

PROBLEMA L52

Máster en Ingeniería de Caminos Canales y Puertos
Ingeniería de Estructuras

CURSO 2015-2016



JOEL PLANA PUJOL

Contenido

1- MEMÓRIA	2
1.1 Introducción	2
1.2 Datos y Geometría del Problema	2
1.3 Modelado y Teoría	3
1.4 Análisis de Convergencia	5
1.5 Modelización y Análisis Tensional.....	8
1.5.1 Coeficiente de Seguridad	9
1.5.2 Análisis Tensional	11
1.6 Conclusiones:	16

1- MEMÒRIA

1.1 Introducció

El principal objetivo de esta práctica es aprender a trabajar con un programa de cálculo de estructuras mediante el Método de los Elementos Finitos. El programa que vamos a utilizar en este caso será la versión profesional del Tdyn con el módulo de cálculo RamSeries para aplicación específica en estructuras. El programa incluye también el software de pre y pos proceso denominado GID. Todos ellos desarrollados por el CIMNE.

El problema planteado se basa en la determinación del coeficiente de seguridad de un tanque de almacenamiento de gas fabricado a partir de paredes de acero. En primer lugar, haremos un análisis de los datos y la geometría del problema planteado. Seguidamente, se hará un análisis teórico de la situación y se contará el proceso de modelado del problema. En tercer lugar se va a realizar un análisis de convergencia de la flecha máxima en la dirección vertical. Finalmente, se determinará el coeficiente de seguridad de la estructura y se analizarán los valores de tensiones obtenidos.

1.2 Datos y Geometría del Problema

El tanque de acero para almacenamiento de gas se ve representado a través de su sección meridional¹ en la Figura 1:

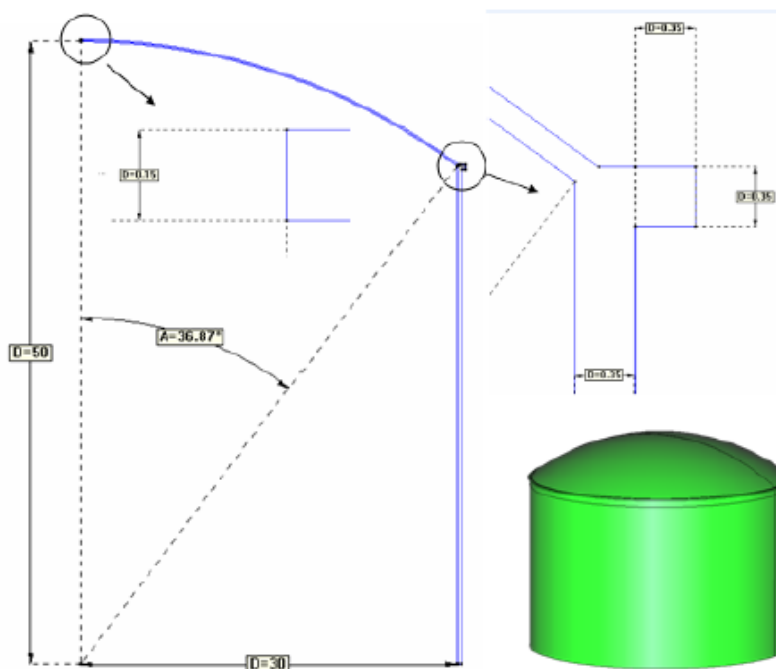


Figura 1 Sección meridional Tanque Acero

¹ Cotas en metros

Se pide calcular el estado tensional y el coeficiente de seguridad que tiene el tanque bajo una presión interna de 1T/m^2 sin consideración del peso propio. El material será un acero normal, de módulo de elasticidad $E=210000\text{MPa}$, Coeficiente de Poisson $\nu=0.3$ y peso específico de 78500 N/m^3 . Finalmente, se asumirá la base del mismo como empotrada en el suelo.

La tensión de Von Mises máxima en cualquier punto no puede superar los 500MPa , siendo nuestra referencia para el cálculo del coeficiente de seguridad.

1.3 Modelado y Teoría

Para el modelado de la estructura, diversas opciones serían posibles de ser utilizadas. Notamos que estamos frente a un problema de láminas de revolución. Tenemos un tanque con simetría de revolución en su geometría y en las cargas aplicadas sobre él. Esto quiere decir que el problema podría ser tratado mediante elementos de lámina de revolución. Elementos unidimensionales troncocónicos donde únicamente es necesario estudiar la línea generatriz constitutiva del sólido. No obstante, nada impide realizar un análisis tridimensional de la lámina con elementos de sólido, de lámina plana o de lámina curva. Dadas las características que nos proporciona el software profesional de GID y RamSeries, optaremos para utilizar un modelo tridimensional del sólido mediante elementos de lámina planos.

Aunque se podría trabajar con un cuarto de sección del depósito, o con una mitad de él, en el ejercicio se optó por representarlo en su totalidad por dos motivos:

- 1- En la práctica 4 de clase ya se había realizado un ejercicio similar con las condiciones de simetría de revolución analizando únicamente 90° de lámina.
- 2- En el enunciado del ejercicio se veía representado el depósito en su totalidad y se creyó que era lo que se quería.

Lo que si se hizo, aunque no será mostrado en la práctica porque es redundante, fue comprobar que los resultados mediante la representación de $\frac{1}{4}$ parte con los de su geometría completa coincidían, para estar seguros de que se había trabajado correctamente.

Debido a las características del material (acero isótropo) y a las simplificaciones del problema, vamos a realizar un análisis asumiendo que tendremos un material perfectamente elástico lineal. Además, las características del problema permiten definir una geometría y condiciones de contorno también lineales.

Los elementos finitos utilizados para el mallado serán los triángulos de tres nodos planos denominados DKT. Son elementos de clase C_0 , lo que significa que estaremos utilizando las hipótesis de no ortogonalidad de la normal con respecto a la generatriz de la lámina (hipótesis de Reissner-Mindlin). Debido a esta hipótesis, notemos que el programa de cálculo llevará incorporada la integración reducida de las matrices de rigidez de membrana y cortante resultantes del sistema de ecuaciones en cada uno de los nodos final a resolver. Alternativamente, ocurriría una rigidización excesiva de la estructura debido a la formulación desarrollada por el FEM que, en casos como este, donde estamos con

unas relaciones espesor/canto muy y muy pequeñas, proporcionarían resultados totalmente erróneos.

El primer paso para construir la geometría fue crear la línea generatriz. Posteriormente, se realizó una revolución de 360° alrededor de la misma a partir de su eje de simetría de revolución. Al mismo tiempo, se crearon las tres superficies referentes a la cúpula, pared y ménsula del depósito.

