

Universidad politécnica de Cataluña

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS DE BARCELONA
DEPARTAMENTO DE RESISTENCIA DE MATERIALES Y ESTRUCTURAS EN LA INGENIERIA



Materia:

Ingeniería de estructuras

Sustentante:

Rolando E. Mercedes Reyes

Practica:

Final de laboratorio

Fecha:

09/Junio/2015

INDICE

Contenido	Pag.
1. INTRODUCCION.....	3
2. OBJETIVO.....	3
2.1 Objetivos específicos	3
3. DESCRIPCION DEL PROBLEMA	4
4. MALLA ELEGIDA	5
5. RESULTADOS DE CÁLCULOS	7
6. Tabla de resumen de datos:.....	13
7. Graficando los datos de la tabla anterior:	13
8. Conclusión.....	13
9. Planteamiento del problema (S-6).....	14
9.1 Base teórica implementada:	15
10. Preproceso:.....	18
10.1 Datos de análisis:	18
10.2 Geometría:	19
10.3 Condiciones de contorno:.....	19
10.4 Definición del material:.....	19
10.5 Cargas:.....	20
10.6 Análisis de convergencia:.....	20
11. Proceso.....	22
12. Postproceso - Análisis Bidimensional.....	22
12.1 Análisis Tridimensional:	24
12.2 Geometría:	24
12.3 Condiciones de contorno:.....	25
12.4 Cargas:.....	25
12.5 Análisis de convergencia de modelo 3D:	26
12.6 Esfuerzos en elemento de presa:.....	28
13. Conclusión.....	30

1. INTRODUCCION

El área de las estructuras es una rama de la ingeniería que en la actualidad se encuentra en constante crecimiento e investigación, existe 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 (MEF), es una de estas importantes metodologías, la cual permite simular con altos grados 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 métodos de elementos finitos con ayuda de las altas tecnologías en computación que se viven en la actualidad, se unen para crear gran variedad de software de análisis de estructuras, estos se convierten en una valiosa herramienta de fácil aplicación que permite recrear casi cualquier tipo de estructura aplicada para el uso civil.

Es por esto que el presente trabajo tiene como objetivo en la enseñanza y práctica de las herramientas de diseño basadas en la utilización de elementos finitos, para los estudiantes de la asignatura de Ingeniería de Estructuras.

Veremos el desarrollo y solución para dos problemas en estructuras de uso civil, utilizando las herramientas de diseño en Elementos finitos, el primer problema es el diseño de una placa plana de hormigón armado y el segundo es una presa de materiales sueltos en tierra armada.

2. OBJETIVO

Desarrollar el conocimiento y la práctica en el análisis y diseño de estructuras utilizando Métodos de elementos Finitos.

2.1 Objetivos específicos

- Analizar el estado tensional de las estructuras típicas de la ingeniería civil.
- Calcular el valor máximo de la carga que satisface una placa plana de hormigón armado con las restricciones que indica.
- Diseñar y dimensionar una presa en tierra armada, teniendo como limitante las dimensiones geométricas y las tensiones desarrolladas en el interior de la presa.

3. DESCRIPCION DEL PROBLEMA

PROBLEMA L-63

La figura muestra una placa plana de hormigón armado sujeta a una carga uniformemente repartida y con las condiciones de apoyo indicadas.

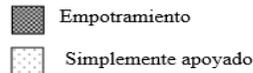
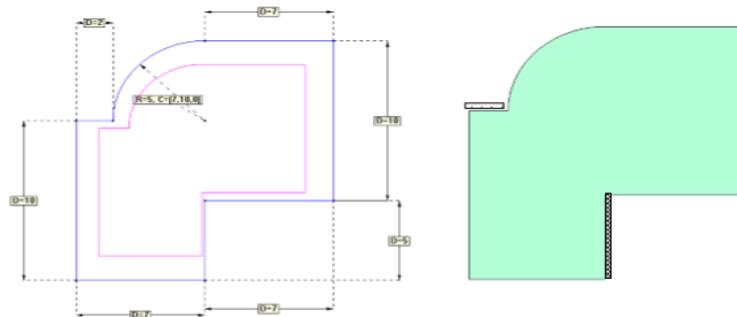
Calcule el valor máximo de la carga que satisface las restricciones que se indican.

- 1) Las tracciones máximas en cualquier punto no deben superar los 20 MPa
- 2) Las compresiones máximas en cualquier punto no deben superar los 10 MPa
- 3) Tomar los valores de E y ν de un hormigón estándar.
- 4) El espesor de la placa es de 0.20 m

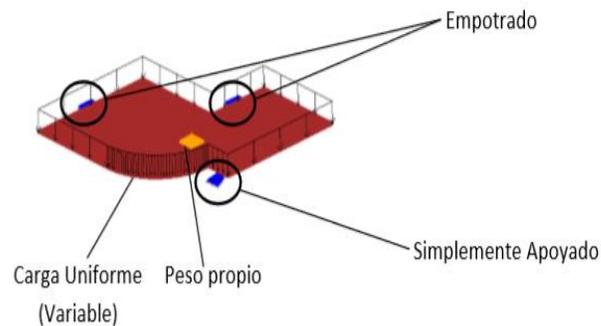
Cargas actuantes:

- a) Peso propio
- b) Peso propio + carga uniforme.

Las dimensiones en metros de la placa:



Este es un problema de placa delgada, para un tipo de análisis estático y un modelo constitutivo del material lineal. A continuación se presenta una gráfica con las condiciones de apoyos aplicadas al modelo geométrico en Gid y los casos de carga asignados:



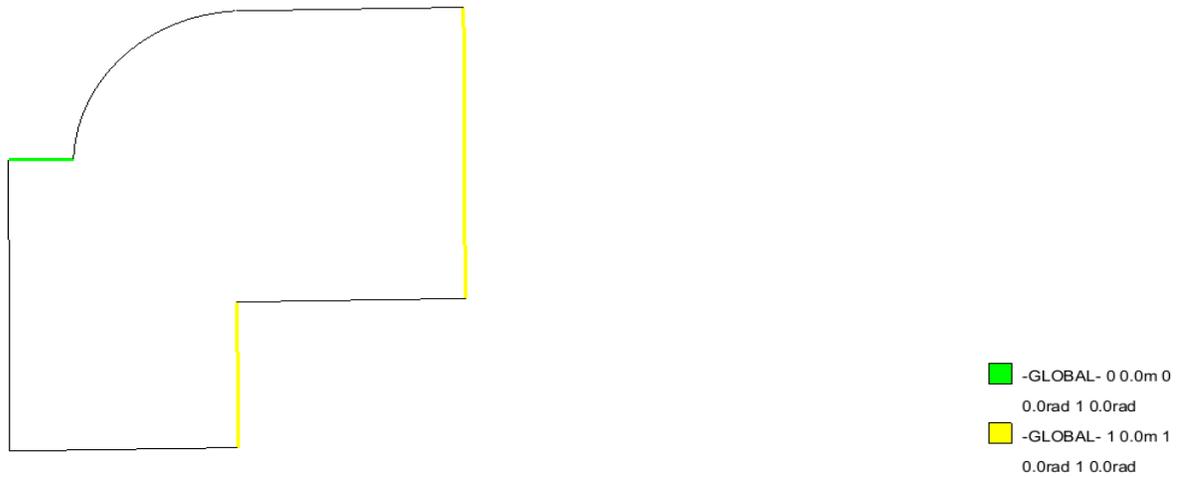


Figura. Condiciones de contorno

4. MALLA ELEGIDA

Para elegir la malla primero se irá haciendo un análisis de convergencia con el desplazamiento máximo en el eje "z". Donde se tendrá en cuenta el peso propio solamente, ya que en este lo que importa es encontrar la carga que cumple con las restricciones indicadas.

