



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES  
CUAUTITLÁN**

**DISEÑO Y ANÁLISIS DE RECIPIENTES  
ESFERICOS PARA EL MANEJO DE  
CLORURO VINILICO DE ACUERDO CON  
EL CÓDIGO ASME,  
SECCIÓN VIII, DIVISIÓN 1.**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA**

**P R E S E N T A:  
JOSÉ DE JESÚS REYES NAVARRO**

**ASESOR: M. I. FELIPE DÍAZ DEL CASTILLO RODRÍGUEZ  
COASESOR: ING. CARLOS CORTES SALAS**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## AGRADECIMIENTOS

A mis padres y hermanos.

José. Trinidad Reyes Cuevas  
Antonia Navarro de Reyes

Gracias por su cariño, apoyo y confianza que depositaron en  
mí.

A los ingenieros del área de recipientes  
Del Instituto Mexicano del Petróleo  
Por su apoyo y las facilidades otorgadas.

Gracias al profesor  
Felipe Díaz del Castillo Rodríguez

Gracias al ingeniero  
Carlos Cortes Salas  
Quien hizo posible esté trabajo

## ÍNDICE

	<b>Pág.</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b>	1
<b>OBJETIVO</b>	3
<b>ALCANCE</b>	4

### **CAPITULO 1 GENERALIDADES**

1.1. Introducción.	6
1.2. Definiciones.	6
1.3. Clasificación de los recipientes a presión	8
1.3.1 Por su servicio	8
1.3.2 Por su forma	8
1.4. Ventajas del uso de recipientes esféricos	10
1.5. Construcción de esferas	12
1.6. Códigos de diseño	13
1.7. Código ASME	14
1.7.1 Historia del código ASME	14
1.7.2 Secciones del código ASME	15
1.8. Códigos auxiliares	17
1.9. Materiales	18
1.9.1 Especificación de materiales	18
1.9.2. Materiales usados de acuerdo al fluido almacenado	21

### **CAPITULO 2.**

#### **DISEÑO DE UNA ESFERA DE ALMACENAMIENTO DE CLORURO VINILICO.**

2.1 Introducción.	23
2.2. Esfera sometida a presión interna	25
2.2.1 Esfuerzos permisibles en recipientes a presión	25
2.3. Dimensionamiento de la esfera	27

2.3.1	Calculo de espesores.	33
2.3.2	Calculo de espesores por presión interior	34
2.3.3	Revisión por presión exterior	36
2.4.	Presión máxima permisible de trabajo	39
2.5.	Presión de prueba hidrostática	42

### **CAPITULO 3.**

#### **DISEÑO DE LOS SOPORTES DE LA ESFERA.**

3.1.	Carga vertical debida al peso de la esfera	45
3.2.	Carga vertical debida a sismo	46
3.3.	Carga horizontal de viento.	47
3.3.1	Clasificación de las estructuras según su importancia	49
3.3.2	Clasificación de las estructuras según su respuesta ante la acción del viento	49
3.3.3	Categorías de terrenos y clases de estructuras	50
3.3.4	Velocidad Regional $V_R$	52
3.3.5	Factor de Exposición $F_a$	52
3.3.6	Factor de Tamaño $F_c$	54
3.3.7	Factor de Rugosidad y Altura $F_{rz}$	54
3.3.8	Factor de Topografía Local $F_t$	55
3.3.9	Velocidad de Diseño	56
3.4.	Carga horizontal debida a sismo.	59
3.4.1	Clasificación de las construcciones según su destino	59
3.4.2	Clasificación de construcciones según su estructuración	60
3.4.3	Regionalización sísmica.	61
3.4.4.	Espectros para diseño sísmico.	61
3.4.5	Estructuras tipo 2: Péndulos Invertidos y Apéndices.	63
3.5.	Diseño de columnas	67
3.6.	Diseño de contraventeos	70

## **CAPITULO 4.**

### **ANÁLISIS DE LA ESFERA**

4.1	Modelado de la esfera dentro del programa ANSYS.	74
4.2	Análisis de la esfera con respecto al peso propio.	78
4.3	Análisis de la esfera por presión exterior.	81
4.4	Análisis de la esfera en condición de operación.	82
4.5	Análisis de la esfera dentro de la prueba hidrostática.	85
4.6	Análisis de la esfera aplicando las cargas de viento en operación	88
4.6.1	Viento en la dirección X.	89
4.6.2	Viento en la dirección XY.	90
4.6.3	Viento en la dirección Y.	91
4.7	Análisis de la esfera aplicando las cargas de sismo en operación	93
4.7.1	Sismo en la dirección X.	93
4.7.2	Sismo en la dirección Y.	94
4.7.3	Sismo en la dirección XY.	95
4.8	Análisis dinámico de la esfera	96
4.8.1	Modos de vibración de la esfera en condición de vacío.	96
4.8.2	Modos de vibración de la esfera en condición de operación	97
4.9	Comparación de resultados de los distintos análisis.	98
	<b>CONCLUSIONES</b>	<b>101</b>
	<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>103</b>

## INTRODUCCIÓN

Debido a la gran necesidad que se tiene dentro de la industria llámese petrolera, química entre otras, de almacenar distintas sustancias de gran importancia para el funcionamiento adecuado de la industria ya sea por que la sustancia que se tiene que almacenar tenga primordial importancia en los procesos de producción o sea de alta peligrosidad para las personas o el medio ambiente en el cual este situado.

Por estas razones y algunas otras se dieron a la tarea distintas sociedades de ingenieros de realizar normas, códigos y reglas para unificar el diseño y construcción de recipientes y de esta forma hacer mas eficiente y segura la construcción, funcionamiento bajo las distintas condiciones a las que estará sometido durante su vida útil.

Dentro de este trabajo se enfocara en los tanques de almacenamiento de forma esférica dentro de el cual se determinara de forma analítica con ayuda del código ASME sección VIII división 1, y se compararan los resultados con ayuda del método numérico llamado análisis por elemento finito utilizando el programa ANSYS.

Este trabajo se dividirá de la siguiente manera en el capitulo 1 se abordara lo relacionado con las generalidades como son tipos de recipientes, materiales utilizados para la construcción de los recipientes y la forma de seleccionarlos para un funcionamiento optimo dentro de las condiciones de funcionamiento.

Dentro de el capitulo 2 se hará el diseño de una esfera de almacenamiento de cloruro vinílico. Siguiendo las reglas que se encuentran dentro del código ASME Sección VIII División 1. Dentro de este capítulo solo se diseña la envolvente del recipiente a diferentes condiciones de funcionamiento como lo son: condición de operación (con el fluido a almacenar), condición de prueba hidrostática (con el recipiente lleno de agua, por presión exterior.

En el capítulo 3 se determinaran todas las cargas a las que estarán sometidas las columnas de la esfera para lo cual se hará uso de distintos manuales los que ayudaran a determinar de una manera mas correcta todas las cargas y esfuerzos a los cuales estarán trabajando durante su vida útil de las columnas y los contraventeos.

En el capítulo 4 en este capítulo se realizara un modelo de la esfera dentro del programa ANSYS y se le aplicaran todas las condiciones a las cuales se hará el análisis como los son condiciones de vacío, operación, y dentro de la prueba hidrostática, y también el análisis bajo condiciones de viento y sismo

En el capítulo 4 se darán las conclusiones obtenidas durante el desarrollo de este trabajo y también algunas recomendaciones que se consideren pertinentes para tratar de hacer mejor o más eficiente la realización de trabajos relacionados en el futuro.