Seguidamente, se aplicaron las condiciones de contorno siguientes:

Base: Empotrada (no giros no desplazamientos) en la base circular.

En tercer lugar, se definieron las propiedades del material y se asignaron los distintos espesores a las distintas superficies distinguiendo cúpula, paredes y ménsula.

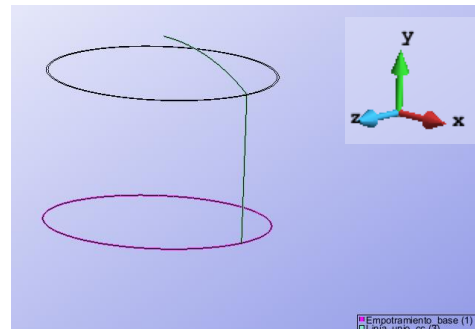


Figura 2 Condiciones de Contorno

Para terminar se aplicó una carga de presión de 10000 N/m² en la cúpula y paredes de acuerdo con la dirección normal exterior Z de los ejes de coordenadas locales del tanque, que se muestran en la Figura 3:

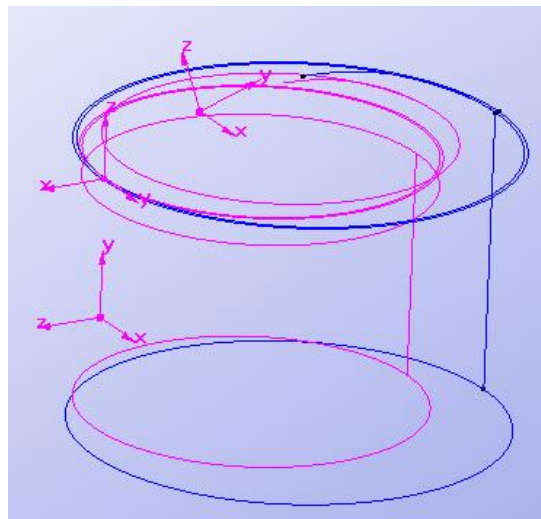


Figura 3 Ejes en coordenadas locales

Con ello, se procedió con el mallado por defecto incorporado por GID. Para el análisis de convergencia, se generaron las mallas representadas en la Tabla 1:

<i>Caso</i>	<i>Nodos</i>	<i>GDL</i>
<i>Caso 1</i>	206	1236
<i>Caso 2</i>	375	2250
<i>Caso 3</i>	694	4164
<i>Caso 4</i>	4084	24504
<i>Caso 5</i>	13934	83604
<i>Caso 6</i>	143625	861750

Tabla 1 Mallas creadas

A modo de ejemplo, en la Figura 4 se muestra representada una imagen de la malla más gruesa obtenida para el Caso 1:

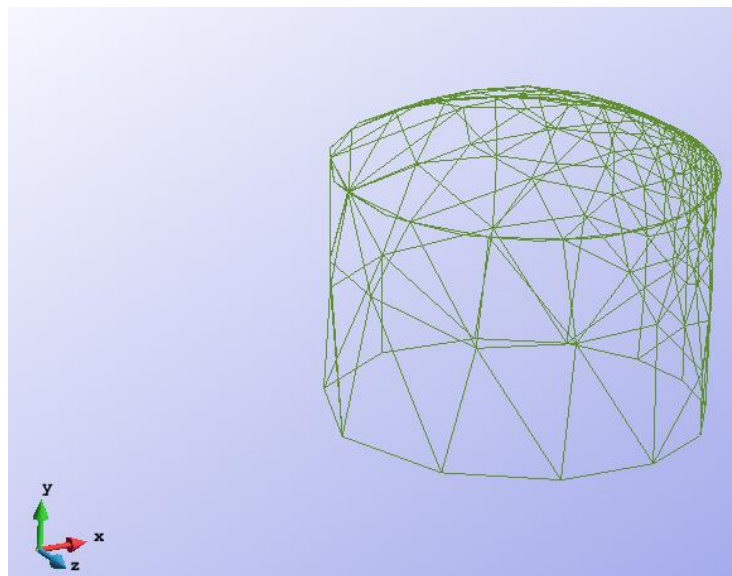


Figura 4 Malla depósito Caso 1

1.4 Análisis de Convergencia

Para realizar el análisis de convergencia se optó por hacerlo en el desplazamiento vertical del depósito. (i.e Eje Y). Se seleccionaron tres puntos como referencia donde estudiar la solución, que se muestran en la Figura 5:

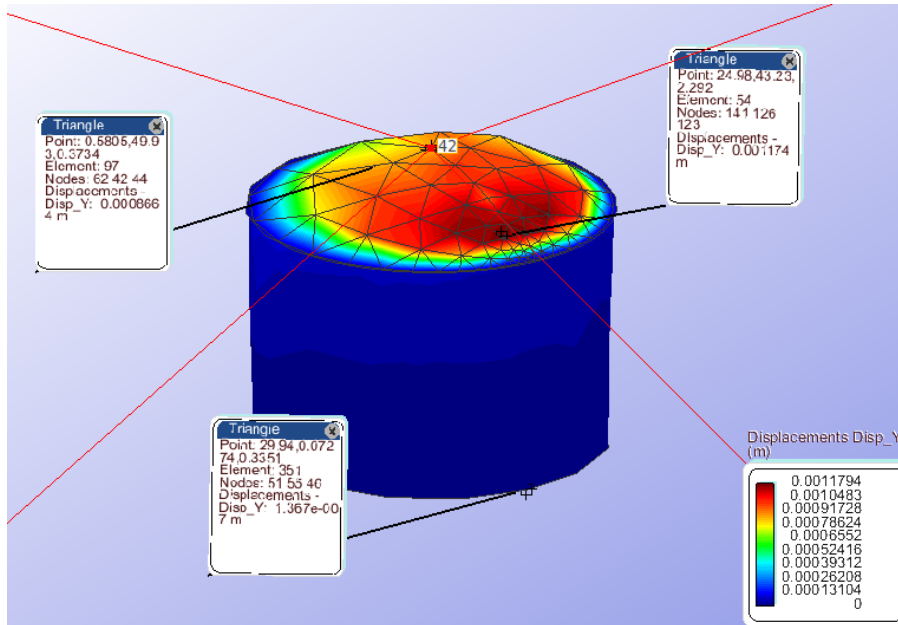


Figura 5 Puntos análisis convergencia en desplazamientos

Los puntos seleccionados corresponden a los nodos de desplazamiento máximo y mínimo más el más próximo al extremo superior de la cúpula encontrados con la malla creada para el caso 1. Las coordenadas de los puntos fueron utilizadas para localizarlos a medida que se fue reproduciendo el refinamiento de malla.