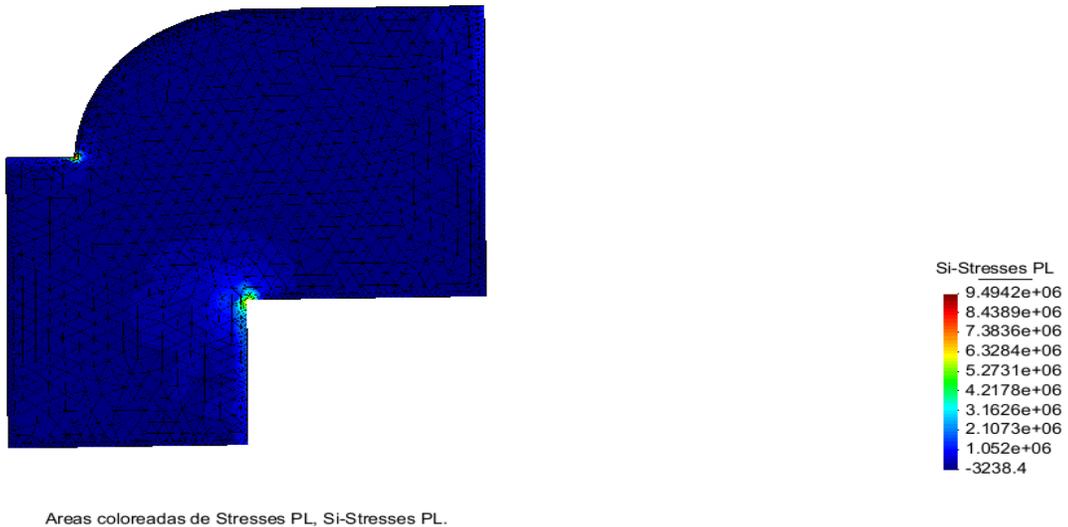
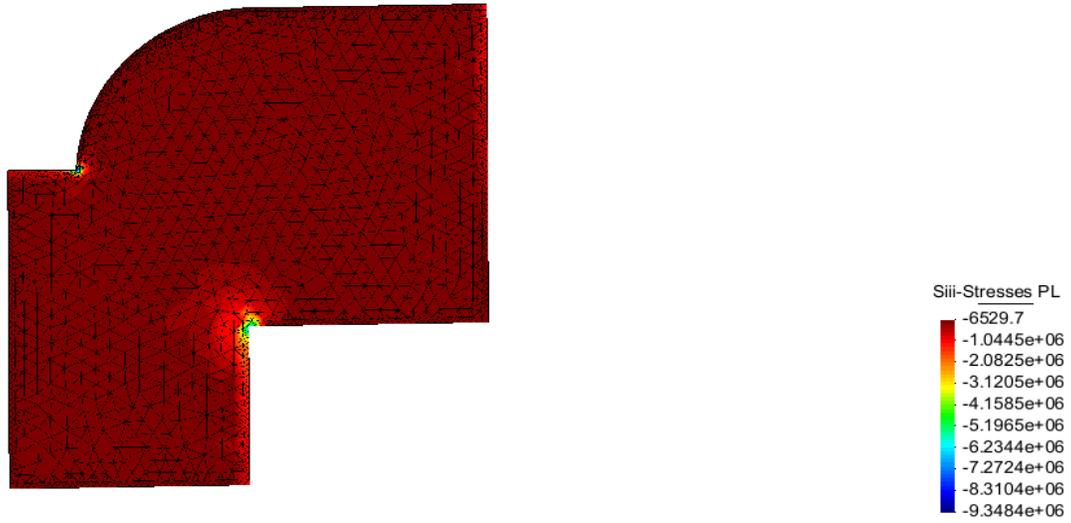


Figura. Tracciones, malla DKT de 0.175 mts



Areas coloreadas de Stresses PL, Siii-Stresses PL.

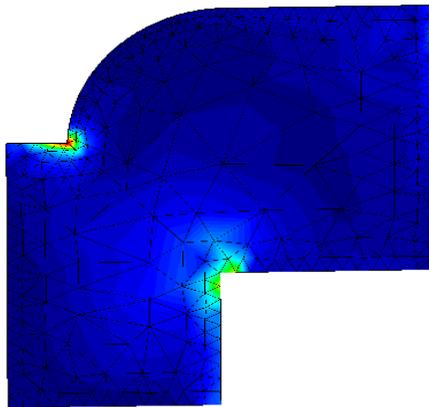
Figura. Compresiones, malla DKT de 0.175 mts

En la gráfica presentamos la convergencia de las mallas utilizadas para el cálculo, teniendo en cuenta los distintos tamaños de la misma:

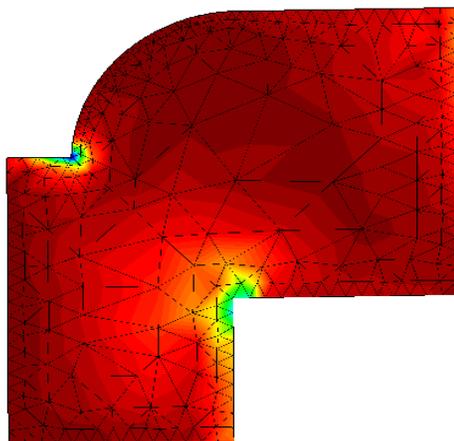
5. RESULTADOS DE CÁLCULOS

El valor máximo de la carga a buscar lo encontraremos iterando valores de una carga uniformemente aplicada sobre la superficie, teniendo en cuenta que el caso más desfavorable es aquel que contiene también el peso propio de la placa. A continuación gráficamente las tensiones máximas de compresión y tracción en la placa, tanto en el tope como en el fondo de la misma:

Carga uniforme de 5,000 Pascal + PP:

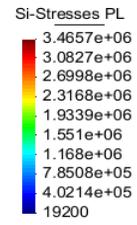
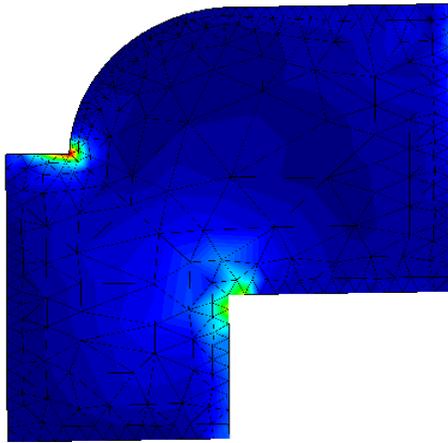


Areas coloreadas de Stresses PL, Si-Stresses PL.

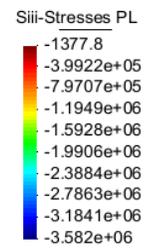
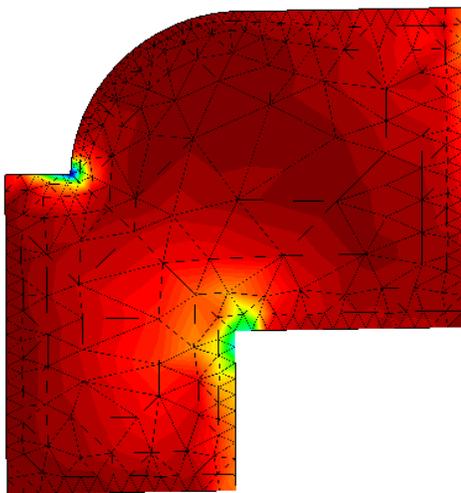


Areas coloreadas de Stresses PL, Siii-Stresses PL.

Carga uniforme de 10,000 Pascal + PP:

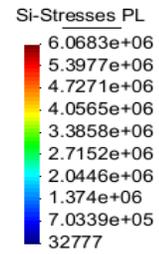
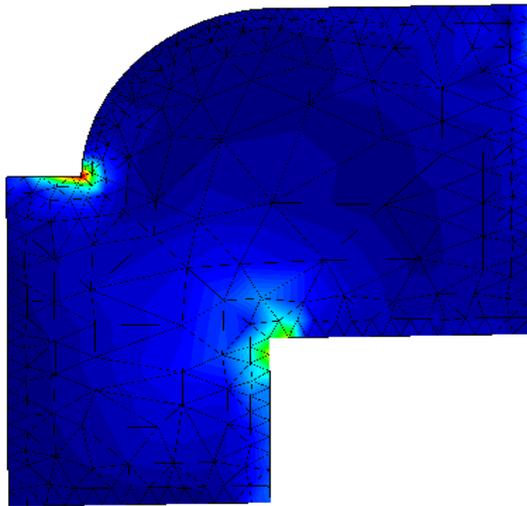


Areas coloreadas de Stresses PL, Si-Stresses PL.

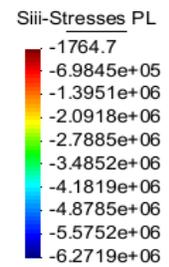
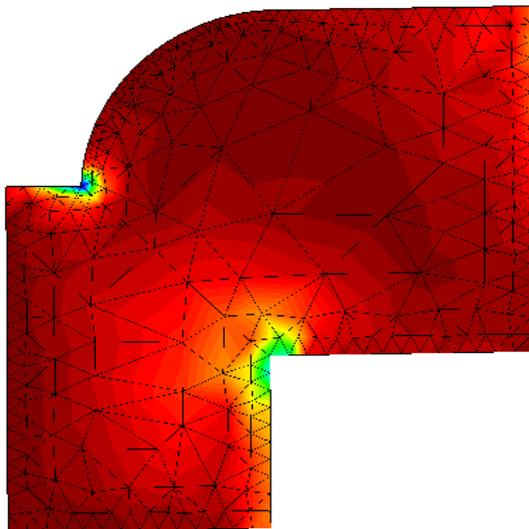


Areas coloreadas de Stresses PL, Siii-Stresses PL.

Carga uniforme de 15,000 Pascal + PP:

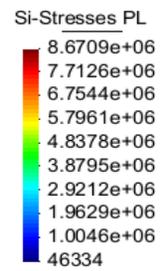
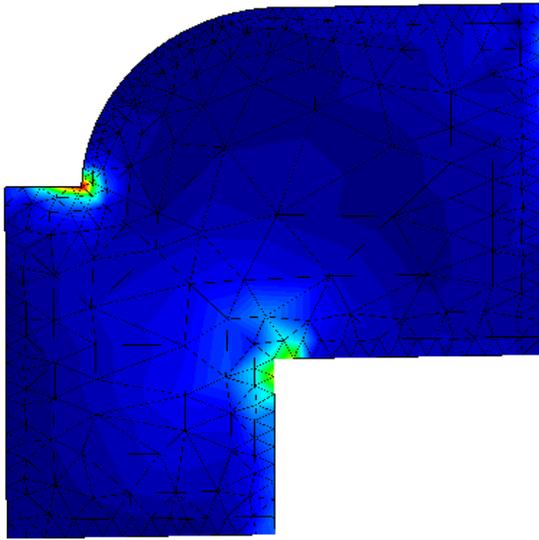


Areas coloreadas de Stresses PL, Si-Stresses PL.