## OBJETIVO

- El objetivo de este trabajo es el de diseñar un recipiente esférico de almacenamiento el cual estará sometido a diferentes condiciones de operación a lo largo de su vida útil
- El recipiente esférico tiene la función de almacenar grandes cantidades de gases, líquidos a una presión dada, por lo cual este trabajo se basará en las reglas que se encuentren dentro del código ASME sección VIII división 1 la cual se ocupa para el diseño y revisión de recipientes a presión.
- Cabe mencionar que dentro de esta sección del código ASME solo se utiliza para diseñar el envoltorio por lo cual se tendrá que hacer uso de otros manuales que también tendrán una gran importancia para el funcionamiento adecuado de el recipiente como los son el IMCA. Entre otros.
- Los resultados obtenidos utilizando este código ASME, se comparan con los proporcionados por el método de los elementos finitos (programa ANSYS)
- Se hará uso de todas las herramientas con las que cuenta el proyectista, con las cuales se pueda hacer un mejor diseño y tener mayor seguridad del funcionamiento de las partes diseñadas o propuestas para la construcción de la esfera.

## ALCANCE

Dentro de este trabajo se llevarán a cabo las actividades siguientes:

- a) Se realizara el diseño utilizando el código ASME (el cual será solo la envolvente de la esfera).

Para ello se tomarán en cuenta las consideraciones que se encuentran dentro del código ASME sección VIII división 1. Como lo son todas las condiciones de operación dentro de las que se encuentran, peso propio, presión exterior, con el fluido almacenado (en operación), durante la prueba hidrostática.

- b) Se realizara el diseño de los soportes de la esfera.

Para esto nos auxiliaremos de otros manuales para tener la seguridad y tranquilidad que el diseño de los soportes es el adecuado para soportar a la esfera durante las condiciones de operación.

- c) Se realizara un análisis con ayuda del programa ANSYS

Se modelará la esfera y se definirán todas condiciones que necesita el programa para que realice el análisis de la manera adecuada y se obtengan los resultados deseados y confiables.

- i. Análisis por peso propio (vacío)

Durante este análisis solo se someterá al modelo a la condición de vacío, se refiere solo al peso de la envolvente.

- ii. Análisis en condiciones de operación

En esta fase se hará el análisis considerado a la esfera con el peso propio más el peso del fluido almacenado y también considerando la presión interior que es producida por la temperatura y el fluido almacenado.

- iii. Análisis de prueba hidrostática

Dentro de este análisis se tiene que hacer una simulación el la cual la esfera deberá ser considerada como si estuviera en su totalidad llena de agua con lo que se debe de poner atención sobre la estructura debido a las condiciones.

- iv. Análisis sometido a viento.

Para este análisis de viento dentro del programa se realizó aplicándole presión a toda la envolvente en distintas direcciones y para eso se dividió la envolvente en distintas secciones para hacer mas precisa la aplicación de esas cargas.

Cabe mencionar que se realizó un análisis en distintas condiciones de operación como lo son, peso propio, en operación y prueba hidrostática.

v. Análisis de la esfera sometido a sismo.

Este análisis se presentara de dos formas de obtener los resultados deseados, el primero se hará con ayuda de la fuerza horizontal la cual se aplicara sobre el ecuador de la esfera en las distintas direcciones para eso se tendrá que obtener los nodos que se encuentran sobre la línea del ecuador y dividir la fuerza sobre el numero de nodos obtenidos y de esa forma hacer una distribución adecuada de la fuerza.

Dentro del la segunda forma nos apoyaremos del programa el cual puede obtener las frecuencia, los modos de vibración, el periodo y de esta forma darnos una idea cual será el modo mas crítico en el cual la estructura estará mas desprotegida.

# CAPITULO 1

## GENERALIDADES

### 1.1 INTRODUCCIÓN

Dentro de este capítulo se abordaran los principios básicos que se deben tener en cuenta para el desarrollo de este trabajo y facilitar su comprensión, para esto se comenzara con algunas definiciones que serán de utilidad para adentrarnos en el diseño, análisis y construcción de los recipientes esféricos; también se mencionaran los diferentes tipos de recipientes que existen, su clasificación, su aplicación dentro de la industria. Se hará referencia a el código ASME y algunos códigos auxiliares en los que estará basado este trabajo, los materiales que son avalados por el código ASME, y como se seleccionan.

### 1.2 DEFINICIONES

A continuación, se definen los conceptos más empleados en el presente trabajo, con la finalidad de facilitar su comprensión:

**BOQUILLA.-** Orificio practicado en un tanque para la entrada y/o salida de un fluido o la instalación de un instrumento de medición, generalmente son bridadas o roscadas.

**BRIDA.-** Accesorio para acoplamiento de tuberías, que facilita el armado y desarmado de las mismas.

**CARGA HIDROSTÁTICA.-** La presión ejercida por un líquido en reposo.

**CARGA MUERTA.-** La fuerza debida al peso propio de los elementos a considerar.

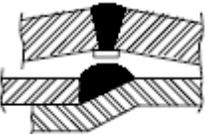
**CARGA VIVA.-** La fuerza ejercida por cuerpos externos, tales como: nieve, lluvia, viento, personas y/o objetos en tránsito, etc.

**CÓDIGO.-** Conjunto de mandatos dictados por una autoridad competente.

**CORROSIÓN.-** Desgaste no deseado, originado por la reacción química entre el fluido contenido y/o procesado y el material de construcción del equipo en contacto con el mismo.

**EFICIENCIA DE JUNTAS SOLDADAS.-** Factor por el que hay que multiplicar el valor del esfuerzo máximo permisible del material utilizado para obtener el esfuerzo permisible de trabajo depende del radiografiado como se muestra en la tabla 1.1.

**Tabla 1.1. Eficiencia de juntas soldadas**

Tipos de uniones  UW-12		Eficiencia de la unión cuando la junta esta radiografiada		
		AL 100%	POR PUNTOS	SIN
	Soldadura a tope unida con soldadura por ambos lados, o bien por otro método con lo cual se obtenga la misma calidad del material de aporte en ambos lados de la superficie soldada si se usa la solera de respaldo deberá quitarse después de aplicar la soldadura	1	.85	.7
	Soldadura simple a tope con solera de respaldo la cual permanecerá en el interior del recipiente.	0.90	0.80	0.65
	Unión simple sin solera de respaldo	-	-	0.60
	Unión traslapada con doble filete	-	-	0.55

**ESTÁNDAR.-** Sugerencias para la fabricación y diseño, originadas por la experiencia.

**NORMA.-** Conjunto de reglas para el diseño, análisis para la fabricación.

**PRESIÓN ATMOSFÉRICA.-** Es la producida por el peso del aire y su valor depende de la altura del sitio indicado sobre el nivel del mar.