Los resultados obtenidos mediante esta malla fueron los que se utilizaron como referencia de valor vertedero absoluto respecto a la convergencia. De la misma forma, el análisis estructural de tensiones y la determinación del coeficiente de seguridad fueron obtenidos con la malla para el caso 6.

En las Figuras 6 y 7 se muestra la convergencia de los tres puntos anteriores con el valor en desplazamiento:

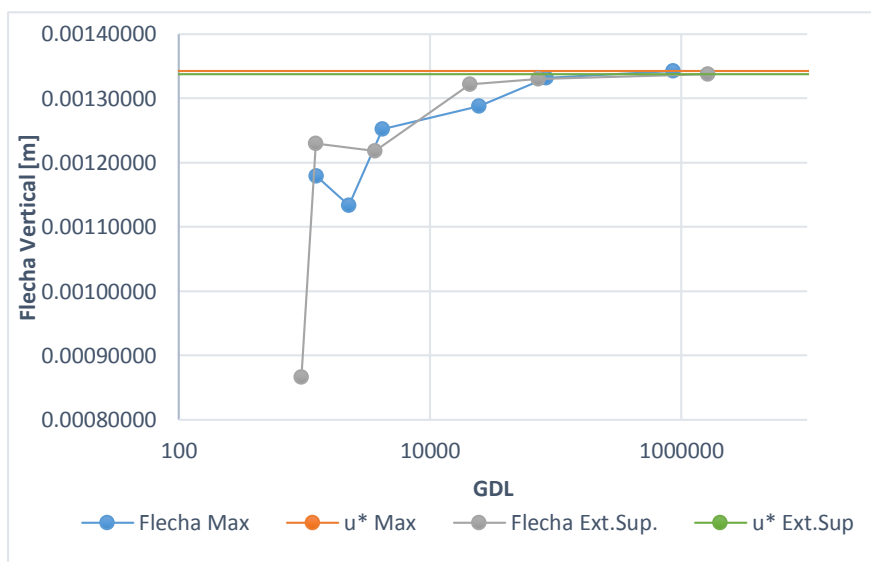


Figura 6 Convergencia en desplazamientos Flechas Cupula

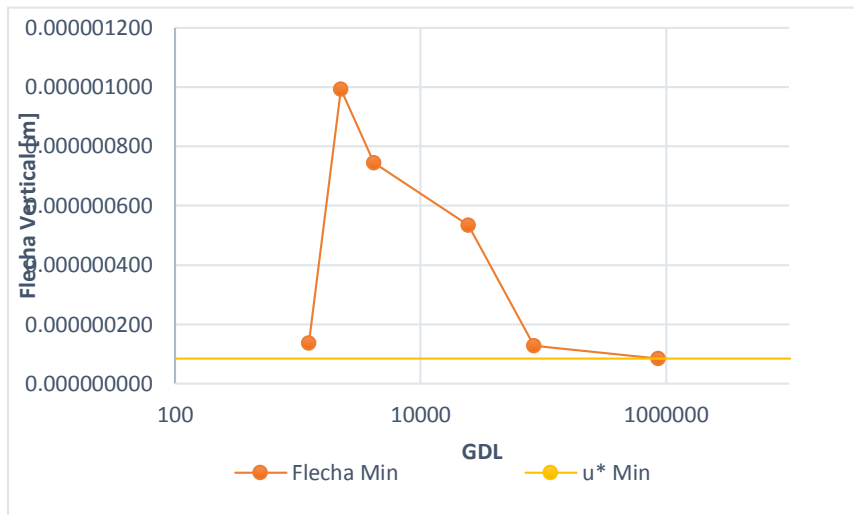


Figura 7 Convergencia desplazamiento Flechas Base de la Pared

Podemos apreciar como el comportamiento para los tres es distinto. En el caso de las flechas de la cúpula, se empieza con un valor de la misma inferior al finalmente obtenido. Vemos como la convergencia en ambos ocurre a una velocidad similar a excepción de la malla del caso 1, donde la flecha en el extremo superior se muestra claramente inferior a su valor real final.

En la figura 7, se puede apreciar cómo, cerca del suelo, en la pared, ocurre un fenómeno curioso. Para la primera malla, se produce un desplazamiento muy similar al real. No obstante, en la segunda se comete un gran error, que es luego reducido y hasta la malla del caso 5, con 14000 nodos, no se llega al valor próximo al real. Este hecho se puede explicar debido a que, en el caso inicial, los elementos son muy y muy grandes. En este caso, por su proximidad con el cero en el extremo empotrado, se le asignó un valor muy próximo a estos. Al refinar la malla un poco más, la no estructuración de la malla utilizada hizo que en esta zona no se tomase una buena distribución de nodos, con lo cual el desplazamiento se vio incrementado un orden de magnitud. Al llegar a mallas suficientemente finas, todo regresa a la normalidad.

El valor del desplazamiento máximo encontrado fue de 1.368 mm, muy y muy pequeños teniendo en cuenta las dimensiones del depósito a nivel global. Considerando el grosor de las paredes, y la baja carga aplicada (1/10 de atmosfera), es normal que prácticamente no haya desplazamientos. Hecho que hace pensar que el factor de seguridad que vamos a encontrar será muy grande.

Para poder hacernos una mejor idea de la velocidad de convergencia, se representó la precisión de aproximación en función del número de grados de libertad en la Figura 8:

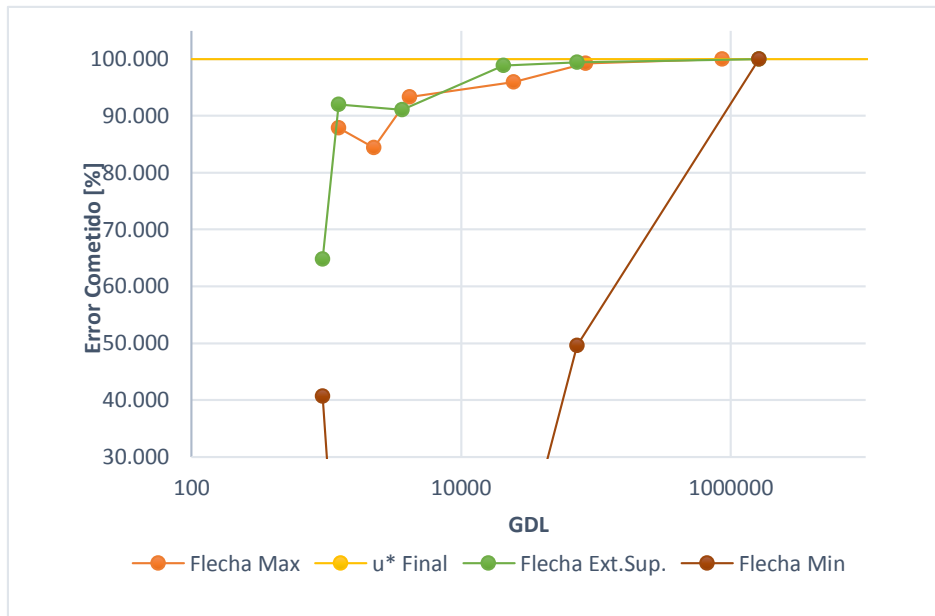


Figura 8 Error cometido [%]

En ella podemos observar como la flecha mínima es la que tiene una menor rapidez en converger a la solución, como era de esperar, llegando incluso a valores de errores relativos negativos.

