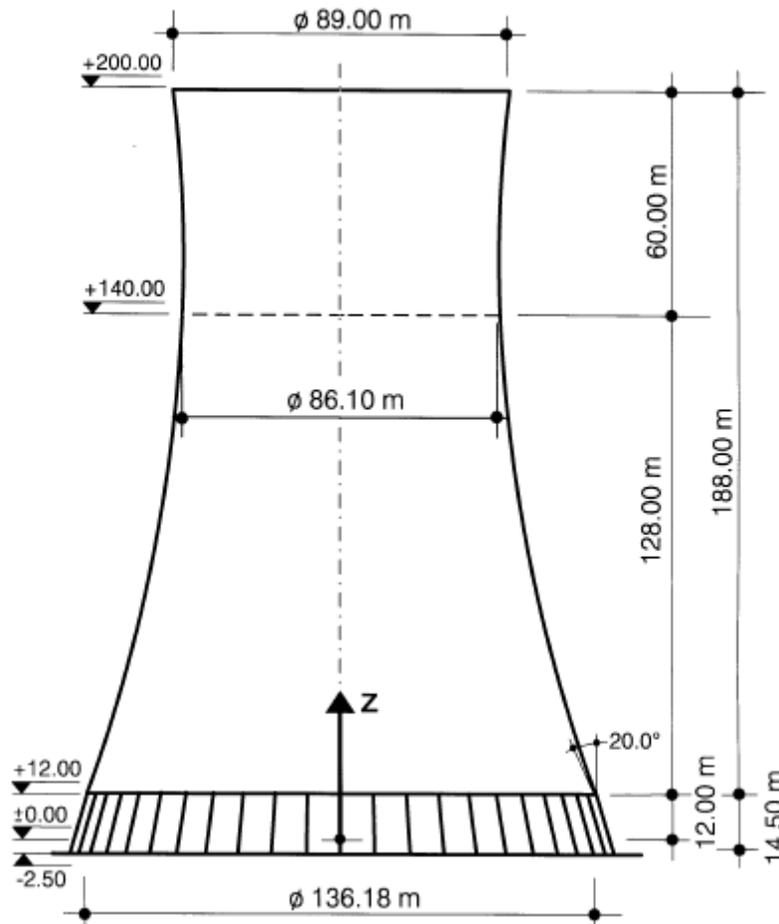


Ilustración 37 Geometría del tanque de enfriamiento.

## Elección de MEF y Software

Para este problema, se considera la torre de enfriamiento como una lámina de hormigón de revolución, ya que en el enunciado nos indican que sólo actúa la carga del peso propio y esta carga se puede asumir como de revolución debido a que actúa de igual manera en cualquier sección de la lámina. Para resolver este problema no se puede utilizar Ram Series Educational, debido a que este software no calcula los esfuerzos para láminas de revolución, por lo tanto es necesario utilizar Ram Series Professional, de esta manera podemos dibujar una parte de la lámina de hormigón que sea representativa para el resto de la geometría.

Se modelará la estructura con malla estructurada, ya que la geometría lo permite, con elementos cuadrilátero de 9 nodos, debido a que la complejidad geométrica de la estructura es baja y es posible encontrar resultados sin tanto gasto computacional. Además se irán incrementando los espesores hasta llegar al espesor que cumpla la condición de diseño de 60MPa.