**PRESIÓN DE DISEÑO.-** Es la presión manométrica considerada para efectuar los cálculos.

**PRESIÓN DE OPERACIÓN.-** Presión manométrica a la cual estará sometido el tanque en condiciones normales de trabajo.

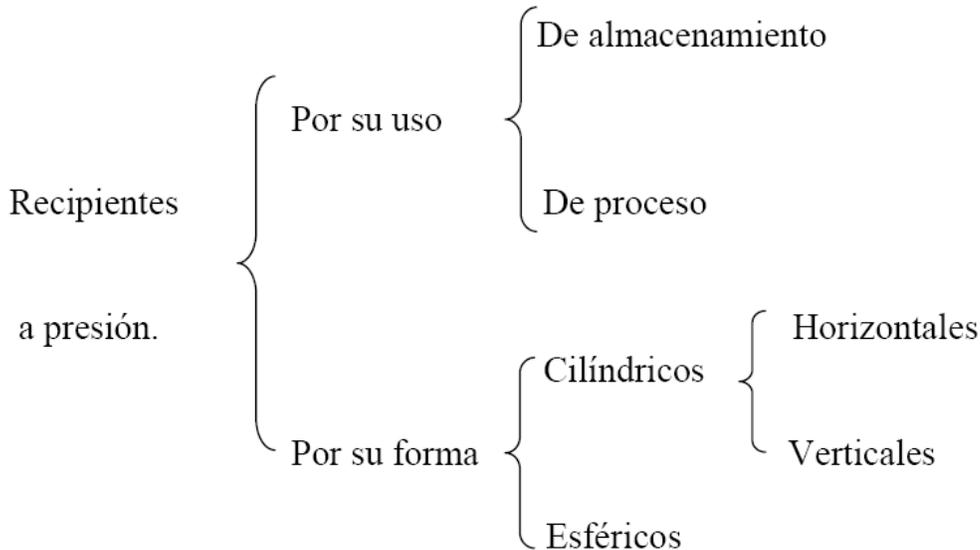
**PRESIÓN DE PRUEBA.-** Valor de la presión manométrica que sirve para realizar la prueba hidrostática o neumática.

**RECIPIENTE.-** Depósito cerrado que aloja un fluido a una presión manométrica diferente a la atmosférica, ya sea positiva o negativa.

**TANQUE.-** Depósito diseñado para almacenar o procesar fluidos, generalmente a presión atmosférica o presión internas relativamente bajas.

### 1.3 CLASIFICACIÓN DE LOS RECIPIENTES A PRESIÓN.

De manera general los recipientes se pueden clasificar tal y como se muestra a continuación:



#### 1.3.1. Por su servicio (uso).

Se dividen en: recipientes de proceso y recipientes de almacenamiento.

Los recipientes de almacenamiento se usan como depósitos para contener una reserva suficiente de algún producto para su uso posterior y/o comercialización.

Los recipientes de proceso se utilizan como intercambiadores de calor, reactores, torres fraccionadora, torres de destilación, entre otros.

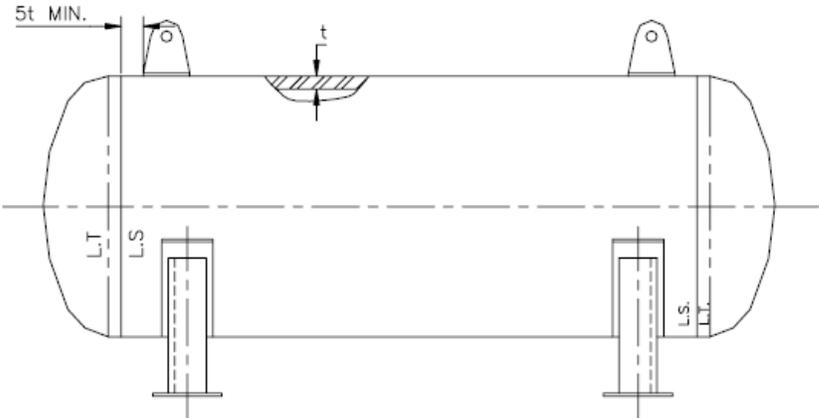
#### 1.3.2. Por su geometría (forma).

Se clasifican en; cilíndricos o esféricos. Los cilíndricos pueden ser horizontales o verticales, y pueden contar con o sin chaquetas para incrementar o decrecer la temperatura de los fluidos según sea el caso.

#### Recipientes horizontales.

Son aquellos recipientes montados en silletas en posición horizontal, figura 1.1, conocidos algunos comúnmente como salchichas, se utilizan como acumuladores ya

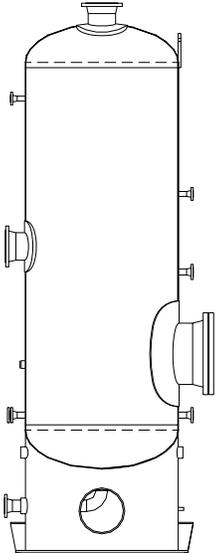
sea de flujo de vapor y/o sustancias que provengan de equipos especiales y también sirven para procesos(separadores rectificadores).



**Figura 1.1. Recipiente horizontal.**

**Recipientes verticales.**

Son aquellos recipientes montados en posición vertical, los más usados son los reactores, las torres, entre otros. Normalmente los recipientes verticales están soportados por medio de la patas de ángulo o columnas, faldones cónicos o rectos y por soportes integrados en el cuerpo del recipiente, figura 1.2.

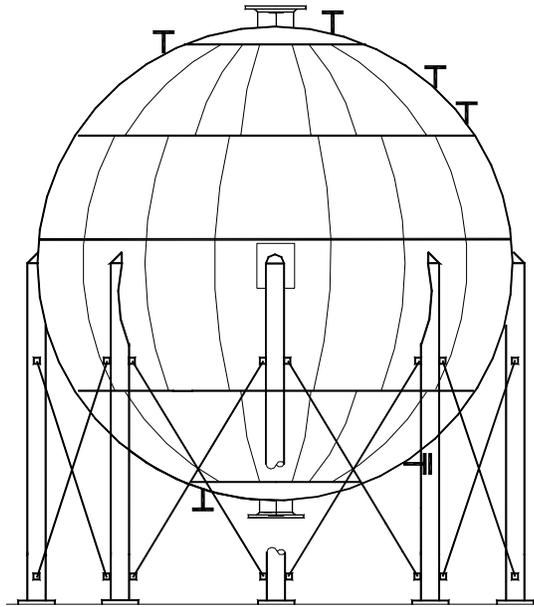


**Figura 1.2. Recipiente vertical.**

## Recipientes esféricos.

Se utilizan generalmente como tanques de almacenamiento, y se recomiendan para almacenar grandes volúmenes a presiones moderadas, mostrado en la figura 1.3.

Puesto que la forma esférica es la forma “natural” que toman los cuerpos al ser sometidos a presión interna, ésta sería la forma más económica para almacenar fluidos a presión, sin embargo, la fabricación de este tipo de recipientes es mucho más cara en comparación con los recipientes cilíndricos.



**Figura 1.3. Recipiente esférico.**

### 1.4. VENTAJAS DEL USO DE RECIPIENTES ESFÉRICOS

Normalmente los recipientes esféricos se usan para el almacenamiento de grandes volúmenes de fluidos bajo presiones moderadas, entre  $2.1 \text{ kg/cm}^2$  y  $17 \text{ kg/cm}^2$ , principalmente gases a temperaturas y presiones normales, tales como gas natural, butano, isobutileno, hidrogeno, amoniaco y muchos otros productos petroquímicos. Las compañías químicas de goma, pulpas y de papel han encontrado que las esferas a presión presentan grandes ventajas en el almacenamiento de líquidos tales como anhídridos de amonio, butadieno y ácidos volátiles.

El uso de esferas para almacenamiento de líquidos volátiles y gases tienen un gran número de ventajas prácticas, incluyendo el almacenamiento económico, partes fijas, pocas probabilidades de fuego, bajos costos de mantenimiento (debido a la accesibilidad), corrosión mínima (debido a que el oxígeno es raramente presente dentro) y flexibilidad (debido a que la eficiencia de la esfera es independientemente del nivel del contenido).