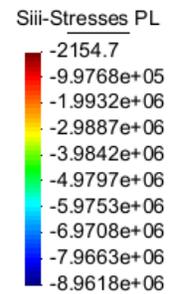
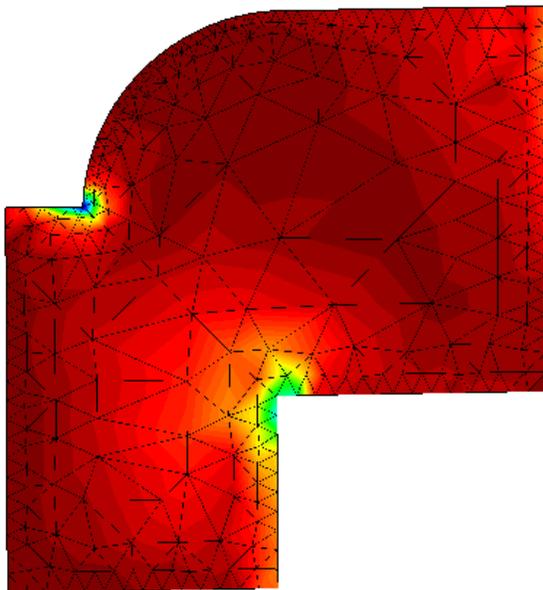


Areas coloreadas de Stresses PL, Siii-Stresses PL.

Carga uniforme de 20,000 Pascal + PP:

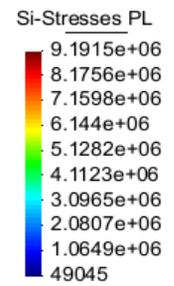
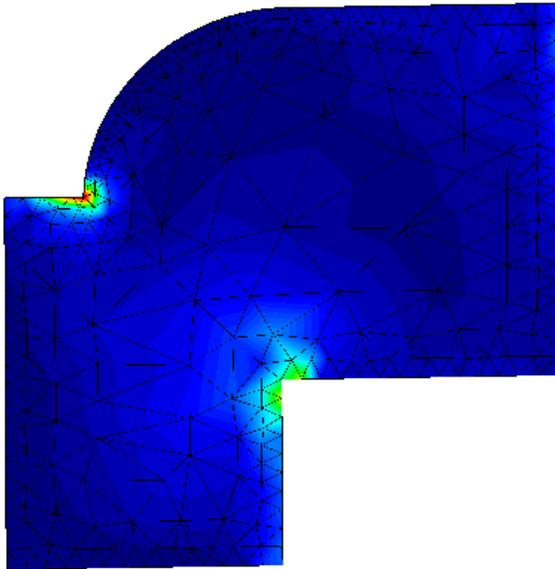


Areas coloreadas de Stresses PL, Si-Stresses PL.

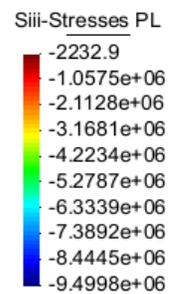
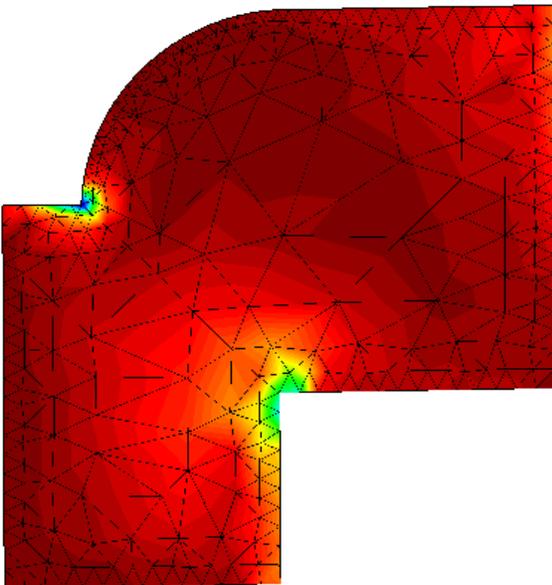


Areas coloreadas de Stresses PL, Siii-Stresses PL.

Carga uniforme de 21,000 Pascal + PP:

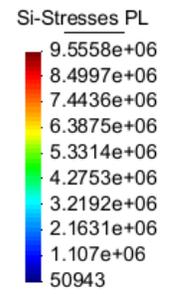
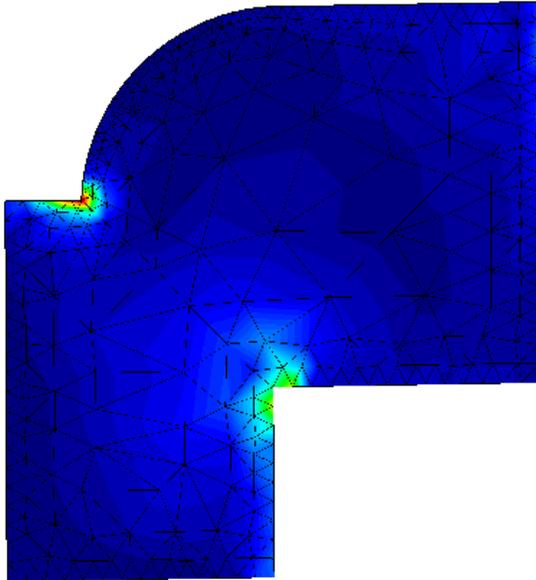


Areas coloreadas de Stresses PL, Si-Stresses PL.

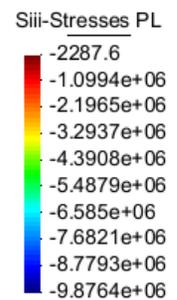
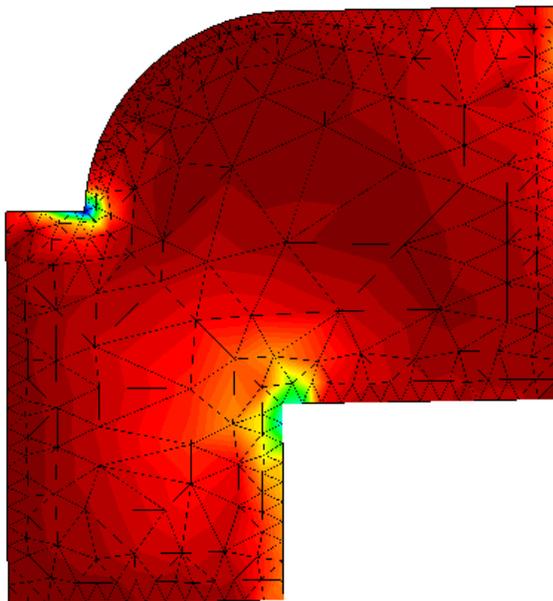


Areas coloreadas de Stresses PL, Siii-Stresses PL.

Carga uniforme de 21,700 Pascal + PP:



Areas coloreadas de Stresses PL, Si-Stresses PL.

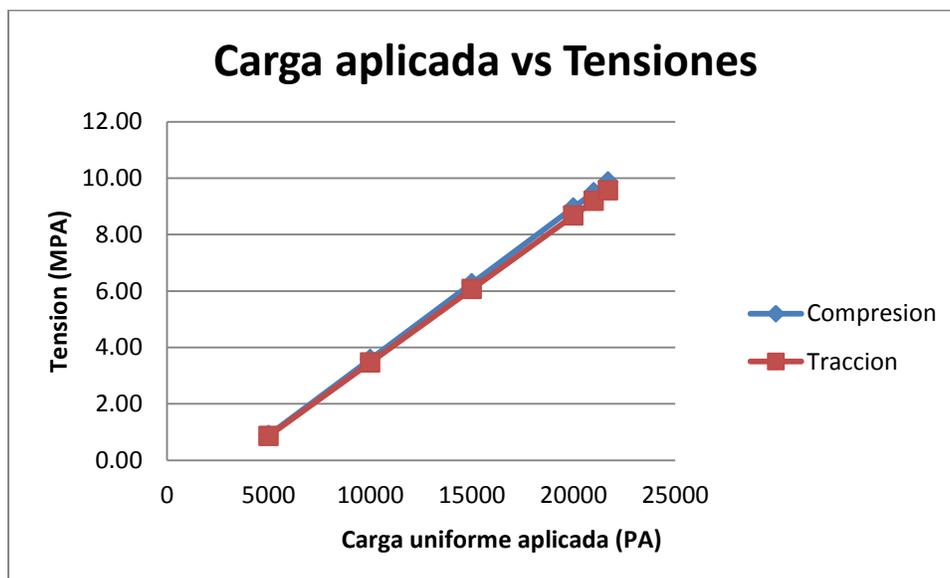


Areas coloreadas de Stresses PL, Siii-Stresses PL.

6. Tabla de resumen de datos:

Análisis de Datos			
Tamaño de Malla	Carga uniforme aplicada	Tension Max. Compresion	Tension Max. Traccion
0.50	5000	0.8630	0.8920
0.50	10000	3.4657	3.5820
0.50	15000	6.0683	6.2719
0.50	20000	8.6709	8.9618
0.50	21000	9.1915	9.4998
0.50	21700	9.5658	9.8764

7. Graficando los datos de la tabla anterior:



8. Conclusión

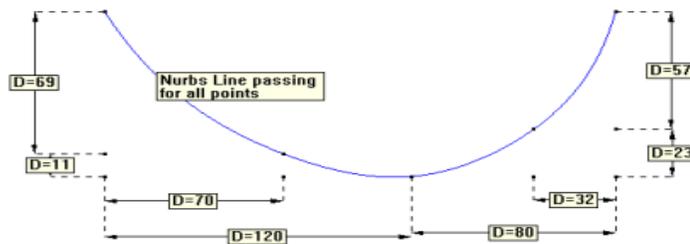
En conclusión podemos ver la tendencia que tiene la placa a primero fallar por las tensiones de tracción que por las de compresión, siendo las de tracción un poco más elevadas que las compresiones, encontrado que la carga máxima que se pudiera aplicar a la placa sin saltar las limitantes de este caso sería de unos 21,700 Pa con un margen de seguridad de un 5%.