## Modelo Lámina de Revolución

### Pre-Proceso

Igual que en el problema anterior, el primer paso es definir la geometría, al ser una lámina de revolución se dibujarán sólo 90 grados de esta, de esta manera estas superficies representarán la totalidad del tanque de enfriamiento. Se iniciará con un espesor de 10cm y se aumentará paulatinamente teniendo en cuenta los esfuerzos que se genera. A continuación se muestra la geometría generada con el respectivo material asignado:

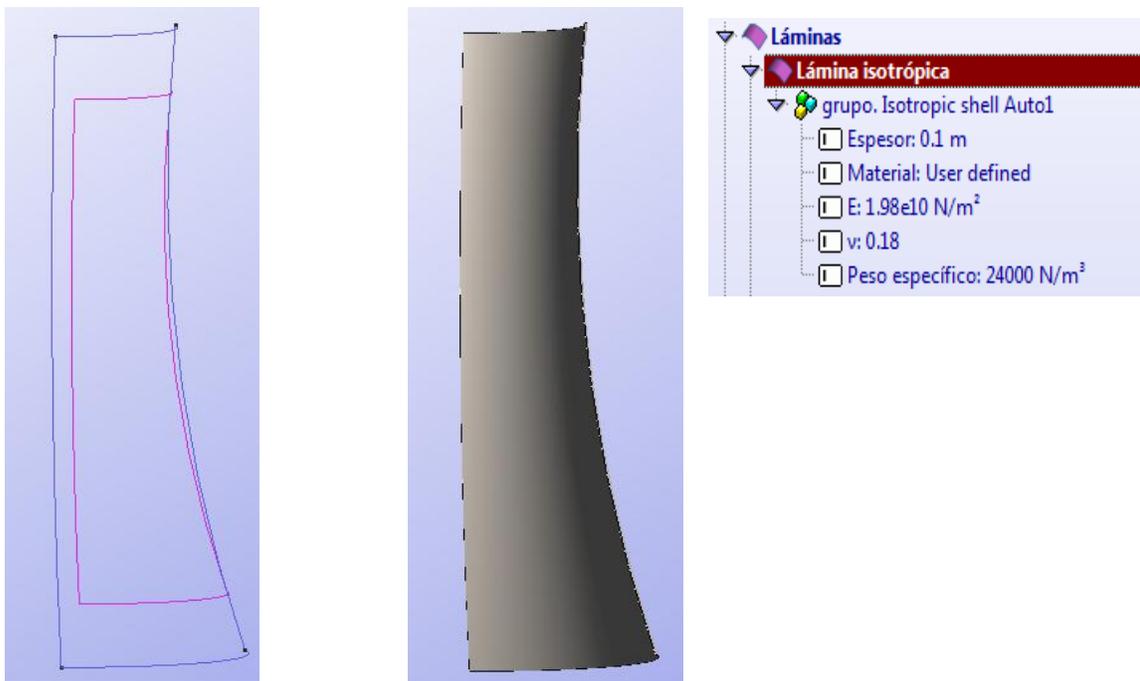


Ilustración 38 Modelado del tanque de enfriamiento como lámina de revolución con su respectivo material.

El siguiente paso es definir las condiciones de contorno, al ser una lámina de revolución se debe impedir los desplazamientos en los ejes horizontales y los giros de tal manera que se garantice la homogeneidad de las secciones. Además en el enunciado afirman que la lámina se encuentra empotrada en la base, por lo tanto también se debe establecer esta condición. Finalmente la configuración de condiciones de contorno es la siguiente:



Ilustración 39 Condiciones de contorno del tanque de enfriamiento.

En donde en la base se restringen todos los grados de libertad, mientras que en los lados se restringe un desplazamiento y dos giros en cada uno de la siguiente manera:

$$\text{Lado } x \rightarrow u_x = 0, \theta_y = 0, \theta_z = 0$$

$$\text{Lado } y \rightarrow u_y = 0, \theta_x = 0, \theta_z = 0$$

De esta manera aseguramos que ninguno de estos puntos realice giros o desplazamientos que afecten las condiciones de revolución.

Por último, antes de iniciar el post-proceso, se debe incluir la acción del peso propio, única acción presente en este problema:



Ilustración 40 Carga de peso propio para el tanque de enfriamiento.

Estando cargada la estructura se puede proceder a iniciar el mallado, el refinamiento de esta para llegar a convergencia y la información de salida del post-proceso.