Una batería de tanques cilíndricos construidos en taller han sido usados para proveer el mismo volumen que una esfera, lo cual duplica el número de conexiones y accesorios, además tales arreglos ocupan más espacio que el requerido para una sola esfera.

Además el líquido almacenado en una esfera de gran capacidad cambia de temperatura más lentamente que en un recipiente pequeño. La presión de operación es función de la temperatura, así que la presión dentro de una esfera grande es menos probable que exceda el valor calibrado en la válvula de alivio durante periodos cortos en climas extremadamente calurosos, de esta manera una esfera grande, es por consiguiente la más eficiente en prevenir pérdidas de vapor que los recipientes que los recipientes pequeños diseñados para la misma presión.



**Figura. 1.4 Recipiente esférico**

## 1.5. CONSTRUCCIÓN DE ESFERAS

Las esferas son construidas por placas de acero que han sido formadas y cortadas en tamaños adecuados y sus extremos preparados para la aplicación de soldadura. Las conexiones principales, tales como boquillas y accesorios, son generalmente soldadas a las placas del envoltente durante la fabricación. En el taller y estas placas son relevadas de esfuerzos antes de ser enviadas.

Debido a sus dimensiones, las esferas son montadas en campo, la soldadura es aplicada en cada una de las juntas de la envoltente y deberá ser de penetración.

Las esferas para el almacenamiento de líquidos o gases, son soportados por columnas cilíndricas soldadas a la envoltente en la zona del ecuador. La sección superior de cada columna puede descansar sobre una columna de concreto o toda la longitud de la columna puede ser de acero. Varillas y tensores son utilizados para llevar las cargas de viento o sismo a la cimentación.



**Figura. 1.5 Recipiente esférico**

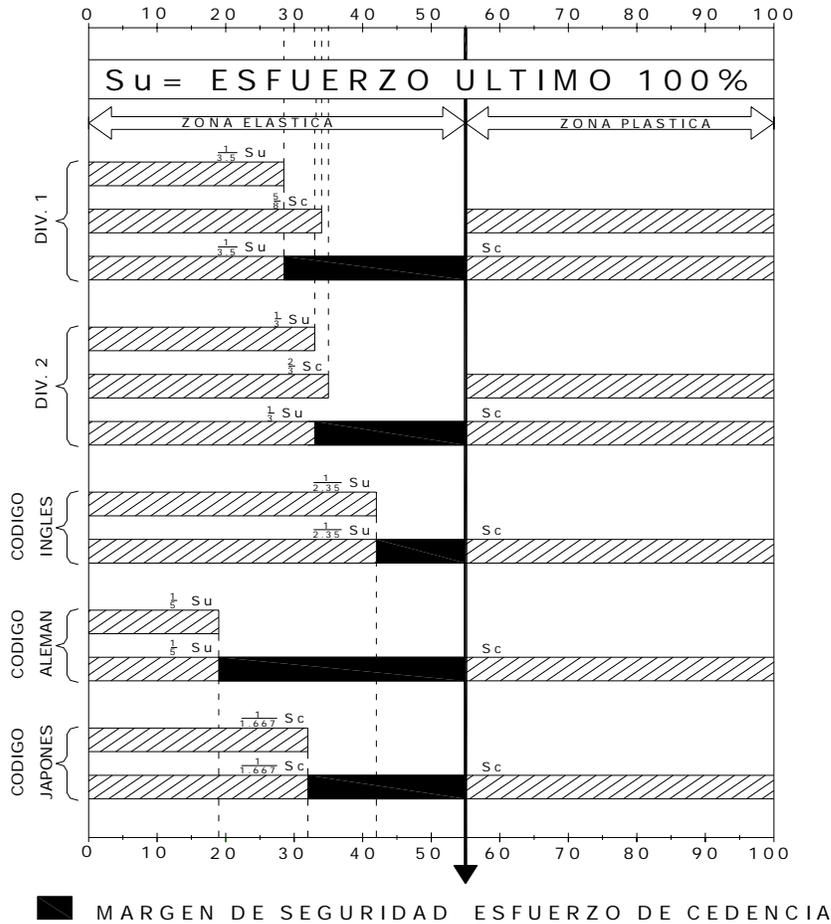
## 1.6. CÓDIGOS DE DISEÑO

Todos los diseños, fabricación, pruebas e inspección de recipientes a presión se basan en un código, en la mayoría de los países, incluyendo el nuestro, ha llegado a ser como una ley la cual dictamina los requerimientos mínimos para cualquiera de las fases mencionadas.

Basándose en lo anterior, los países más altamente industrializados cuentan con códigos propios, dentro de los cuales, se pueden citar los siguientes:

- El código ASME (American Society of Mechanical Engineers), es el que rige actualmente en los Estados Unidos de America.
- El B.S 5500 o B.S.1515 (British Standar) que es el código Británico.
- El código JIS (Japonése Industrial Standar ) que es usado en Japón.
- El código Alemán que rige físicamente en Alemania y países bajos.

Cabe mencionar que cada uno de los códigos mencionados, tiene diferentes factores de seguridad, por ejemplo el ASME usa un factor de seguridad de 3.5 y el B.S 1515 de 2.35, esto es sobre la resistencia ultima a la tensión especificada a la temperatura ambiente o de diseño, en la siguiente figura se muestran los distintos factores de seguridad utilizados por los distintos códigos empleados en la construcción de recipientes a presión.



**Figura. 1.7. Factor de seguridad de de los distintos códigos**

## 1.7. CÓDIGO ASME.

### 1.7.1. Historia del código ASME

A fin de 1700, sobresale el uso de calderas y la necesidad de proteger al personal de fallas catastróficas. Las calderas para generación de vapor con presiones mayores a la atmosférica. El descuido y la negligencia de los operadores, las fallas de diseño en las válvulas de seguridad, inspecciones inadecuadas producen muchas fallas y explosiones de calderas en los Estados Unidos y Europa.

En junio de 1817, el comité del consejo de Filadelfia expone las explosiones de calderas de barcos. Este comité recomienda que se establezca un Instituto Legislador y se reglamenten las capacidades de presión, Instalación adecuada a la válvula de alivio e inspección mensual.

En 1911, debido a la falta de uniformidad para la fabricación de calderas, los fabricantes y usuarios de calderas y recipientes a presión recurrieron al consejo de la ASME, para corregir esta situación.

En respuesta a las necesidades obvias de diseño y estandarización, numerosas sociedades fueron formadas entre 1911 y 1921, tales como la A.S.A. (Asociación Americana de Estándares) ahora ANSI (Instituto Americano de Estándares Nacionales) el A.I.S.C. (Instituto Americano del Acero de Construcción) y la A.W.S. (Sociedad Americana de Soldadura).

Los códigos estándares fueron establecidos para proporcionar métodos de fabricación, registros y reportar datos de diseño.

A continuación se muestra las distintas secciones en las que está dividido el código ASME y sus características principales.