Las otras dos, ambas flechas positivas, muestran un comportamiento muy similar a partir de la malla del caso 3, con un 90% de precisión. No es hasta el caso 4 que la precisión supera el 95%, y a partir de aquí, es necesario añadir muchos nodos para alcanzar precisiones del orden del 99% de la solución obtenida.

1.5 Modelización y Análisis Tensional

En este apartado determinaremos en primera instancia el coeficiente de seguridad del depósito tomando como referencia máxima una tensión de Von Mises de 500MPa. La tensión de Von Mises es una combinación de los esfuerzos principales y representa la energía máxima de distorsión dentro del elemento. Este estrés puede ser comparado con la tensión de fluencia a la tracción de los materiales dúctiles para propósitos de diseño. Los valores utilizados para calcular las tensiones son una combinación de los esfuerzos de flexión y tensiones de membrana, por lo que los resultados se enumeran para las superficies superior e inferior del elemento. El "Top" es la fibra extrema del elemento en la dirección z local positiva, y el "Bottom" es la fibra extrema del elemento en la dirección z local negativa. Este criterio es aplicable para materiales isótropos y dúctiles, con comportamiento elástico lineal, ideal para el acero.

En segunda instancia, vamos a realizar un análisis tensional del depósito con la carga aplicada originalmente.

1.5.1 Coeficiente de Seguridad

Para la determinación del coeficiente de seguridad, en primer lugar se analizaron las distribuciones de las tensiones de Von Mises en el depósito. Estas se ven representadas en las figuras 9 y 10.

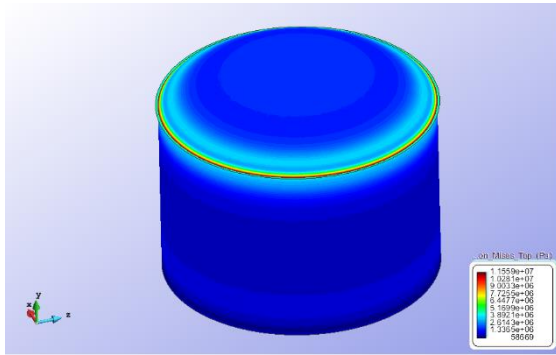


Figura 10 Tensión de Von Mises TOP carga referencia

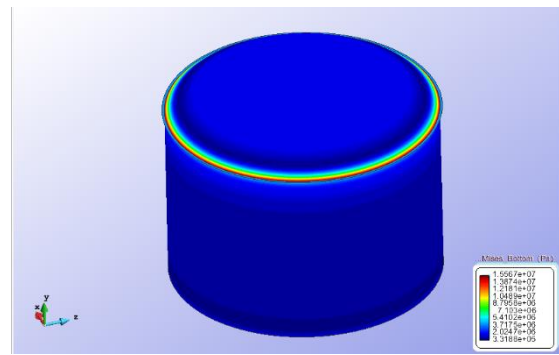


Figura 9 Tensión de Von Mises BOTTOM carga referencia

Podemos observar como gran parte de ellas son uniformes. Solamente en la zona cerca de la ménsula, de unión cúpula-pared es donde se encuentran los mayores valores.

La geometría de la ménsula es propensa a que se produzcan concentraciones de tensiones, por este motivo, antes de considerar los valores máximos como válidos, se realizó un estudio de convergencia de las tensiones de Von Mises máximas y mínimas por las mallas de los casos presentados con anterioridad. Los resultados se muestran en la Figura 11:

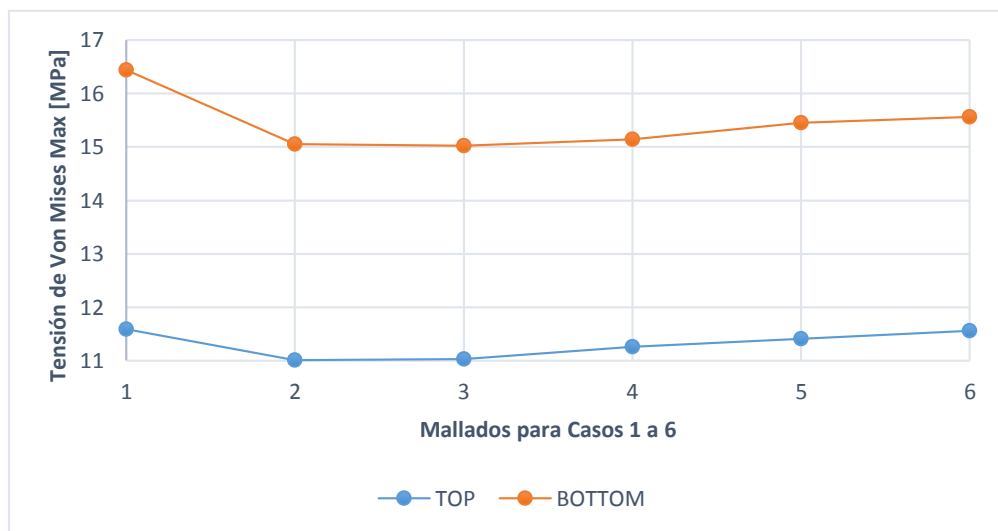


Figura 11 Convergencia Tensión de Von Mises

Se observa una cierta tendencia creciente con el refinamiento de malla para ambas. Esta tendencia es muy y muy pequeña, y de pendiente aproximadamente constante, lo que contradice lo que ocurre cuando se producen concentraciones de tensiones, en que el refinamiento de malla supone un incremento creciente exponencial con el aumento de los grados de libertad. Así pues, se asumió que estos valores eran correctos y se podía operar con ellos.