### Post-Proceso

Se inicia el diseño con un espesor de 0.1m, por motivos constructivos este espesor sería un mínimo razonable, se analizarán las tensiones y si no cumplen se aumentará este espesor hasta optimizar el diseño. A continuación se muestran las mallas modelizadas:

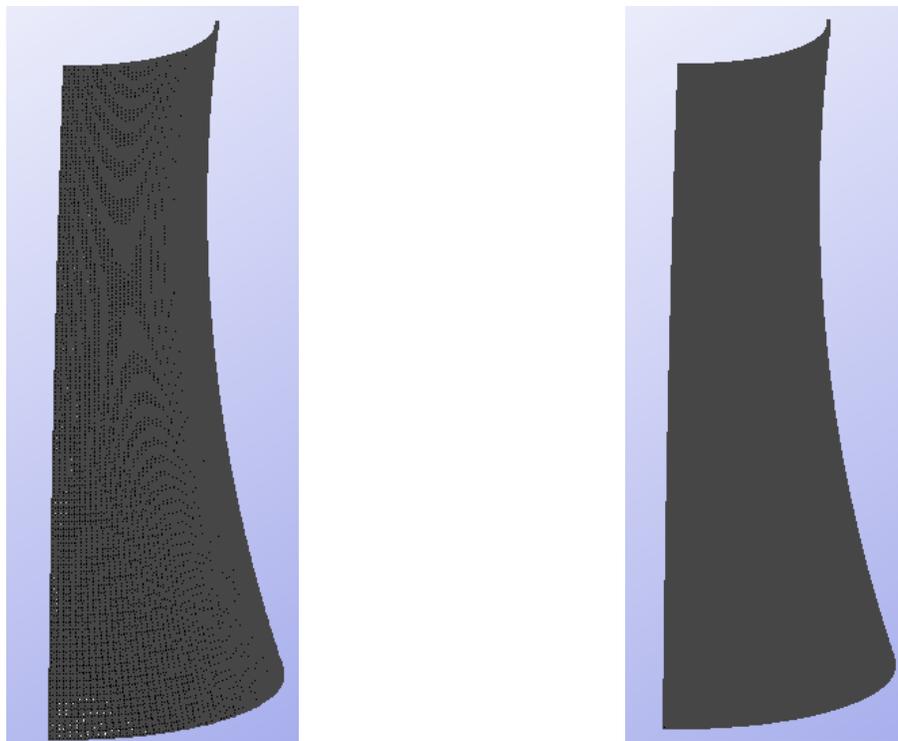
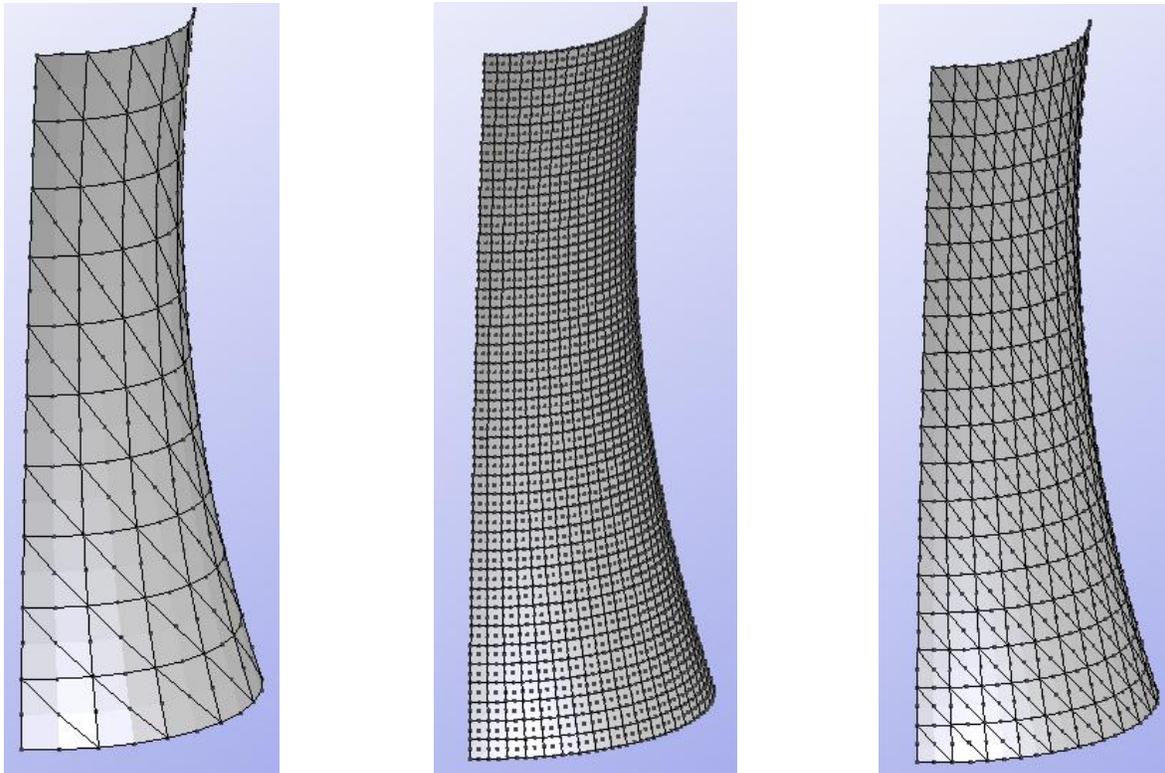