### **1.7.2. Secciones del código ASME**

Sección I Calderas de Potencia

Sección II Especificación de Materiales

Sección III Requisitos generales para División 1 y División 2

Sección IV Calderas para Calefacción

Sección V Pruebas no Destructivas

Sección VI Reglas y Recomendaciones para el cuidado y operación de las Calderas de Calefacción

Sección VII Guía y recomendaciones para el cuidado de Calderas de Potencia

Sección VIII Recipientes a Presión

Sección IX Calificación de Soldadura

Sección X Recipientes a Presión de Plástico reforzado en fibra de vidrio

Sección XI Reglas para Inspección en servicio de Plantas Nucleares

## **CODIGO ASME SECCION VIII DIVISION 1**

En esta parte del código se establecen los requerimientos mínimos para el diseño, fabricación e inspección y para obtener la certificación autorizada de la ASME para los recipientes a presión.

En base a esto se ha dividido en:

Subsección A. Parte UG que cubre los requerimientos generales.

Subsección B. Requerimientos de fabricación

Parte UW.- Para recipientes que serán fabricados por soldadura.

Parte UF.- Para recipientes que serán fabricados por forjado

Parte UB.- Para recipientes que serán fabricados utilizando un material de relleno no ferroso a este proceso se le denomina "brazing"

Subsección C. Requerimientos de materiales

Parte UCS.- Para recipientes construidos con acero al carbón y de baja aleación.

Parte UNF.- Para los construidos con materiales no ferrosos.

Parte UCI.- Para los construidos con fierro fundido.

Parte UCL.- Para los construidos con una placa "clad" integral o con recubrimiento tipo "lining".

Parte UCD.- Para los construidos con fierro fundido dúctil.

Parte UNT.- Para los construidos con aceros ferriticos con propiedades de tensión mejoradas por tratamiento térmico.

Parte ULW.- Para los fabricados por el método de multicapas.

Parte ULT.- Para los construidos con materiales con esfuerzos permisibles más altos a bajas temperaturas.

## 1.8. CÓDIGOS AUXILIARES O COMPLEMENTARIOS

El código ASME cubre los requerimientos para el diseño y la fabricación de recipientes a presión, pero existen ciertos elementos de estos, los cuales no son considerados dentro de la jurisdicción del código, o bien no esta definida explícitamente la forma en que deben ser analizados dichos elementos. Por tal motivo, se hace necesario el uso de otros códigos, los cuales reglamenten el análisis y/o diseño de los mismos. Así, a manera de ejemplo, podemos mencionar que el código ASME, establece que todos los recipientes a presión deben ser diseñados para resistir los esfuerzos generados por gradientes de temperatura, por solicitaciones de viento, nieve o sismo, pero en ningún momento proporciona los lineamientos en los cuales se deben basar para la cuantificación y evaluación de dichos efectos.

De acuerdo a lo anterior, es clara la necesidad del uso de otros códigos y manuales que respalden los elementos de los recipientes a presión, o bien que establezcan criterios para el análisis de los efectos antes mencionados. De esta manera, los siguientes códigos y manuales pueden servirnos para el diseño de elementos de soporte de esferas.

- a).- manual de diseño de obras civiles de la C.F.E.
- b).- manual de A.H.M.S.A y I.M.C.A.
- d).- manual de la A.I.S.C. (American Institute of Steel Construction).
- e).- estándar BS-449 "Uso del acero estructural".

En el manual de diseño de obras de la C.F.E., se establecen los requerimientos para el análisis de estructuras sujetas a solicitaciones debidas a viento o sismo, en este mismo se establecen los criterios de diseño que deben seguirse para proporcionar un soporte adecuado al equipo

Por otra parte, en los manuales A.H.M.S.A., A.I.S.C. y el BS-449 se encuentran los requerimientos que deben cumplir las secciones estructurales, que pudieran ser requeridas por el equipo. Estos mismos manuales nos proporcionan además de los criterios de análisis, las dimensiones, propiedades y resistencia de los perfiles y

secciones estructurales que se encuentran disponibles en el mercado nacional (tal es el caso del manual A.H.M.S.A.), en los Estados Unidos (el manual de la A.I.S.C) o en el Reino Unido (es estándar BS-449).

En lo que respecta a las conexiones y accesorios requeridos por el equipo, nos podemos auxiliar de los estándares siguientes:

ANSI	B.16.5.	Bridas y conexiones bridadas.
ANSI	B.16.11.	Conexiones de acero forjado.
ANSI	B.16.25.	Extremos para soldar a tope.
ANSI	B.16.30.	Dimensiones de bridas para recipientes a presión

## **1.9. MATERIALES**

### **1.9.1. Especificaciones de materiales**

Los materiales usados para el diseño y la fabricación de recipientes a presión, también están regidos por normas y códigos.

Así, la ASTM (American Society for Testing and Materiales) y la A.W.S (American Welding Society) son las autoridades máximas en los Estados Unidos, y en las cuales se ampara el código ASME.

Normalmente el código que reglamenta el diseño de los recipientes a presión, reglamenta también los materiales a usar.

En el caso del código ASME, toma bajo su jurisdicción los materiales amparados por la ASTM, y solo le antepone una "S" a los materiales amparados por el. De manera similar lo hace para el material de los electrodos utilizados, los cuales son amparados por la A.W.S., ejemplo:

Nominación ASTM	A-515-70
Nominación ASME	SA-515-70

Es importante mencionar, que el código ASME dedica toda la sección II a los materiales que ampara y parte de la sección IX a materiales de los electrodos amparados por el.

Además, la sección VIII proporciona una lista de todos los materiales que pueden emplearse para el diseño y fabricación de recipientes a presión no sometidos a fuego directo, agregando el valor de los esfuerzos máximos permisibles a distintas temperaturas. Esta lista de materiales se encuentra tabulada en la subsección C, de la sección VIII del código.

Las placas de acero al carbono se usan, en la mayoría de los casos, donde lo permitan las condiciones de servicio debido a su bajo costo y mayor disponibilidad. Estos aceros son fabricados para que puedan ser soldados por fusión y cortados por medio de oxígeno, si el contenido de carbono no excede de 0.35%.