9. Planteamiento del problema (S-6)

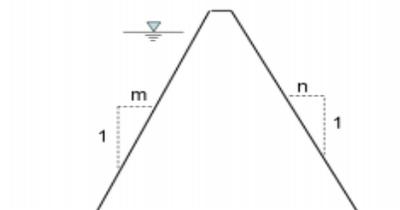
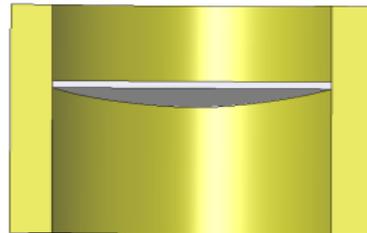
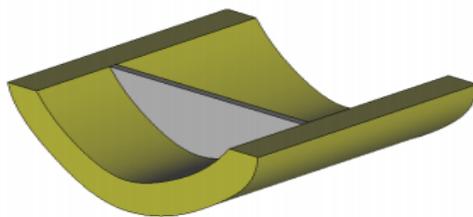
Dimensionar y calcular una presa homogénea de materiales sueltos de 80 m de altura. La anchura en coronación debe ser de 6 m. con las restricciones geométricas que se indican. Realizar el proyecto mediante un análisis bidimensional y posteriormente en 3D para verificar el diseño utilizando en ambos casos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

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



$$\begin{aligned} 2.0 < m < 3.5 \\ 2.0 < n < 3.5 \end{aligned}$$

Como lo solicita el problema, se deberán generar dos modelos diferentes para el estudio de la presa en cuestión:

Uno consta en trabajar la geometría de la presa de forma bidimensional, recurriendo al temario de deformación plana de los elementos finitos, de esta forma se realizaran en la primera parte del trabajo el estado bidimensional de forma paralela para las dos condiciones de carga dadas para el problema.

Después de tener bien identificadas las variables solicitadas en el problema, se procede a la elaboración del modelo computacional en 3D, corroborando y comparando los resultados obtenidos con la simulación bidimensional, igualmente para los dos estados de cargas dados.

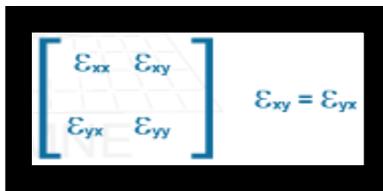
Toda la simulación se realiza en el programa computacional “RamSeries Professional”

9.1 Base teórica implementada:

La base teoría implementa en el presente problema es la de deformación plana, esta plantea lo siguiente:

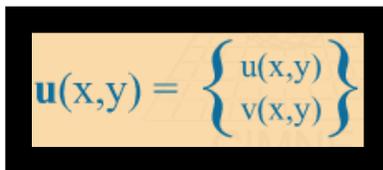
Deformación plana: cuando una de sus dimensiones (longitud) es mucho mayor que las otras dos, y sobre ella actúan únicamente cargas uniformemente distribuidas a lo largo de su longitud y contenidas en planos ortogonales al eje que uno los centros de gravedad de sus distintas secciones transversales. Por ejemplo: muros de contención, presas de gravedad, tuberías bajo presión interior, túneles, tensiones bajo zapata.

En este caso las deformaciones no están permitidas en la dirección del eje Z. La matriz de deformación se ve reducida.


$$\begin{bmatrix} \epsilon_{xx} & \epsilon_{xy} \\ \epsilon_{yx} & \epsilon_{yy} \end{bmatrix} \quad \epsilon_{xy} = \epsilon_{yx}$$

Campo de desplazamiento:

Se supone que las secciones perpendiculares al eje prismático Z se deforman en su plano y de manera idéntica, por lo tanto:


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

Donde $u(x,y)$ y $v(x,y)$ son los desplazamientos de un punto en las direcciones X e Y respectivamente.

Campo de deformaciones:

Del campo de desplazamiento se deducen las deformaciones utilizando la teoría clásica de elasticidad.

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} \quad \varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y}$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}$$

$$\gamma_{xz} = \gamma_{yz} = 0$$

Con la deformación longitudinal ε_z , en el caso de deformación plana se hace la hipótesis de que es nula. Por otra parte, en tensión plana dicha deformación no es nula, pero se supone que las tensiones σ_z si son 0. En ningún caso se considera la deformación ε_z . El vector de deformaciones significativas de un punto se define para tensión y deformación plana como:

$$\varepsilon = [\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_{xy}]^T$$

Campo de tensiones:

Las tensiones tangenciales τ_{xz} y τ_{yz} son nulas y la tensión σ_z no trabaja, por lo tanto el vector de tensiones es:

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

Tensiones y deformaciones:

La relación matricial entre tensiones y deformaciones se expresa como:

$$\sigma = D\varepsilon$$

La matriz D es la matriz de propiedades mecánicas o constitutivas se escribe:

$$D = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & 0 \\ d_{21} & d_{22} & 0 \\ 0 & 0 & d_{33} \end{bmatrix}$$

Para deformación plana con $\epsilon_z=0$ los términos d_{ij} de la matriz constitutiva se expresan mediante la fórmula:

$$\begin{aligned} d_{11} &= \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \\ &= d_{22} \\ d_{12} &= d_{21} = \frac{\nu}{1-\nu} d_{11} \\ d_{33} &= \frac{E}{2(1+\nu)} = G \end{aligned}$$

Para tensión plana ϵ_z no es nula, pero $\sigma_z=0$ los términos d_{ij} de la matriz constitutiva se expresan mediante la fórmula:

$$\begin{aligned} d_{11} &= d_{22} = \frac{E}{1-\nu^2} \\ d_{12} &= d_{21} = \nu d_{11} \\ d_{33} &= \frac{E}{2(1+\nu)} = G \end{aligned}$$

El caso general con tensiones y deformaciones iniciales se escribe:

$$\sigma = D (\epsilon - \epsilon^0) + \sigma^0$$

Medición de los efectos térmicos en tensión plana:

$$\epsilon^0 = \begin{Bmatrix} \alpha\Delta T \\ \alpha\Delta T \\ 0 \end{Bmatrix}$$

En deformación plana:

$$\epsilon^0 = (1+\nu) \begin{Bmatrix} \alpha\Delta T \\ \alpha\Delta T \\ 0 \end{Bmatrix}$$

PTV en Elasticidad 2D:

El principio de los trabajos virtuales para problemas de elasticidad se explica en dos partes

El primer miembro representa el trabajo que realizan las tensiones σ_x , σ_y sobre las deformaciones virtuales " $\delta\epsilon_x$, $\delta\epsilon_y$ ".

El segundo miembro representa el trabajo de las fuerzas repartidas por unidad de volumen " b_x , b_y "; las fuerzas repartidas sobre el contorno " t_x , t_y "; y de las fuerzas puntuales " U_i , V_i " sobre los desplazamientos virtuales " δu , δv "

$$\int_A \delta \epsilon^T \sigma t dA = \int_A \delta u^T b t dA + \oint_l \delta u^T t t ds + \sum_i \delta u_i^T q_i$$

$\delta \epsilon = [\delta \epsilon_x, \delta \epsilon_y, \delta \gamma_{xy}]^T$	$q_i = [U_i, V_i]^T$
$\delta u = [\delta u, \delta v]^T$	$\delta u_i = [\delta u_i, \delta v_i]^T$
$b = [b_x, b_y]^T$	$t = [t_x, t_y]^T$

10. Preproceso:

10.1 Datos de análisis:

Inicialmente se define el tipo de problema a resolver. En este caso inicialmente se trata de un problema de deformación plana, por lo que se especifica en el programa de cálculo "RamSeries", tipo de simulación, dimensión de la simulación, tipo de análisis, y tipo de elementos analizar y los demás parámetros de análisis:

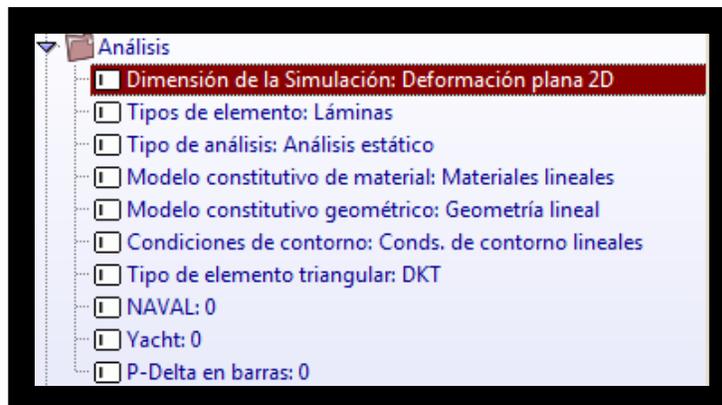


Figura 1. Definición del tipo de análisis problema.

10.2 Geometría:

Se define la geometría para la condición más crítica de la presa, la cual es cargada con presión hidrostática, con el objetivo de realizar el análisis de convergencia que nos brinde un tipo y tamaño de malla adecuada para el problema en cuestión, para esto se introduce la geometría del modelo cargado trabajado como deformación plana, por tanto se define como plano de trabajo XY y la dirección z como dirección prismática para la presa.

Se hace uso de las herramientas de puntos, líneas y superficies para el montaje de una geometría inicial con la relación de taludes izquierdo y derecho de 1:2 y 1:2 respectivamente, que es la condición inicial de menos peso para la presa.