En la Tabla 2 se muestran los factores de amplificación de carga utilizados para la determinación del coeficiente de seguridad. Seguidamente, en la Figura 12 se hace la interpolación lineal de los resultados y se determina el valor de carga máxima soportado:

Factor de Seguridad			
<i>k</i>	Presión [Pa]	V.M TOP [Mpa]	V.M BOTTOM [MPa]
1	10000	11.559	15.567
10	100000	115.59	155.67
50	500000	577.95	778.35

Tabla 2 Parámetro K

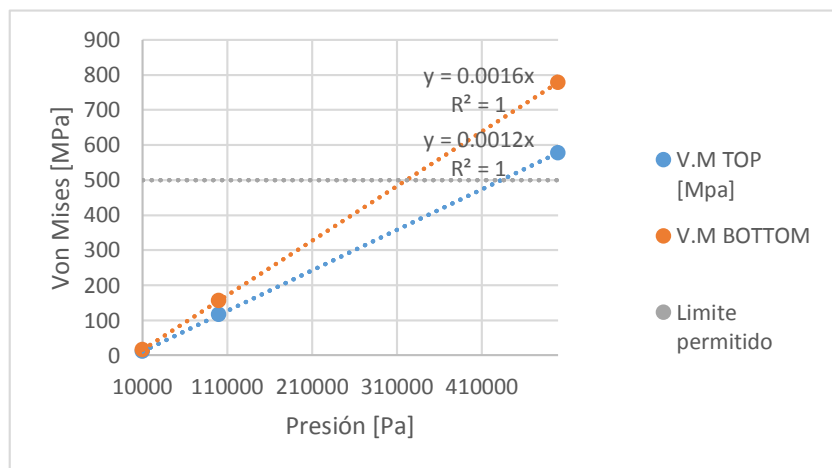


Figura 12 Interpolación lineal Von-Mises

Finalmente, en la Tabla 3 se muestra el factor de seguridad resultante, determinado a partir de la recta de la tensión de Von Mises Bottom, siendo esta la de mayor pendiente:

Presión Máxima [Pa]	Presión Aplicada [Pa]
312500	10000
Coeficiente de Seguridad	
31.25	

Tabla 3 Coeficiente de Seguridad

Para comprobar que realmente era lo que ocurría, se volvió a calcular la estructura con la presión máxima determinada. Los resultados obtenidos fueron de 487MPa, muy próximos al valor encontrado con la interpolación y quedando por el lado de la seguridad.

1.5.2 Análisis Tensional

1.5.2.1 Desplazamientos y deformada

En la Figura 13 tenemos representados los desplazamientos en X, Z y en módulo, pues no habían sido estudiados aun y ayudan a comprender la totalidad del problema.

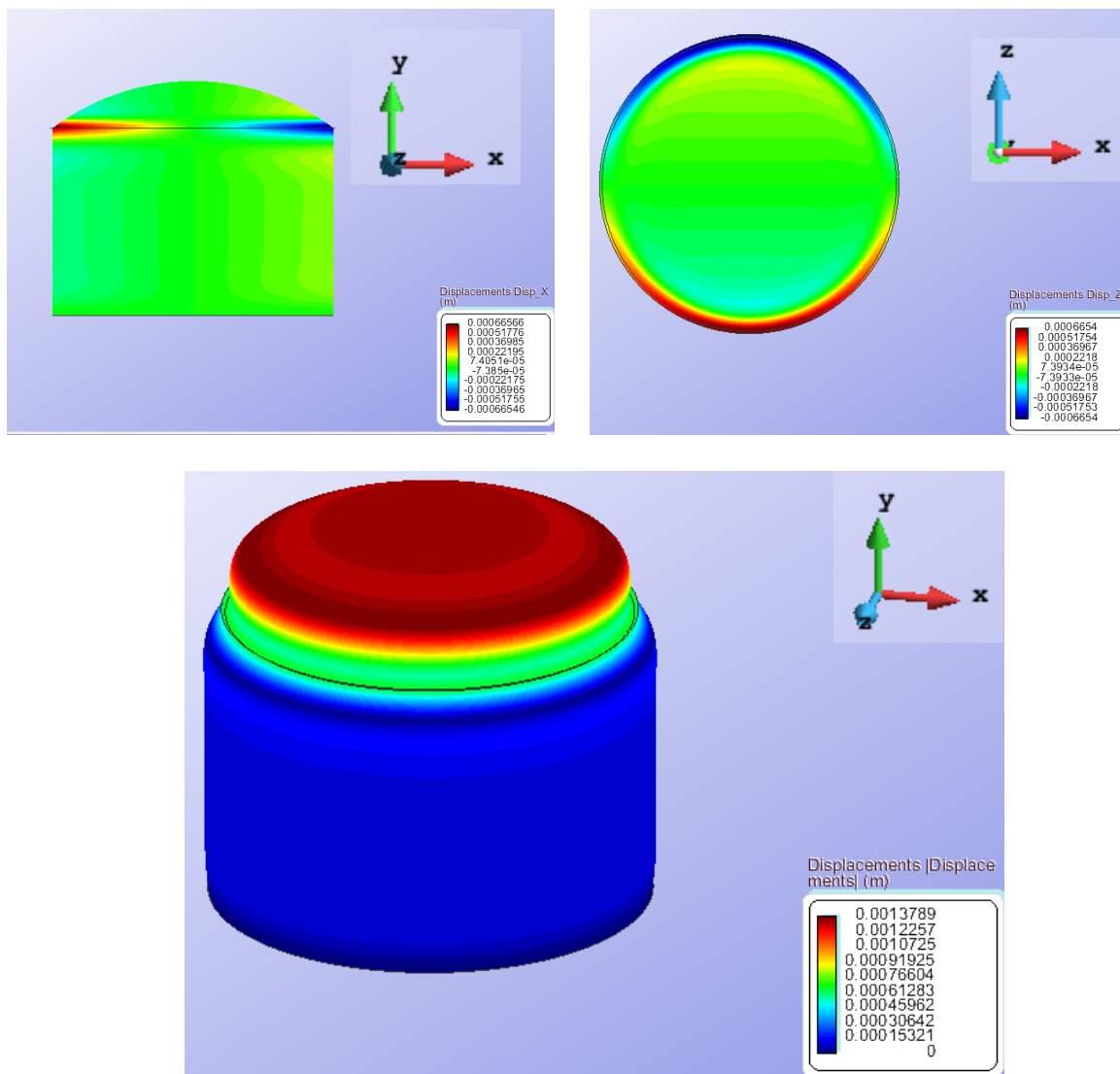


Figura 13 Desplazamientos y Deformada

En ella se puede apreciar como afecta la simetría de revolución en el problema. Los desplazamientos tanto en X como en Z són perfectamente simétricos respecto ambos ejes.