07

TABLE UCS-23  
CARBON AND LOW ALLOY STEEL

Spec. No.	Type/Grade	Spec. No.	Type/Grade	Spec. No.	Type/Grade
SA-36	...	SA-302	A, B, C, D	SA-516	55, 60, 65, 70
SA-53	E/A, E/B, S/A, S/B	SA-307	B	SA-524	I, II
SA-105	...	SA-320	L7, L7A, L7M, L43	SA-533	A Cl. 1 & 2, B Cl. 1 & 2, C Cl. 1 & 2, D Cl. 2
SA-106	A, B, C	SA-325	1	SA-537	Cl. 1, 2 & 3
SA-135	A, B	SA-333	1, 3, 4, 6, 7, 9	SA-540	B21, B22, B23, B24, B24V
SA-178	A, C	SA-334	1, 3, 6, 7, 9	SA-541	1, 1A, 2 Cl. 1, 2 Cl. 2, 3 Cl. 1, 3 Cl. 2, 3V, 3VCb, 22 Cl. 3, 22V
SA-179	...	SA-335	P1, P2, P5, P5b, P5c, P9, P11, P12, P15, P21, P22, P91	SA-542	B Cl. 4, C Cl. 4a, D Cl. 4a, E Cl. 4a
SA-181	...	SA-336	F1, F3V, F3VCb, F5, F5A, F9, F11 Cl. 2 & 3, F12, F21 Cl. 1 & 3, F22 Cl. 1 & 3, F22V, F91	SA-556	A2, B2, C2
SA-182	FR, F1, F2, F3V, F3VCb, F5, F5a, F9, F11 Cl. 1 & 2, F12 Cl. 1 & 2, F21, F22 Cl. 1 & 3, F22V, F91	SA-350	LF1, LF2, LF3, LF5, LF9	SA-557	A2, B2, C2
SA-192	...	SA-352	LCB, LC1, LC2, LC3	SA-562	...
SA-193	B5, B7, B7M, B16	SA-354	BC, BD	SA-574	4037, 4042, 4140, 4340, 5137M, 51B37M
SA-202	A, B	SA-369	FP1, FP2, FP5, FP9, FP11, FP12, FP21, FP22	SA-587	...
SA-203	A, B, D, E, F	SA-372	A, B, C, D, E Cl.65 & 70, F Cl. 70, G Cl. 70, H Cl. 70, J Cl. 65, 70 & 110, L, M Cl. A & B	SA-612	...
SA-204	A, B, C	SA-387	2, 5, 11, 12, 21, 22, 91	SA-662	A, B, C
SA-209	T1, T1a, T1b	SA-414	A, B, C, D, E, F, G	SA-675	45, 50, 55, 60, 65, 70
SA-210	A-1, C	SA-420	WPL 3, WPL 6, WPL 9	SA-695	B/35, B/40
SA-213	T2, T5, T5b, T5c, T9, T11, T12, T17, T21, T22, T91	SA-423	1, 2	SA-727	...
SA-214	...	SA-437	B4B, B4C	SA-737	B, C
SA-216	WCA, WCB, WCC	SA-449	...	SA-738	A, B, C
SA-217	C12, C5, WC1, WC4, WC5, WC6, WC9	SA-455	...	SA-739	B11, B22
SA-225	C	SA-487	1 Cl. A & B, 2 Cl. A & B, 4 Cl. A, 8 Cl. A	SA-765	I, II, III, IV
SA-234	WPB, WPC, WPR, WP1, WP5, WP9, WP11 Cl. 1, WP12 Cl. 1, WP22 Cl. 1	SA-508	1, 1A, 2 Cl. 1, 2 Cl. 2, 3 Cl. 1, 3 Cl. 2, 3V, 3VCb, 4N Cl. 3, 22 Cl. 3	SA-832	21V, 22V, 23V
SA-250	T1, T1a, T1b	SA-515	60, 65, 70	SA-836	...
SA-266	1, 2, 3, 4			SA-1008	CS-A, CS-B
SA-283	A, B, C, D			SA/AS 1548	7-430, 7-460, 7-490
SA-285	A, B, C			SA/CSA-G40.21	38W
SA-299	...			SA/EN 10028-2	P295GH
				SA/EN 10028-3	P275NH

GENERAL NOTE: Maximum allowable stress values in tension for the materials listed in the above table are contained in Subpart 1 of Section II, Part D (see UG-23).

Figura.1.8. Aceros simples y aleados

Las partes secundarias de los recipientes (partes no sujetas a presión), como son soportes o algunas otras partes misceláneas, pueden ser fabricadas con aceros estructurales, tales como, el SA-36 y/o SA-283 (grado A,B,C y D), para partes sujetas a presión, también estos aceros pueden ser usados cumpliendo con los siguientes requerimientos:

- a). Recipientes que no vayan a ser usados en servicios con sustancias letales, ya sea en líquidos o gases.
- b). Que las temperaturas a las cuales el material vaya a ser usado este entre  $-29^{\circ}\text{C}$  ( $-20^{\circ}\text{F}$ ) y  $343^{\circ}\text{C}$  ( $650^{\circ}\text{F}$ ).
- c). Para cascarones, cabezas y boquillas en los cuales el espesor de la placa no exceda de 1.6 cm ( $5/8''$ ).
- d). el acero sea fabricado por el proceso de horno eléctrico, horno de hogar abierto o por el proceso de oxígeno básico.

Uno de los aceros mas empleados en la construcción de recipientes a presión es el SA-285 grado C. este acero es muy dúctil y fácil de formar, soldar y maquinar. Es también de los aceros más económicos y de mayor existencia en el mercado; es el indicado para temperaturas moderadas. En los casos de mas altas temperaturas, se usan con ventaja aceros de alta resistencia, para reducir el espesor de pared, el SA-515 grado 70 es adecuado para esas aplicaciones requiriendo un espesor de pared de solamente el 78% del que se requiera con el SA-285 grado C. Este material, es también de fácil fabricación siendo más caro que los otros aceros.

El material SA-285, normalmente se usa para temperaturas mayores de  $18.33^{\circ}\text{C}$  ( $61^{\circ}\text{F}$ ) y menores de  $345^{\circ}\text{C}$  ( $650^{\circ}\text{F}$ ) mientras que el SA-515 se usa para temperaturas que estén entre  $18.33^{\circ}\text{C}$  ( $61^{\circ}\text{F}$ ) y  $413^{\circ}\text{C}$  ( $775^{\circ}\text{F}$ ). En el caso de que haya temperaturas mas altas que las indicadas, se usan por lo general aceros de baja aleación, tal es el caso del SA-387 ( $1 \frac{1}{4}\%$  Cr –  $\frac{1}{2}$  Mo), el cual puede ser usado hasta aproximadamente  $566^{\circ}\text{C}$  ( $1050^{\circ}\text{F}$ ).

Ahora también se han mencionado solamente los casos para temperaturas moderadas o altas, pero definitivamente existe una gran variedad de procesos en los

cuales, se tienen temperaturas criogénicas; en estos casos, los materiales mas recomendables dentro de los aceros al carbón, son el SA-516, el cual puede usarse de -45°C (-50°F) a 15°C (60°F), en caso de tener mas bajas temperaturas, se pueden pensar en utilizar acero a base de níquel como es el SA-203 (2 ½ a 3 ½ Ni), que se usa normalmente que se usa para temperaturas mucho mas bajas que las anteriores, se usan aceros con mas contenido de níquel hasta llegar a los inoxidable, como es el caso del SA-240-TP304, que resiste temperaturas hasta de -254°C (-425°F).

Los esfuerzos permisibles para aceros al carbón y de baja aleación, así como aquellos usados en tuberías y forjas, se pueden consultar en la tabla UCS-23 de la subsección C del código ASME sección VIII división 1. Mientras, que los aceros inoxidable se encuentran en la tabla UHA-23 en la misma parte del código.

A continuación se muestran tablas las cuales fueron extraídas del código ASME, en las que se presentan los materiales mas comúnmente empleados en el diseño de esferas además de los valores de esfuerzos de diseño a diferentes temperaturas.

### 1.9.2. Materiales usados de acuerdo al fluido almacenado

En la tabla 1.2. Se presentan los materiales recomendables que pueden ser usados según las temperaturas a las que vayan a estar operando el recipiente.

**Tabla 1.2. Materiales recomendados según las temperaturas**

Temperatura		Material
°C	°F	
413	775	Cr – Mo
De 18 a 413	De 61 a 775	Acero al carbono
De -40 a 15	De -40 a 60	Acero al carbono
De -45 a -65	De -50 a -90	Acero al níquel [2 ½ Ni]
De -65 a -100	De -90 a -150	Acero al níquel [3 ½ Ni]
De -100 a -195	De -150 a -320	Acero al níquel [9% Ni]
De -195 a -252	De -320 a -425	Acero inoxidable [19 Cr – 8 Ni]

En lo relacionado a las sustancias a manejar, se puede hacer uso de la tabla 1.3. Cabe mencionar, que solo se indican las sustancias más generales ya que no es posible indicar todas las sustancias existentes.