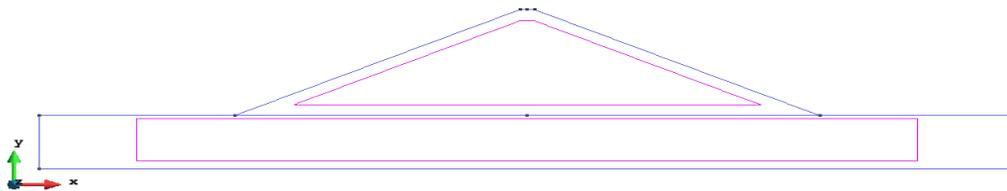
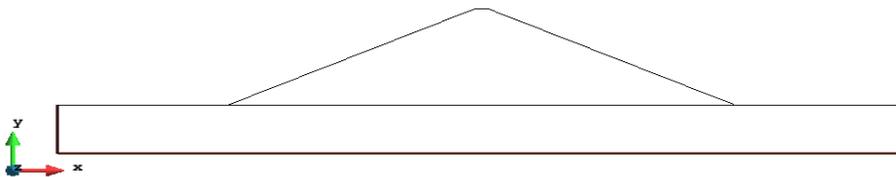


Figura 2. Geometría inicial con Taludes izquierdo 1:2 y derecho 1:2

10.3 Condiciones de contorno:

Se definen las condiciones de contorno de la presa, las cuales serán las restricciones en la base del suelo en la dirección X y Y, e igualmente de los laterales del en la dirección X.



10.4 Definición del material:

Se define para los materiales de la presa, las condiciones dadas en el problema, para esto se introduce las propiedades en el “RamSeries”, para el material de la presa se define Shell Auto1 y para el suelo se define Shell Auto2, estas se indican en la siguiente ilustración:

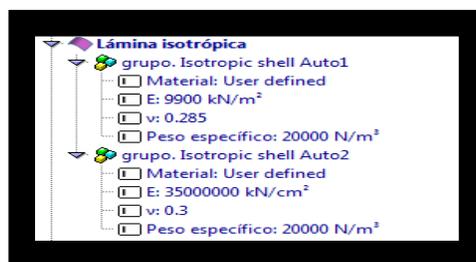
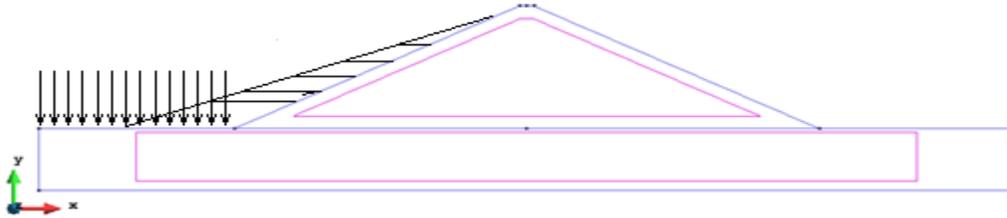


Figura 3. Definición de materiales para el modelo

10.5 Cargas:

Para el estudio de convergencia se elabora el modelo con las cargas más críticas, las cuales tienen en cuenta el peso propio y el empuje hidrostático:



10.6 Análisis de convergencia:

De igual forma que el problema inicial, se hace necesario la escogencia de un tipo un tamaño de malla óptima para garantizar buenos resultados. Esto es debido a que en MEF no todos los tipos de malla generan resultados confiables, se busca con el análisis de convergencia la escogencia de una malla óptima donde se visualice la convergencia de los resultados de una manera rápida y homogénea.

Basta con realizar un análisis de convergencia a un punto aleatorio del modelo, el cual presente desplazamientos inducidos por las cargas actuantes, esto es debido a que los demás parámetros como esfuerzos y deformaciones dependen de la solución de la matriz global del sistema, específicamente del vector de desplazamientos, generando menos errores en la solución en los resultados.

Para este caso, se realiza un análisis de convergencia asignando varios tipos de mallas para el total del modelo, se obtienen los desplazamientos del punto P1 con coordenadas (200,90,0) ubicado en la parte superior de la presa y en la mita de la línea de la corona.

En el análisis de convergencia se estudiaron tres tipologías de mallas no estructuradas (ver Ilustraciones 20, 21), con variación del tamaño de los elementos, el resultado del proceso se indican a continuación en la tabla 3:

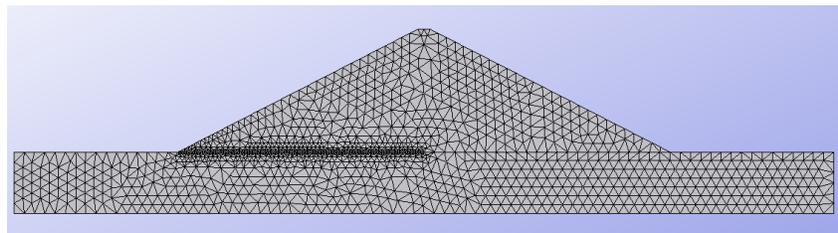


Figura 4. Malla TR 3N

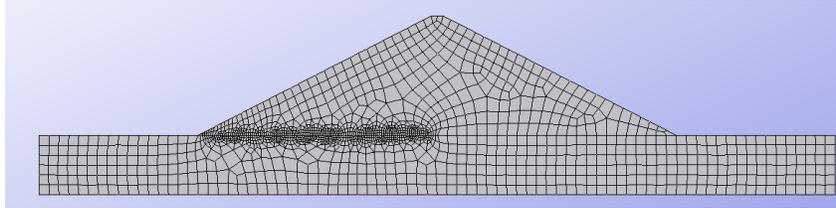


Figura 5. Malla TR 3N

DESPLAZAMIENTO P3 VS NUMERO DE NODOS					
	5m	4m	3m	2m	1m
	ΔZ_a (m) / #Nodos				
TR 3N	-0.9922	-0.9939	-0.9940	-0.9935	-0.9934
	977	1399	2542	5566	22189
TR 6N	-0.9932	-0.9932	-0.9933	-0.9933	N/C
	5681	7273	11147	23070	N/C
QU 4N	-0.9911	-0.99204	-0.99232	-0.99243	-0.99275
	1695	2008	2481	3831	18850
	2744	3534		3694	18653

Figura 6. Tabla de resultados de convergencia.

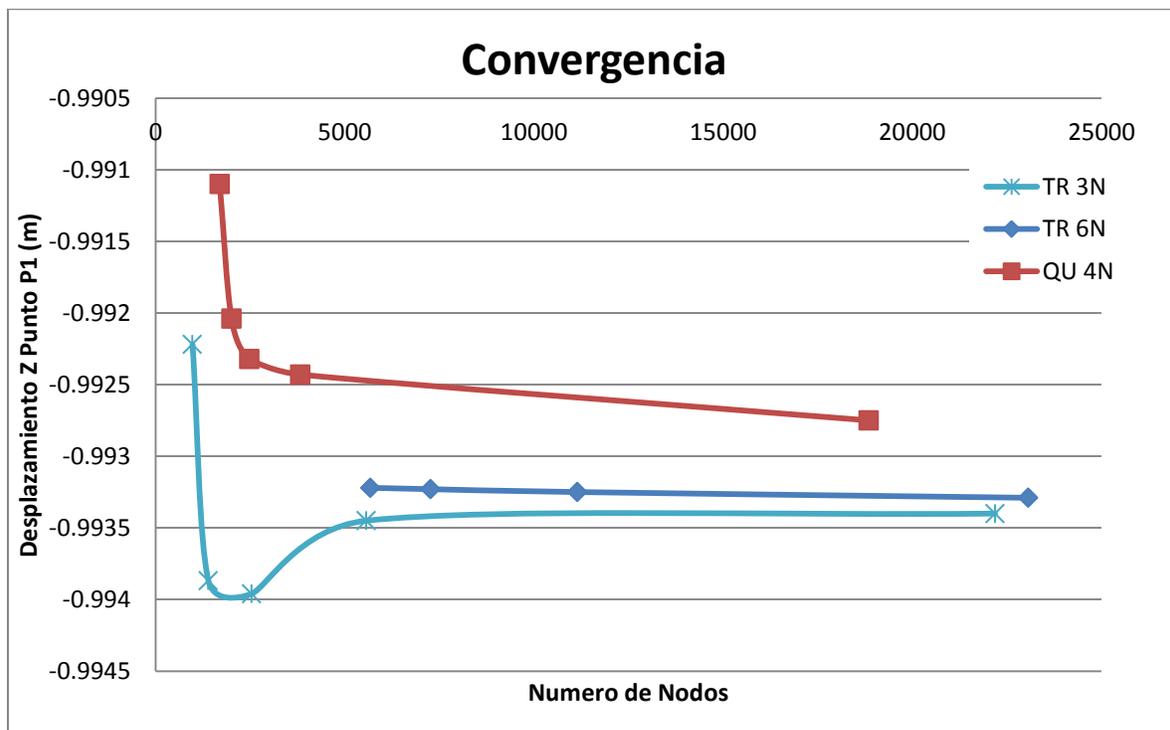


Figura 7. Grafica de convergencia del problema.

Se analiza la convergencia de la cual se aprecia que la malla de triángulos de 6N converge rápidamente al valor del desplazamiento en la dirección z del punto P1 y después de varios tamaños de malla, el desplazamiento permanecía constante en las tres primeros decimales, con una valor de -0,9932 por tanto se aprecia este tipo de malla y el tamaño de 2 m, es la más indicadas para el dimensionamiento de la presa, de tal forma que se generen resultados confiables.