Ilustración 41 Mallado para el tanque de enfriamiento de 20, 10, 5, 2 y 1 metros.

La convergencia de las mallas anteriormente expuestas se presenta a continuación en la siguiente tabla y gráfica:

Tamaño de malla (m)	ESFUERZOS PRINCIPALES MÁXIMOS			Nodos	GDL
	Top				
	Si (Mpa)	Sii (Mpa)	Siii (Mpa)		
20	0.16	0.96	3.72	231	693
10	0.17	1.11	3.69	897	2691
5	0.10	1.18	3.52	3311	9933
2	0.10	1.16	3.69	20437	61311
1	0.10	1.16	3.69	82345	247035

Tabla 4 Convergencia de mallado para el tanque de enfriamiento.

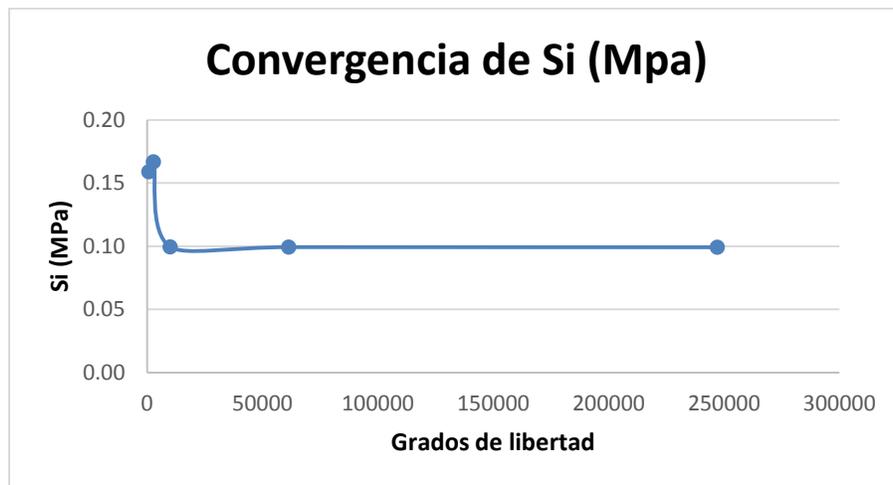


Ilustración 42 Gráfica de convergencia para la tensión principal Si.