**Tabla .1.3. Sustancias a manejar**

Sustancias	Acero al carbón	Acero al níquel	Inconel	Monel	Acero inoxidable (18Cr-8Ni)	Acero inoxidable (18Cr-8Ni-Mo)
Acetona	A	A	A	A	A	A
Acetileno	A	A	-	A	A	A
Cerveza	P	A	A	A	A	A
Benzeno Benzal	A	A	A	A	A	A
Benzina Nafta	A	A	A	A	A	A
Acido bórico	X	-	-	P	A	A
Cloruros en general	X	R	R	R	X	X
Butano	A	-	-	A	A	A
Acido cítrico	X	R	A	A	A	A
Mercurio	A	A	-	A	A	A
Gas natural	A	A	A	A	A	A
Aceites petróleos 500°F crudo	A	P	A	P	P	R
Ácidos fosforitos	P	P	P	P	P	R

A=Bueno,

X= No recomendable

R= Recomendable,

P= Precaución (depende de las condiciones),

**CAPITULO 2.**  
**DISEÑO DE LA ENVOLVENTE DE UNA ESFERA DE ALMACENAMIENTO**  
**DE CLORURO VINILICO.**

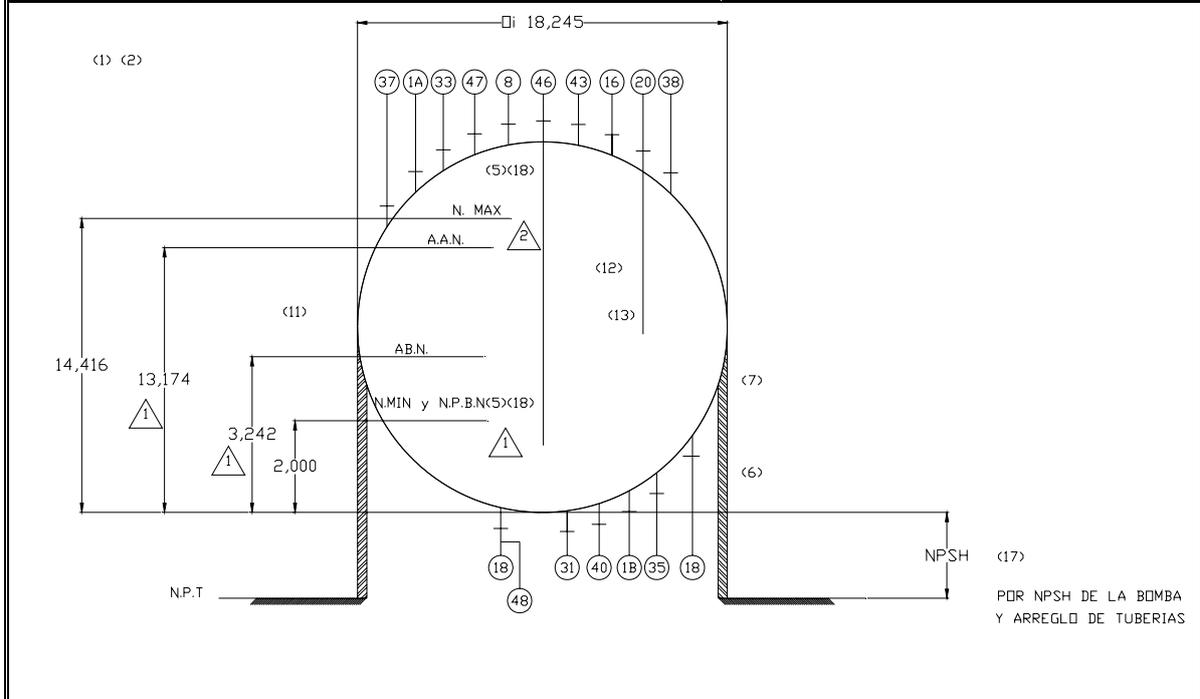
**2.1 INTRODUCCIÓN HOJA DE DATOS.**

Para comenzar el desarrollo se deben de plantear todas las condiciones a las que estará sometiendo nuestro recipiente para ello contamos con la ayuda de Hoja de Datos de proceso la cual se muestra en la tabla 2.1.

**Tabla.2.1 Hoja de datos**

HOJA DE DATOS DE PROCESO PARA ESFERAS DE ALMACENAMIENTO				
Cliente:		<b>COMPLEJO PETROQUÍMICO PAJARITOS</b>		Proyecto: <b>F.59048</b>
Planta:		<b>DERIVADOS COMPLEJOS III</b>		Hoja: <b>1 DE: 2</b>
Localización:		<b>COATZACOALCOS VERACRUZ</b>		<b>A-F59048-1812-0-HD 1</b>
Clave del equipo: <b>TE-2008/TE-2009/TE-2010(13)</b>			No. De unidades: <b>3</b>	
Servicio:	<b>Cloruro vinílico</b>	Capacidad:	<b>20,000 Bls</b>	Posición:
Tipo de fluido:	<b>Hidrocarburos clorados</b>	Flujo:	<b>95.0/310.0 Ton/h (9)</b>	Densidad: <b>886.5/887.03 kg/m<sup>3</sup></b>
Vapor de gas:		Flujo:	<b>kg/h</b>	Densidad: <b>kg/m<sup>3</sup></b>
Temperatura: operación	<b>38°C</b>	Máxima:	<b>41 ° C</b>	Diseño: <b>56 °C</b>
Presión: Operación (16)	<b>4.81kg/cm<sup>2</sup> man (14)</b>	Máxima:	<b>5.3 kg/cm<sup>2</sup> man.</b>	Diseño: <b>10.6 kg/cm<sup>2</sup> man.</b>
Dimensiones: Diámetro	<b>18245 mm</b>	Capacidad total:	<b>3,170 m<sup>3</sup></b>	
Nivel: Normal		Máximo:	<b>14,416 mm</b>	Mínimo: <b>2,000 mm</b>
Alarma alto nivel:	<b>13,174 mm</b>	Alarma bajo nivel:	<b>3,242 mm</b>	Nivel de paro: <b>2,000 mm</b>
Material del cascaron:	<b>SA-737-C</b>	Corrosión permisible:	<b>3.2 mm</b>	
Aislamiento:	<b>NO</b>			
		Recubrimiento interno:	<b>NO</b>	
Boquillas				Notas
No.	Cant.	Ø. Nom.	Servicio	1) Acotaciones en mm
1AB	2	610	Registro de hombre (3)	2) Las esferas deben ser construidas de acuerdo a las
8	1	51	Venteo	normas DG-GPASI-SI, DIII-2(No.052.2.03), NRF-028-
16	1	102	Línea de igualación (4) (8)	PEMEX-2004 y especificaciones particulares del IMP
18	1	305	Recibo/salida de producto (CV)	No. AV-F59048-1816-18160-ES-01 en en su ultima
20	1	203	Recirculación	Revisión al momento de la licitación y al Código ASME
31	1	51	Drene en el fondo de la esfera	Sección VIII Div. 1 Edición 2007 y ultimas adendas y
33	1	203	Válvula de seguridad (10)	Manual de obras civiles sismo y viento.
35	1	51	Conexión de servicio con tapa	3) Con pescante el superior y con bisagra el inferior
37	1	38	Indicador de presión	4) El circuito de igualación de presión debe de ser con
38	1	38	Toma de presión	válvulas m ancho al pie de cada esfera.