11. Proceso

Después de asignación de cada una de las mallas para el análisis de convergencia, se procede al cálculo de cada uno de los desplazamientos dando como resultado los datos de la tabla 1, a esta etapa de estudio se le llama Proceso, esta función la elabora internamente en programa “RamSeries Professional”.

12. Postproceso - Análisis Bidimensional

Conociendo mediante al análisis de convergencia el tipo y tamaño de malla a utilizar, se procede al cálculo del pre-dimensionamiento óptimo de la presa, para el cual se cumplan las condiciones dadas en el problema.

Para esto se realiza un análisis tentativo aumentando gradualmente las inclinaciones de los taludes y obteniendo los esfuerzos principales para cada inclinación, se inicia el proceso con un con una relación de talud mínima de 1:2 en ambos lados y será aumentado cada 0.5 unidades hasta encontrar la tracciones óptimas menores a 1MPa, de esta forma con el tipo y tamaño de malla, los resultados de dicho análisis se presentan a continuación:

	Tracciones principales Presa cargada caso (a)	Tracciones principales Presa cargada caso (b)
Valores para m y n	Tensión Si (MPa)	Tensión Si (MPa)
2	-523	0.927
2.5	x	1.19
3	x	x
3.5	x	x

Figura 8. Análisis tentativo de pendiente de taludes óptimos

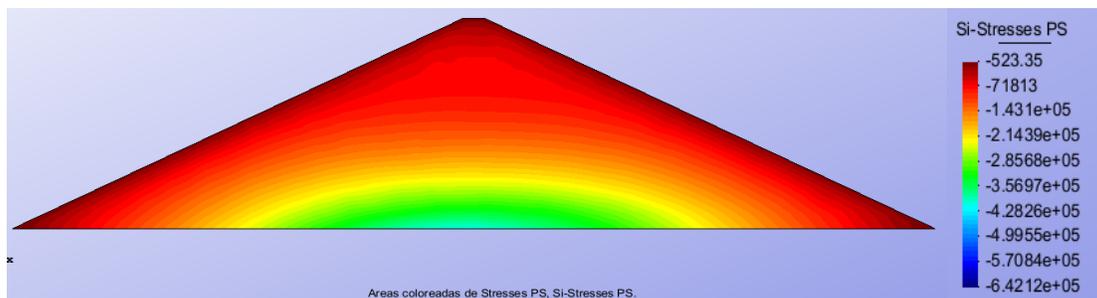


Figura 9. Tensiones principales Si (MPa) de la presa, solo carga de peso propio, y taludes 1:2.

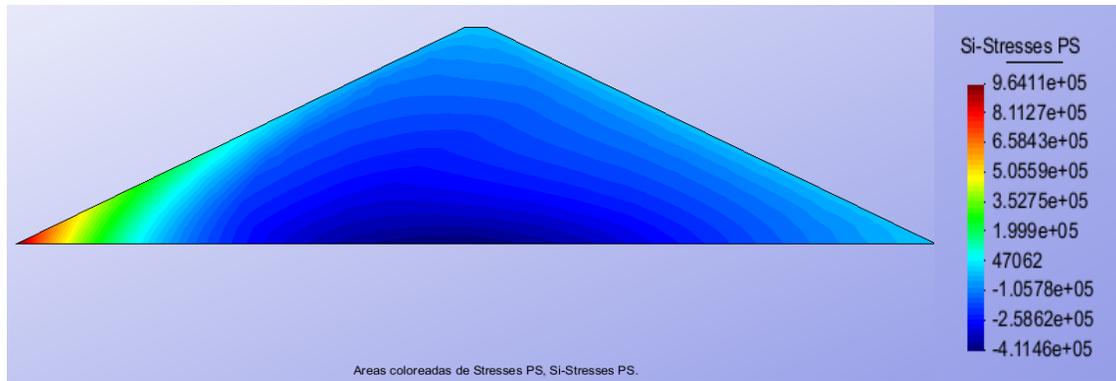


Figura 10. Tensiones principales S_i (MPa) de la presa con cargas hidrostáticas y taludes 1:2

Para el caso (a), en el cual se somete la presa, solo a su carga propia, se aprecia que no existen tracciones, toda la presa trabaja a compresión, por tanto la inclinación óptima para el dimensionamiento de la presa ante su carga propia, es de una relación V1:H2.

Por tanto para el caso (b), donde la presa se ve sometida a cargas hidrostáticas, más las de su propio peso y el peso del suelo, se aprecia que después de calcular la primera relación mínima de taludes 1:2, las tracciones máximas principales no sobrepasan el 1MPa, se realizó otra prueba tentativa para una relación de 1:2,5 en la cual sobrepaso el valor del esfuerzo de diseño, por tanto se llega a la conclusión que la relación de taludes más óptima para el dimensionamiento de la presa es V1:H2.

Estos resultados se ven ratificados en el diagrama de esfuerzos a compresión de la presa, en los cuales para el caso (a), presenta solo esfuerzos negativos de compresión, tal como lo muestran las Ilustraciones 25 y 26.



Figura 11. Tensiones principales S_{iii} (MPa) de la presa, solo carga peso propio, y taludes 1:2

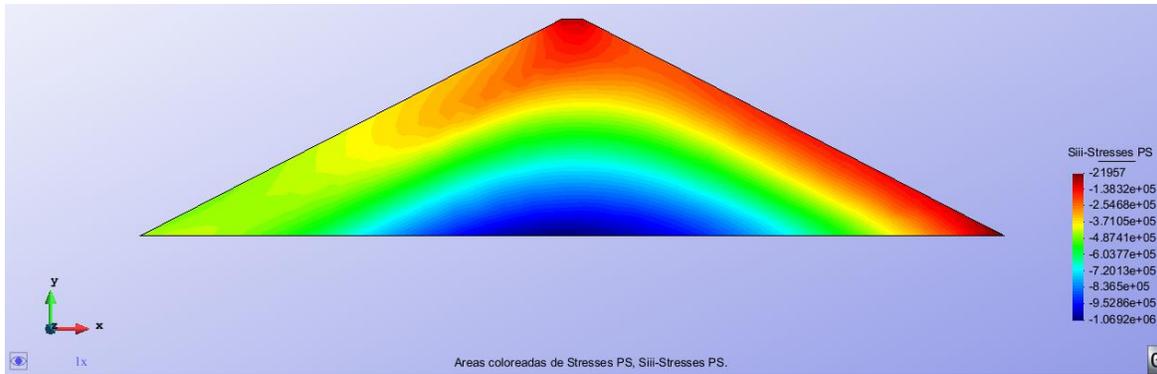


Figura 12. Tensiones principales S_{iii} (MPa) de la presa con cargas hidrostáticas, y taludes 1:2

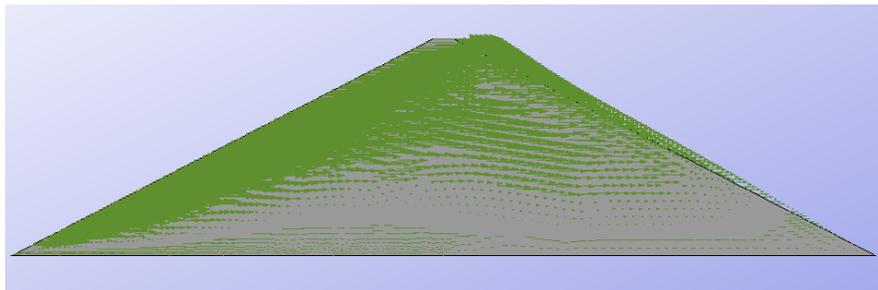


Figura 13. Diagrama de vectores de desplazamientos en la dirección X, con relación 1:2

12.1 Análisis Tridimensional:

Para comparar los resultados obtenidos en la modelación bidimensional, ahora se desarrolla la misma metodología, pero aplicadas a sólidos en 3D:

12.2 Geometría:

Se realiza la geometría de la presa dimensionada inicialmente, para esto creamos una nueva geometría en el programa “RamSeries”, utilizando las herramientas de dibujo, y haciendo cortes de superficies:

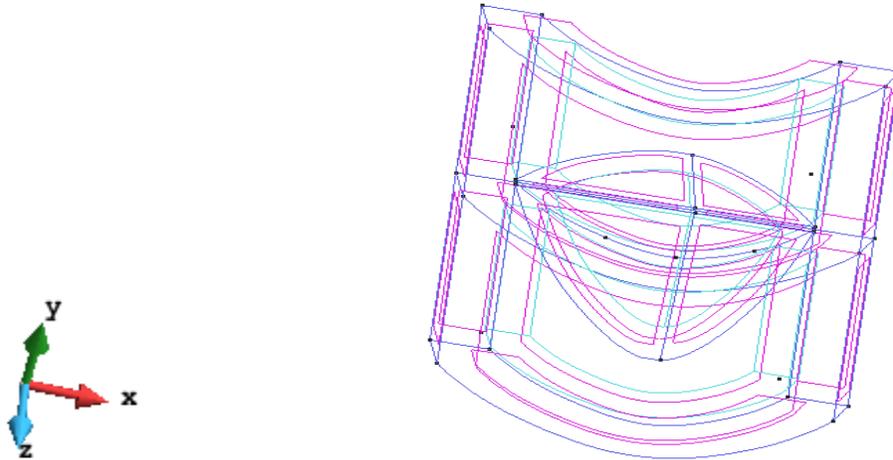


Figura 14. Geometría de la presa, modelo 3D

12.3 Condiciones de contorno:

Se asignan condiciones de contorno al modelo 3D, de la misma forma como se restringieron los desplazamientos en el modelo bidimensional, pero con la diferencia que en este caso se restringen los movimiento de la superficie de la base del suelo.