Observamos como el depósito tiene tendencia a expandirse a excepción de la zona de unión cúpula-pared, en donde se produce una contracción. En la deformada se aprecia mejor este fenómeno, que tiene lugar debido al efecto rigidizante que produce la ménsula en todo el perímetro circunferencial.

Respecto a los valores, como hemos visto ya con anterioridad, son todos muy y muy pequeños, sin superarse los 1.4mm en módulo en la parte superior de la cúpula.

1.5.2.2- Comprobación de concentraciones de tensiones

En la Figura 14 se encuentran representadas las distribuciones de tensiones principales en la fibra inferior e superior del tanque.

Se puede apreciar como la mayor parte de ellas se concentran cerca de la ménsula, parte más rígida, y con una geometría que presenta puntos angulares conflictivos.

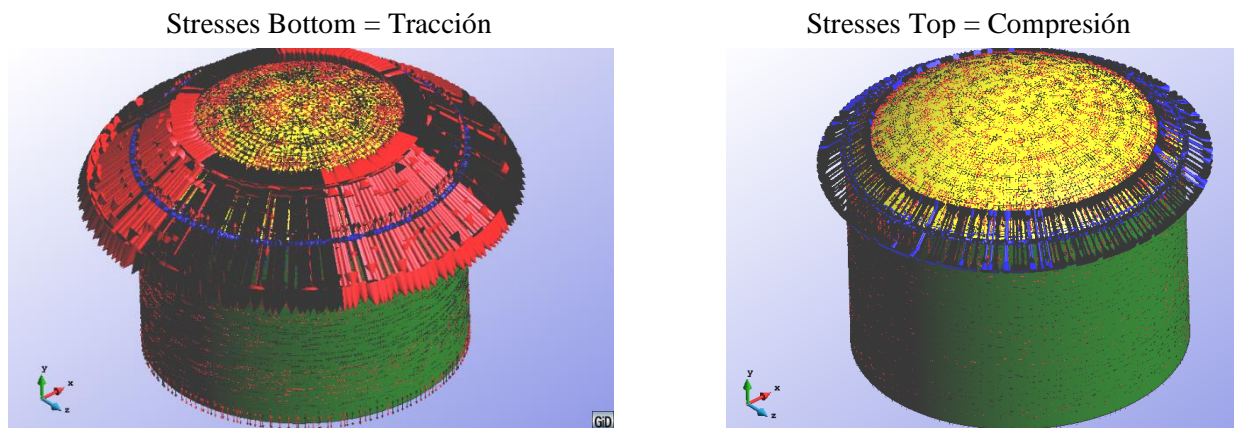


Figura 14 Tensiones Principales TOP and BOTTOM

Debido a esta observación, se decidió ver si se producían concentraciones de tensiones en algún lugar de la ménsula. Para tal fin, se seleccionó el esfuerzo cortante N_{xy} como ejemplo. Dos puntos fueron sometidos a refinamientos de malla consecutivos.

En la Figura 15 se ven los dos puntos seleccionados, y, en la Figura 16, la convergencia hacia los valores finales obtenidos.

De la Figura 16 se puede deducir que no se producen concentraciones de tensiones de las de tipo erróneas en el programa. Al igual que lo que sucedió con las tensiones de Von Mises, estas si sufren un pequeño incremento pero la tendencia al final se allana muchísimo y los valores de las tensiones no se van hacia infinito.

Con esta comprobación y la anterior, nos aseguramos de que los valores de tensiones máximas y mínimas mostrados por el programa son buenos y, por lo tanto, utilizables.

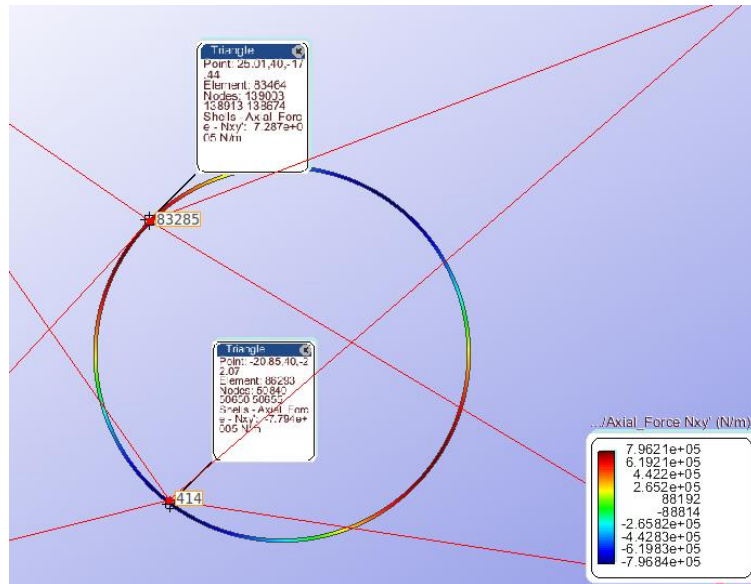


Figura 15 Puntos análisis convergència ménsula

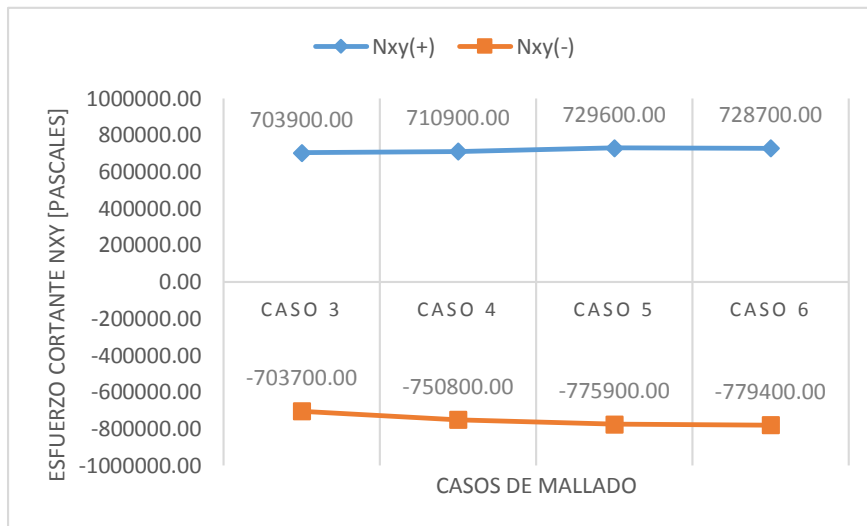


Figura 16 Convergencia Nxy Ménsula

1.5.2.3- Análisis de esfuerzos

Para poder interpretar los resultados, es necesario recordar que los esfuerzos y momentos aquí representados son de acuerdo con los ejes locales mostrados en la Figura 3.