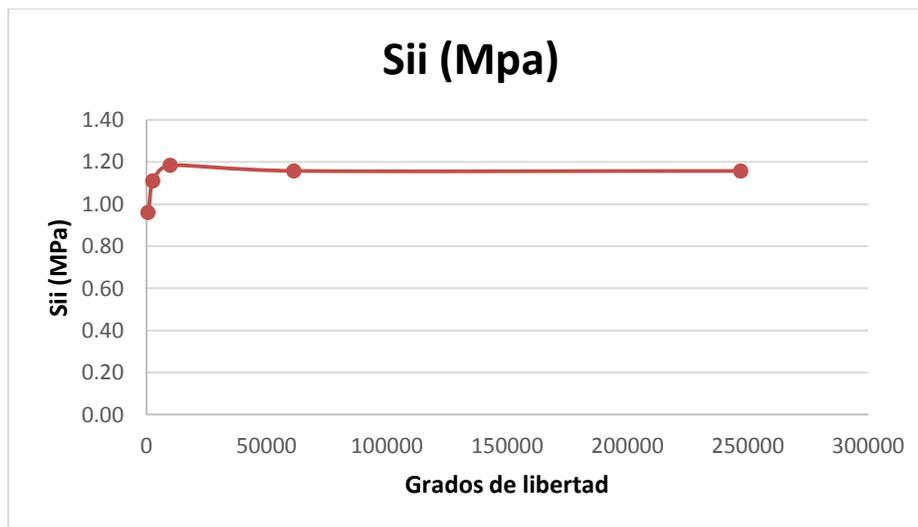


Ilustración 43 Gráfica de convergencia para la tensión Sii.

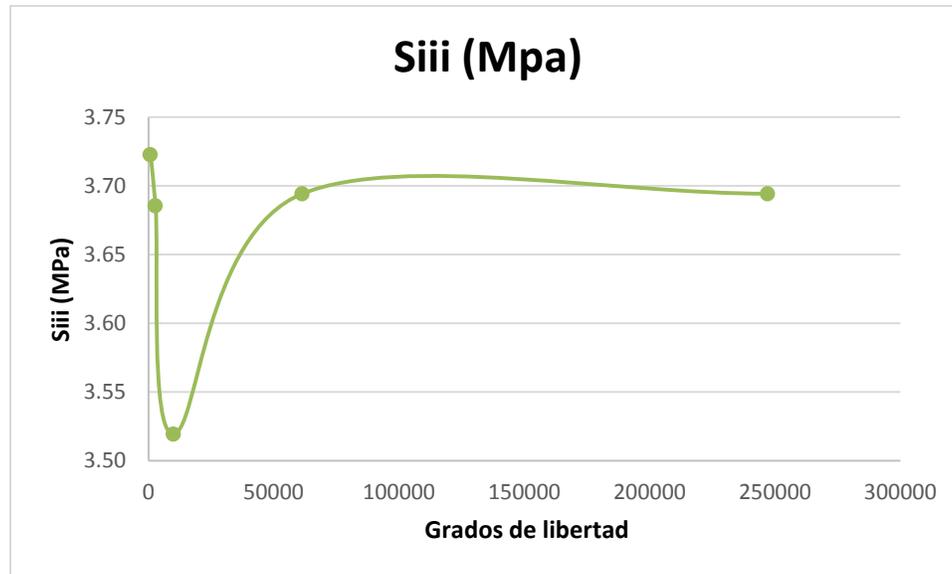


Ilustración 44 Gráfico de convergencia para la tensión principal Siii.