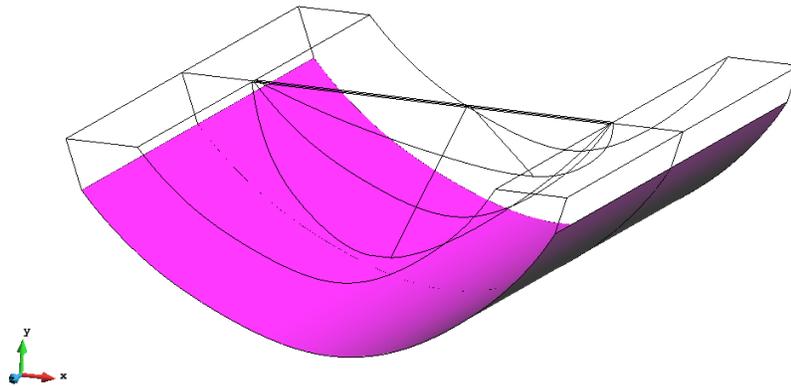


Figura 15. Condiciones de contorno solido 3D.

12.4 Cargas:

Se introducen las cargas al modelo, tanto las cargas por peso propio, como las presiones hidrostáticas, a la presa y al mismo suelo tal como en el modelo bidimensional:

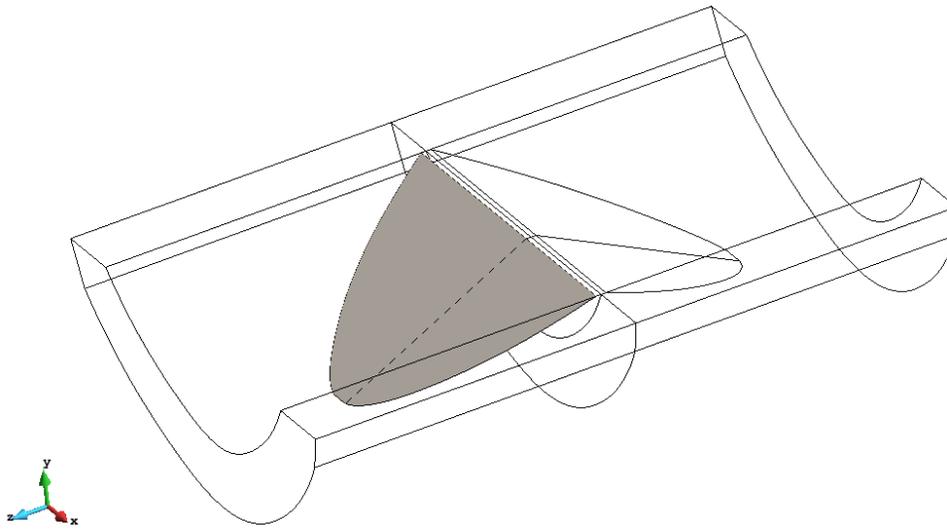


Figura 16. Asignación de cargas hidrostáticas a la presa.

12.5 Análisis de convergencia de modelo 3D:

De igual forma que los problemas anteriores, se hace necesario la escogencia de un tipo un tamaño de malla óptima para garantizar buenos resultados. Esto es debido a que en MEF no todos los tipos de malla generan resultados confiables, se busca con el análisis de convergencia la escogencia de una malla óptima donde se visualice la convergencia de los resultados de una manera rápida y homogénea.

Basta con realizar un análisis de convergencia a un punto aleatorio del modelo, el cual presente desplazamientos inducidos por las cargas actuantes, esto es debido a que los demás parámetros como esfuerzos y deformaciones dependen de la solución de la matriz global del sistema, específicamente del vector de desplazamientos, generando menos errores en la solución en los resultados.

Para este caso, se realiza un análisis de convergencia asignando varios tipos de mallas para el total del modelo, se obtienen los desplazamientos del punto P1 con coordenadas (0,60,0) ubicado en la parte superior de la presa y en la mita de la línea de la corona, este punto es el mismo al que se le realizó la convergencia en el modelo bidimensional.

En el análisis de convergencia se estudiaron tres tipologías de mallas no estructuradas (ver Ilustraciones 20, 21), con variación del tamaño de los elementos, el resultado del proceso se indican a continuación en la tabla 3:

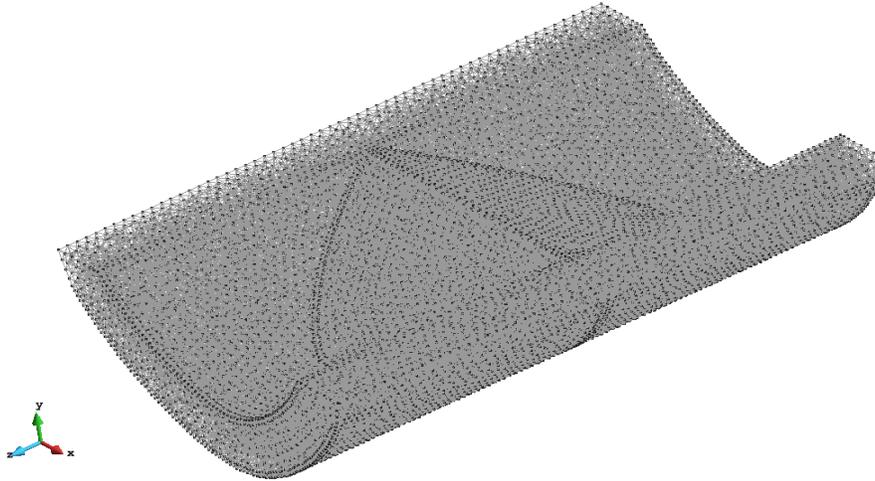


Figura 17. Malla de Tetrahedros lineal.

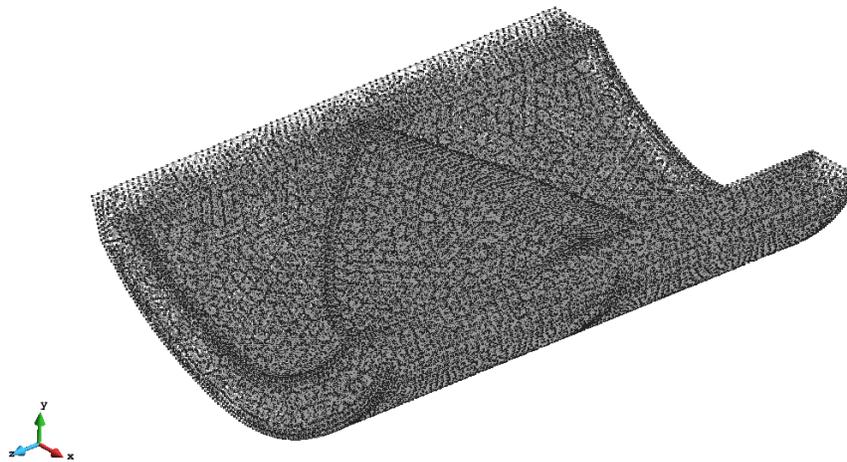


Figura 18. Malla de Tetrahedros cuadrático.

DESPLAZAMIENTO P1 VS NUMERO DE NODOS					
	10m	9m	8m	7m	6m
	ΔZ_a (m) / #Nodos				
Tetrahedros Lineal	-1.1673	-1.1693	-1.1694	-1.1688	-1.1687
	13208	17379	23957	34438	53119
Tetrahedros Cuadrat	-1.1967	-1.1965	N/C	N/C	N/C
	93154	124164	173027	N/C	N/C

Figura 19. Tabla de análisis de convergencia, Elemento solido 3D.

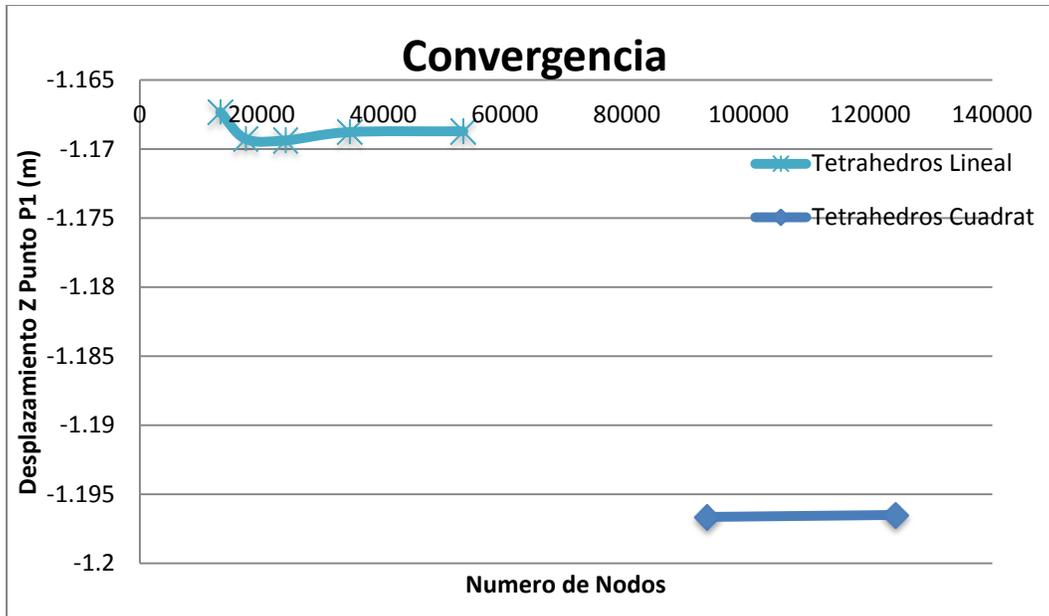


Figura 20. Gráfico de convergencia de los desplazamientos y nodos

En el análisis de convergencia se logra evidencia el buen comportamiento del mallados con tetraedros, además los elementos cuadráticos, solo permitió ser usados para un tamaño de malla inferior a 18, por la gran demanda de procesador que hace que el la maquina trabaje al casi 100%.