Entonces, en la Figura 17 se muestran las distribuciones de esfuerzos axiales y el cortante Nxy:

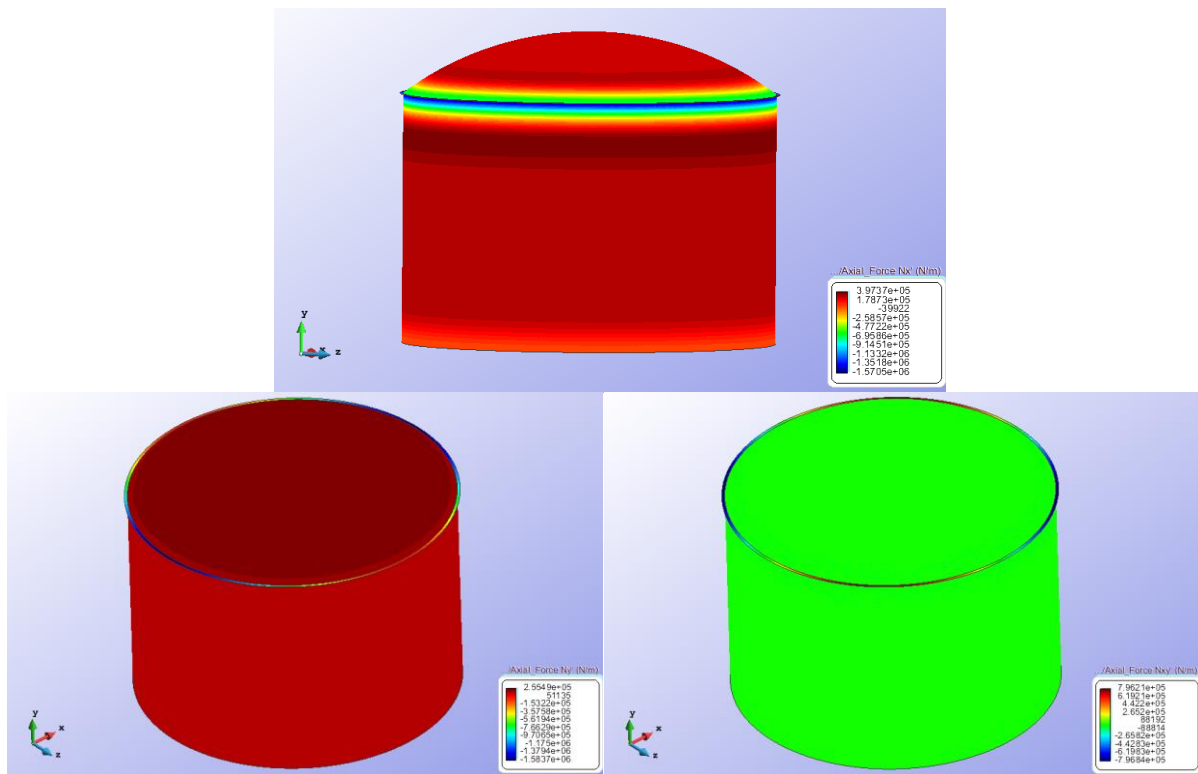


Figura 17 Esfuerzos Axiles

En las tres imágenes se puede apreciar una distribución eminentemente uniforme de todos ellos, a excepción de en la zona próxima a la ménsula donde se producen las mayores variaciones.

En el caso del axil en la dirección X, cerca de la ménsula observamos que se producen compresiones, que explican la tendencia a contraer el material.

En la dirección Y, observamos dos colores rojizos diferenciados. Uno más oscuro, que indica un esfuerzo mayor sobre la cúpula, y otro más claro, sobre las paredes. Como era de esperar, a medida que la normal exterior de la cúpula se inclina, la porción de esfuerzo en la dirección Y aumenta con la altura aunque, debido a la baja carga, lo hace poco y de forma muy suavizada e uniforme en toda ella.

En todas las direcciones de los esfuerzos, vemos como la ménsula sufre una serie de variaciones de tracción, compresión dependiendo de la zona del depósito donde se encuentra y de la dirección del esfuerzo considerado.

Respecto a los valores máximos y mínimos, estos son de 0.4MPa a tracción y -1.6MPa a compresión. Valores muy por debajo de lo que sería capaz de aguantar el acero, como hemos comprobado con el factor de seguridad encontrado.

En la Figura 18 se ven representados los momentos en X en Y y el momento torsor Mxy:

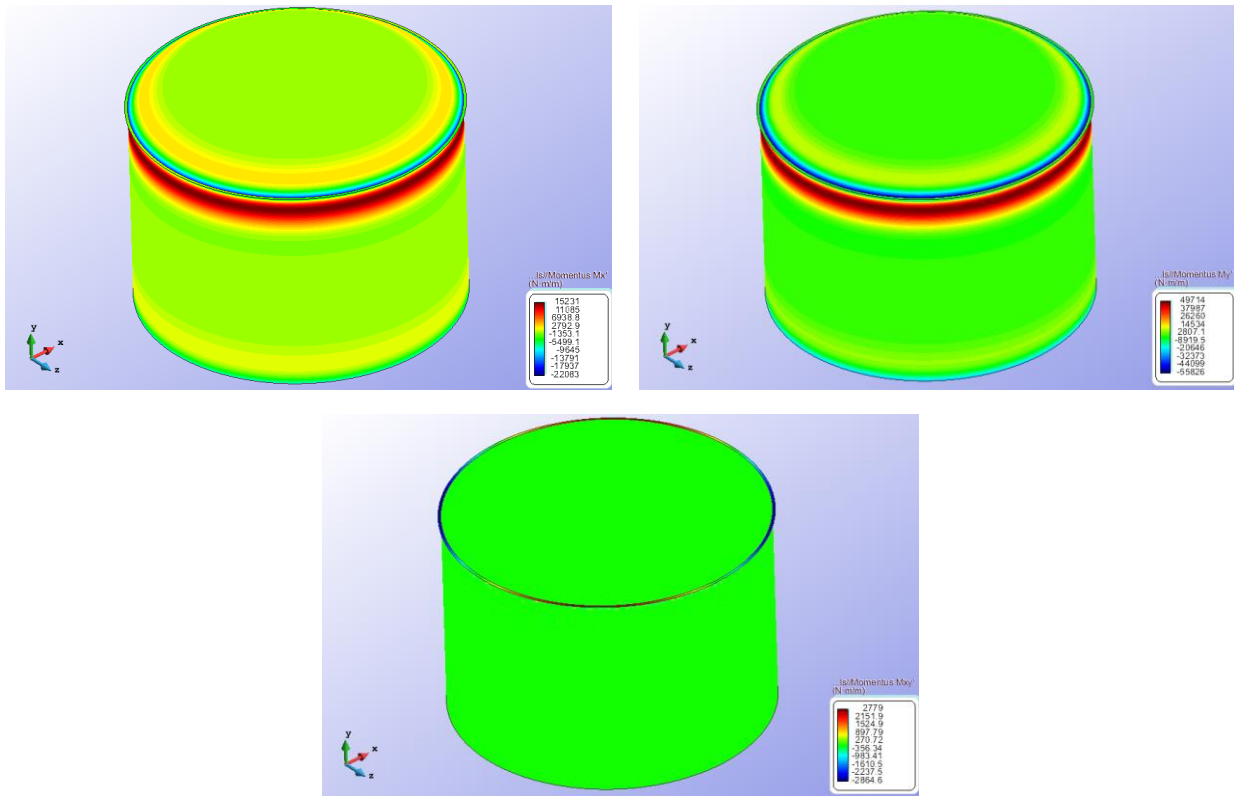


Figura 18 Distribución de Momentos

El caso es muy similar al anterior, pues es en la zona cerca de la ménsula donde se concentra la mayor parte de los momentos, debido a su mayor rigidez y al cambio abrupto de geometría y espesor del material que tiene lugar. En el resto, se mantiene una distribución uniforme de valores considerablemente inferiores.

Por ejemplo, en el caso del M_x , el valor máximo y mínimos representados son de $15.23\text{kN}\cdot\text{m}$ y $-22.1\text{kN}\cdot\text{m}$ respectivamente, mientras que en la mayor parte del depósito, paredes y cúpula, los valores están entre $2.5\text{kN}\cdot\text{m}$ y $-1.5\text{kN}\cdot\text{m}$.

Estas diferencias de un orden de magnitud hacen pensar seriamente en la posibilidad de reconsiderar el diseño del mismo, pues puede resultar muy poco económico utilizar tanto material en las paredes y cúpula si siempre la ménsula es el punto crítico. Es decir, más del 99% del material no va a agotar cuando se produzca el fallo. Por este motivo, sería recomendable disminuir el espesor de las paredes y la cúpula para que no hubiese tanta diferencia con las tensiones máximas encontradas en la ménsula.

Cabe notar el hecho de que estos valores son muy inferiores a los de los esfuerzos axiales. Considerando la geometría y distribución de presiones uniforme y en perpendicular a las paredes, es normal que no se produzcan grandes momentos, pues la mayor parte del depósito trabajará a axil y bajo cargas de tensión.

Para terminar, en la Figura 19 se muestran los esfuerzos cortantes:

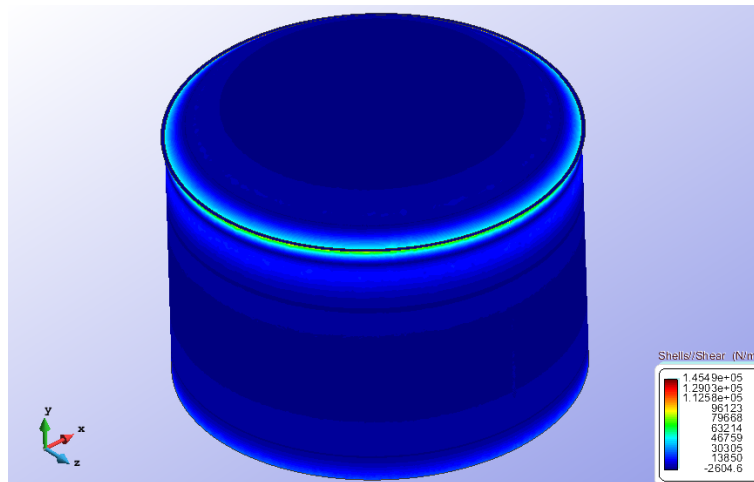


Figura 19 Esfuerzo Cortante

Similar a los otros casos, apreciamos distribución uniforme en el centro de las paredes y cúpula y pequeñas variaciones al acercarnos a la base o a la zona de la ménsula. Donde hay el mayor gradiente es en la ménsula, que se llega a valores positivos de 0.145MPa. Por otra parte, en el resto del depósito, encontramos valores entre -2500Pa y 5000Pa.

1.6 Conclusiones:

En esta práctica hemos analizado un tanque de gas a presión de acero mediante el MEF utilizando los elementos de lámina plana para un sólido de revolución.

En él hemos aplicado una presión interna de 1T/m^2 y no hemos considerado el peso propio de la estructura. Con estos inputs, se ha hecho un análisis de convergencia del desplazamiento vertical del depósito mediante refinamiento de malla. De él, se han obtenido unos valores irrisorios (1.4mm) comparados con las dimensiones totales de la estructura.

Por otra parte, se ha calculado el coeficiente de seguridad del depósito para una tensión de Von Mises máxima permitida de 500MPa. Este ha resultado ser de 31.25. Debido a los bajos desplazamientos encontrados, y considerando las dimensiones de espesor de las paredes, el valor no es de extrañar. Con lo cual, se podría concluir que el depósito se encuentra sobredimensionado. Aun así, hay que tener en cuenta dos factores. En primer lugar, dudo mucho que estos depósitos se diseñen para niveles de presión tan bajos (1/10 parte de atmósfera es muy baja presión). En segundo lugar, la consideración del peso propio habría tenido un peso muy importante en los resultados, teniendo en cuenta que se trata de acero, material muy y muy denso y deformable, y la altura del mismo es de 50 metros, en mi opinión, gigantesco. De hecho, se comprobó con el programa que ocurría al considerar el peso propio. Se observó como el depósito deformaba en gran medida y de forma muy rara, y el efecto de la presión era despreciable.

Para poder validar los resultados de tensiones y esfuerzos, se ha comprobado cómo no se producían concentraciones de tensiones erróneas cometidas por el MEF en la zona de la ménsula, claramente propensa a tenerlas debido a sus condiciones geométricas. Con esto, se han analizado los esfuerzos calculados. Se ha observado que el esfuerzo axial, es el mayor y dominante en el depósito debido a su geometría y distribución de cargas, dejando en segundo término los momentos y cortante resultantes.

Joel Plana Pujol
07263212L

Enginyeria d'Estructures



Escola de Camins
Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports
UPC BARCELONATECH