Como se puede apreciar, ningún esfuerzo supera los 60MPa de diseño exigidos en el enunciado, por lo tanto no es necesario optimizar el espesor de la lámina, ya que 10cm es lo que razonablemente se podría llevar a cabo constructivamente. A continuación se presentan los estados tensionales principales que llegaron a la convergencia:

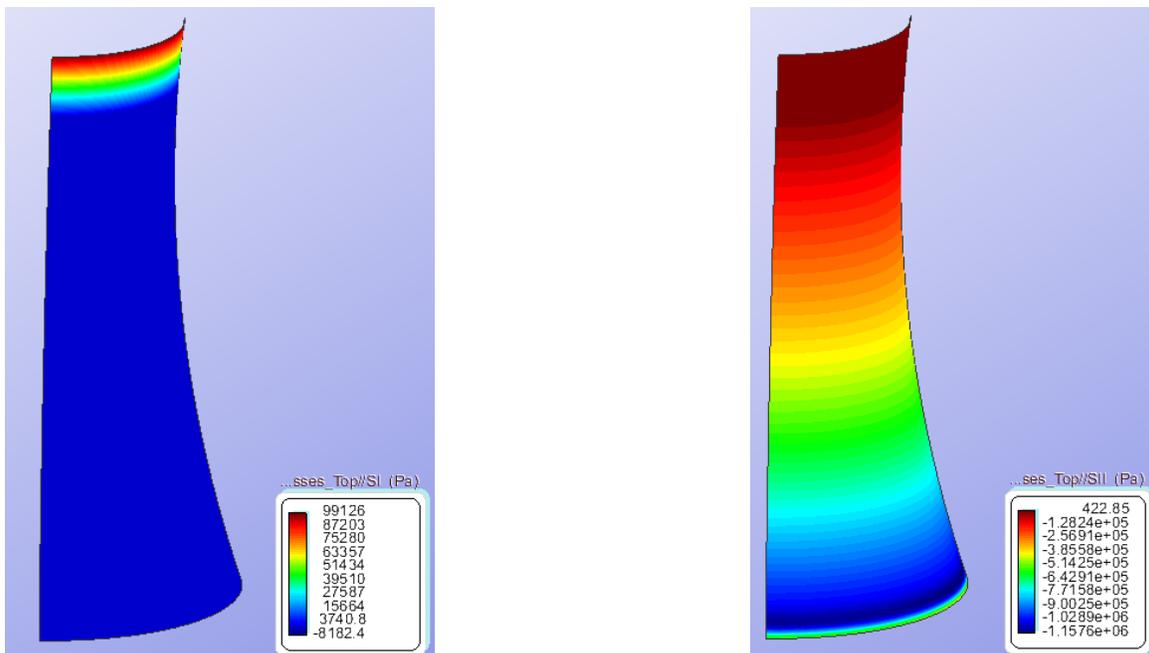


Ilustración 45 Resultados de la tensión principal TOP Si y Sii.

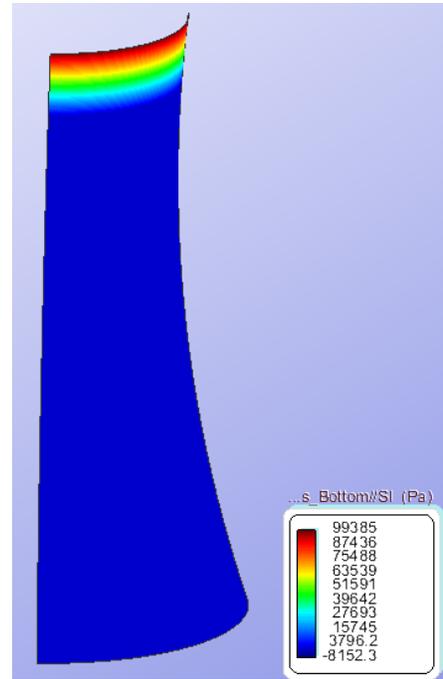
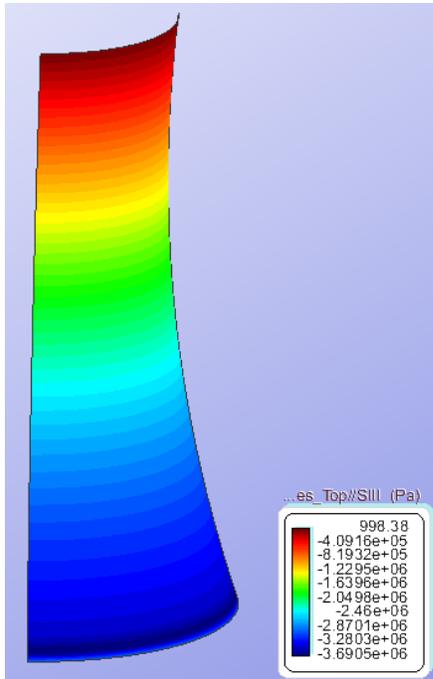