De igual forma se aprecia que los desplazamientos que se registran son muy superiores a los obtenidos por la metodología bidimensional, la malla de Tetrahedros lineales converge 1.167m, esto es un desplazamiento considerable.

Por lo anterior el mallado a ser utilizado en el dimensionamiento cheque de los esfuerzos será el de Tetrahedros Lineal, con un tamaño de malla de 6m.

12.6 Esfuerzos en elemento de presa:

Después del análisis de convergencia, se procede a determinar los esfuerzos en la presa producto de las fuerzas hidrostáticas.

	Esfuerzos principales Presa cargada caso a	Esfuerzos principales Presa cargada caso b
Valores para m y n	Tensión Si (MPa)	Tensión Si (MPa)
2	810	5170

Figura 21. Tabla Esfuerzos principales referente al modelo 3D.

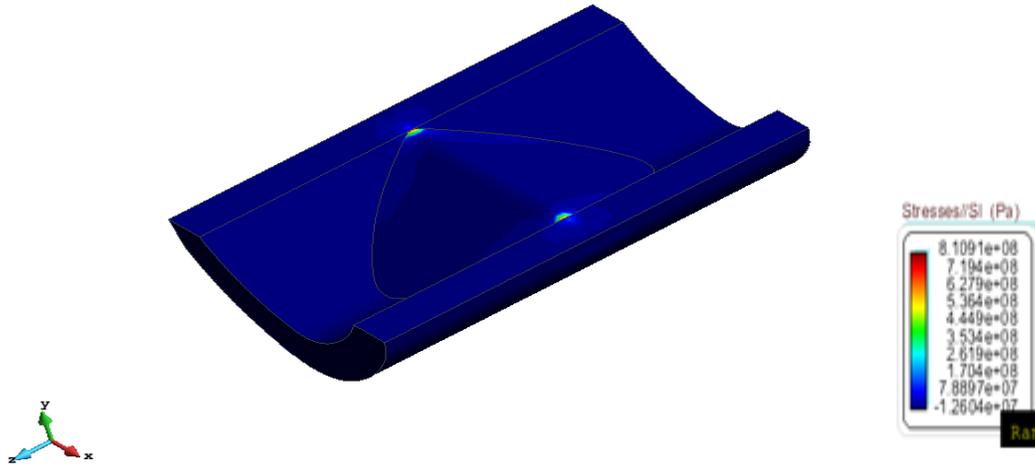


Figura 22. Tensiones principales S_i (MPa) de la presa solo con carga de peso propio, y taludes 1:2

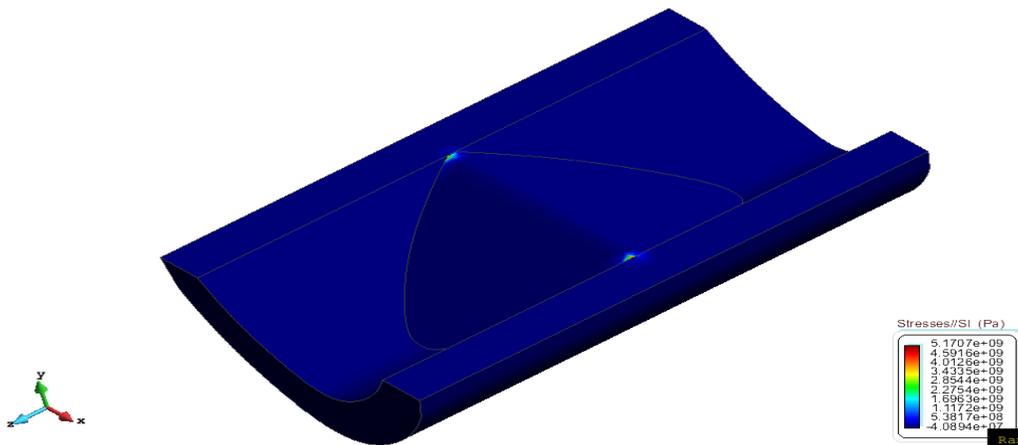


Figura 23. Tensiones principales S_i (MPa) de la presa caso (b) con cargas hidrostáticas, y taludes 1:2

En las tensiones principales a tracción (S_i) se aprecian valores súper elevados, esto se atribuye a algunos de los errores que plantea la teoría MEF, los cuales pueden ser por una mala discretización, o errores de cálculo en la manipulación del software.

Como se aprecia en la ilustración 33 y 34, las tensiones principales se acumulan en la corona de la presa, donde se producen los mayores desplazamientos, esto puede ser por la configuración de la geometría establecida en el problema, esto no puede ser detectado por el problema bidimensional debido a que asume la deformación 0 en la dirección prismática.

Otra posible causa del elevado valor de las tensiones, puede ser errores de cómputo, ya que el proceso que demora para calcular gran cantidad de puntos, permite la generación de errores en el cálculo interno.

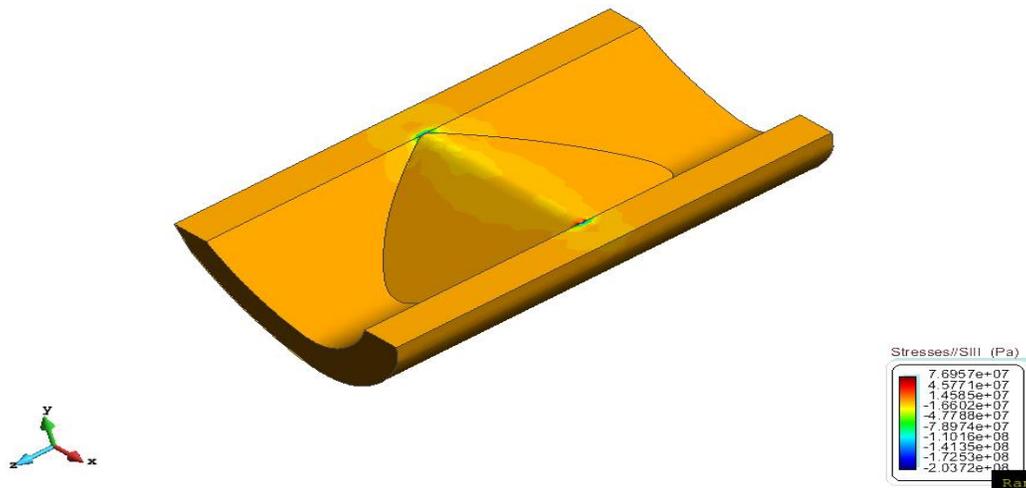


Figura 24. Tensiones principales Siii (MPa) de la presa, solo con cargas de peso propio, y taludes 1:2

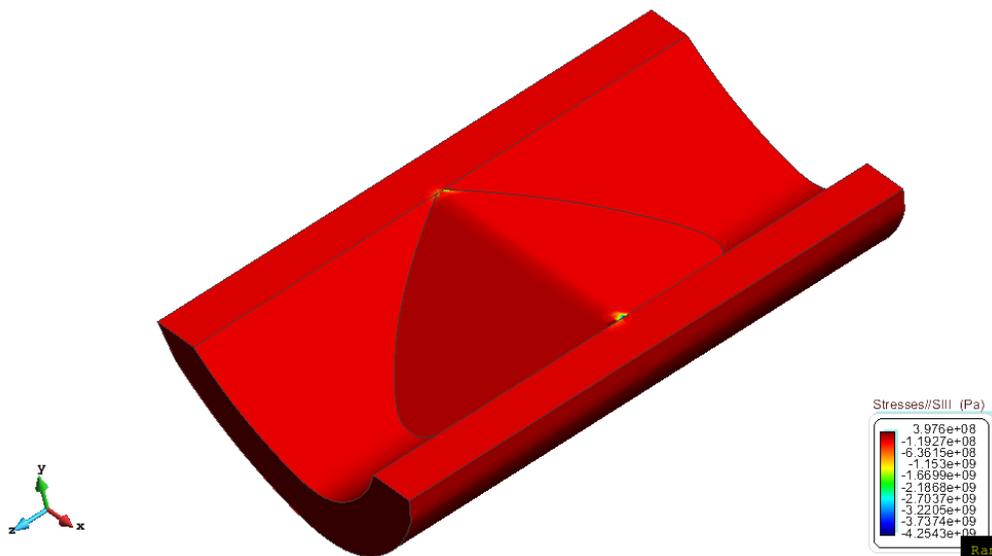


Figura 25. Tensiones principales Siii (MPa) de la presa caso (b) con cargas hidrostáticas, y taludes 1:2

13. Conclusión

Puedo decir que de los métodos analizados, la relación de talud óptima para el control de los esfuerzos en la presa, es la relación V1:H2, el método de análisis bidimensional, es un poco más preciso y ligero a la hora de hacer cálculos de presas de gran envergadura. Se debe usar un ordenador con buenas capacidades de rendimiento para realizar los cálculos resueltos con metodología MEF.