Ilustración 46 Resultados de la tensión principal TOP Sii y BOTTOM Si.

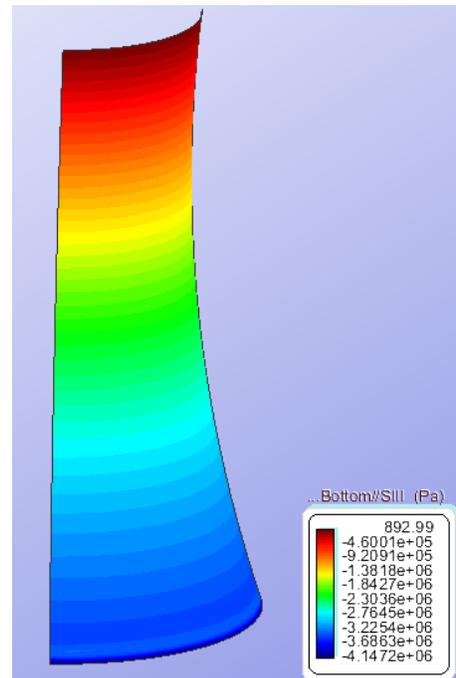
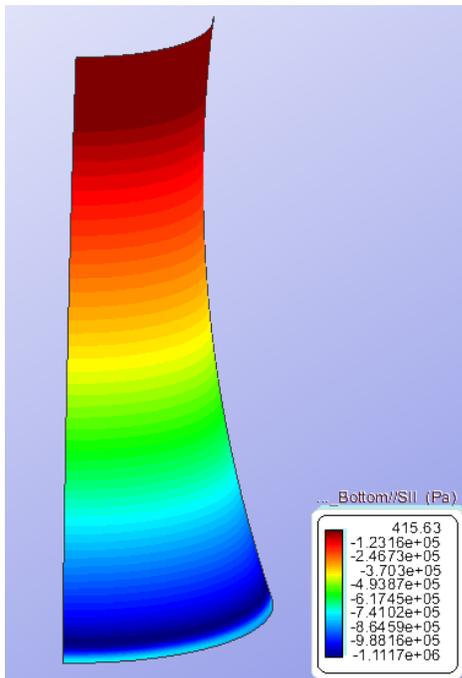


Ilustración 47 Resultados de la tensión principal BOTTOM Sii y Siii.

Como se puede apreciar en ningún caso se superan los 60MPa de diseño, ni en los esfuerzos principales TOP ni en los BOTTOM, por lo tanto las condiciones del enunciado están cumplidas y como se afirmó antes no es necesario aumentar el espesor de la placa. Los valores de estas tensiones son tan bajos debido a que la base se encuentra empotrada esto le da rigidez al elemento y puede distribuir mejor los esfuerzos, si el taque de enfriamiento se encontrara simplemente apoyado tal vez los esfuerzos fueran mayores y sería necesario aumentar el espesor de la lámina.

También es posible analizar que las condiciones de revolución se cumplieron, ya que las franjas de las tensiones principales demuestran que existe simetría, por lo tanto las condiciones de contorno fueron correctas, lo que genera más confianza en los resultados.