40	1	38	Indicador de temperatura	5) Configurar en el sistema digital de monitoreo las
43	1	51	Elemento de Temp. para los vapores	alarmas por alto nivel, nivel de paro por alto nivel y
46	1	152	Instrumento de nivel (5)	bajo nivel y disparo por muy bajo nivel.
47	1	152	Instrumento de nivel redundante	6) Los soportes de las esferas deben estar cubiertas
48	1	38	Toma de muestra en línea	por concreto



POR NPSH DE LA BOMBA Y ARREGLO DE TUBERIAS

Cliente:	<b>COMPLEJO PETROQUÍMICO PAJARITOS</b>	Proyecto:	<b>F.59048</b>
----------	--	-----------	----------------

Planta:	<b>DERIVADOS COMPLEJOS III</b>	Hoja:	<b>2 DE: 2</b>
---------	--------------------------------	-------	----------------

Localización:	<b>COATZACOALCOS VERACRUZ</b>	<b>A-F59048-1812-0-HD 1</b>
---------------	-------------------------------	-----------------------------

Clave del equipo:	<b>TE-2008/TE-2009/TE-2010(13)</b>	No. De unidades:	<b>3</b>
-------------------	------------------------------------	------------------	----------

Servicio:	<b>Cloruro vinílico</b>	Capacidad:	<b>20,000 BIs</b>	Posición:	
-----------	-------------------------	------------	-------------------	-----------	--

Notas (continuación)

7) Suministrar el equipo con estampado ASME.

8) El contratista debe verificar el  $\varnothing$  de la boquilla acorde al cálculo de la línea de igualación.

9) Flujo de recibo/envío. Flujo intermitente. Flujo máximo de recibo es de 105.9 Ton/h cuando se reciben vapores de muelle No. 1

10) El material de los instrumentos no deben de ser de cobre o aleaciones que lo contengan.

11) Se debe considerar el precalentamiento de las uniones durante la soldadura de acuerdo con lo Indicado en la tabla UCS-56 del código

ASME secc. VIII Div. 1.

12) Tubos anti-rotacional para el elemento de nivel

13) Tubo difusor. Este debe de ser diseñado y Suministrado por el contratista para un mezclado Homogéneo en toda la esfera.

14) Esta hoja de datos esta basada en la hoja de Datos del proyecto IMP. F.59017.

15) El CV se recibe a 7.82 kg/cm<sup>2</sup> man. La presión Indicada es la de equilibrio liquido vapor

17) Se debe considerar que la altura del nivel del piso Terminado a la tangente inferior de la esfera, se le de Una elevación tal que se tenga

accesibilidad para Maniobras de mantenimiento y operaciones en esa Área.

18) Nivel en el cual se debe de parar la bomba (nivel de paro por bajo nivel).

## 2.2. ESFERA SOMETIDA A PRESIÓN INTERNA

Cuando un recipiente es sometido a presión interna, se genera un esfuerzo circunferencial y un esfuerzo longitudinal, así para cuestiones de diseño, ambos esfuerzos deben ser determinados. De esta manera los distintos códigos utilizados para el diseño de estos equipos difieren, unos códigos de otros, en el factor de seguridad empleado por cada código.

Por lo antes expuesto, y a manera de ilustración, se presenta a continuación la forma en la que pueden ser evaluados estos esfuerzos.

### 2.2.1 ESFUERZOS TANGENCIAL Y CIRCUNFERENCIAL EN RECIPIENTES A PRESIÓN

Consideramos un recipiente esférico sometido a una presión interna uniforme  $P$ , como se muestra en la Figura 2.1. Como puede observarse, para una esfera toda sección que pase por un centro de la misma clase de cuerpo libre. Por lo consiguiente, el esfuerzo longitudinal será igual al esfuerzo circunferencial,  $\sigma_t = \sigma_c$

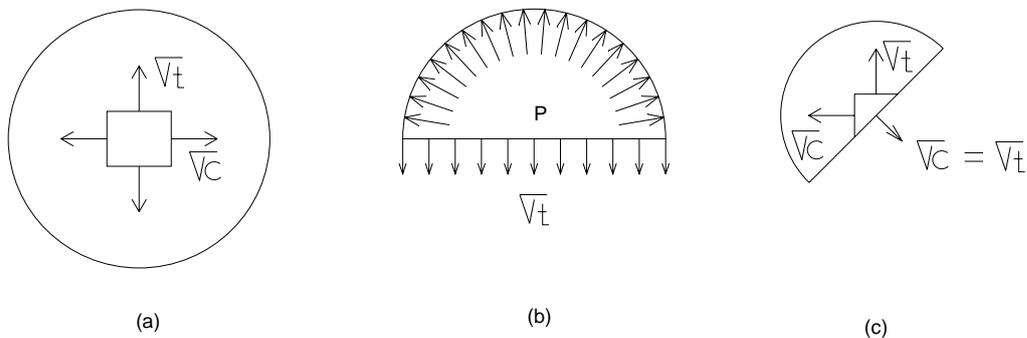


Figura 2.1. Recipiente esférico sometido a presión interior

Así pasando una sección por el centro de la esfera y aislándola, Figura 2.1., podemos aplicar las ecuaciones de equilibrio.

$$\begin{aligned}
 + \uparrow \sum F &= 0 \\
 P(\pi * R^2) - \sigma_t(2\pi Rt) &= 0 \quad (2.1) \\
 \sigma_t &= \frac{PR}{2t}
 \end{aligned}$$

Donde:

- P** = Presión.
- R** = Radio del recipiente.
- t** = Espesor del cascaron.
- $\sigma_t$**  = Esfuerzo tangencial.
- $\sigma_c$**  = Esfuerzo circunferencial.

Debe hacerse notar que el plano del corte puede localizarse en cualquier dirección, sin afectar en nada el resultado. De esta manera el diseño por presión interna consiste en determinar los espesores adecuados a lo largo de toda la esfera. Las modificaciones realizadas a esta ecuación por los diversos códigos toman en cuenta otros factores tales como la eficiencia de las juntas soldadas y el factor de seguridad.

Por ejemplo el código ASME amplía el rango de aplicación de la ecuación (2.1) mediante una modificación empírica, agregando a dicha ecuación una constante igual a 0.1. De modo que se obtiene lo siguiente:

$$\frac{\sigma_t}{P} \frac{R}{2t} + 0.1 = 0 \quad (2.2)$$

De donde podemos despejar t que es la variable que nos interesa en el diseño.

$$t = \frac{PR}{2\sigma_t - 0.2P} \quad (2.3)$$

Si en la ecuación anterior sustituimos  $\sigma_t$  por el esfuerzo máximo permisible del material (S) y agregamos la eficiencia de las juntas de soldadura (E) obtenemos la ecuación establecida por el código ASME, Sección VIII, División 1.

$$t = \frac{PR}{2SE - 0.2P} \quad (2.4)$$

### 2.3 DIMENSIONAMIENTO DE LA ESFERA

Uno de los primeros pasos en el diseño de la esfera consiste en el dimensionamiento adecuado de la misma. Este dimensionamiento puede ser llevado a cabo de diversas maneras, esta es una forma de llevarlo a cabo y por tal motivo no debe tomarse como una restricción.

El segundo paso consiste en determinar los espesores en las diferentes zonas de la esfera como se muestra esquemáticamente en la figura 2.2. Para el cálculo de estos espesores, se debe tomar en cuenta además de la presión de diseño, la presión hidrostática debida a la columna de líquido.

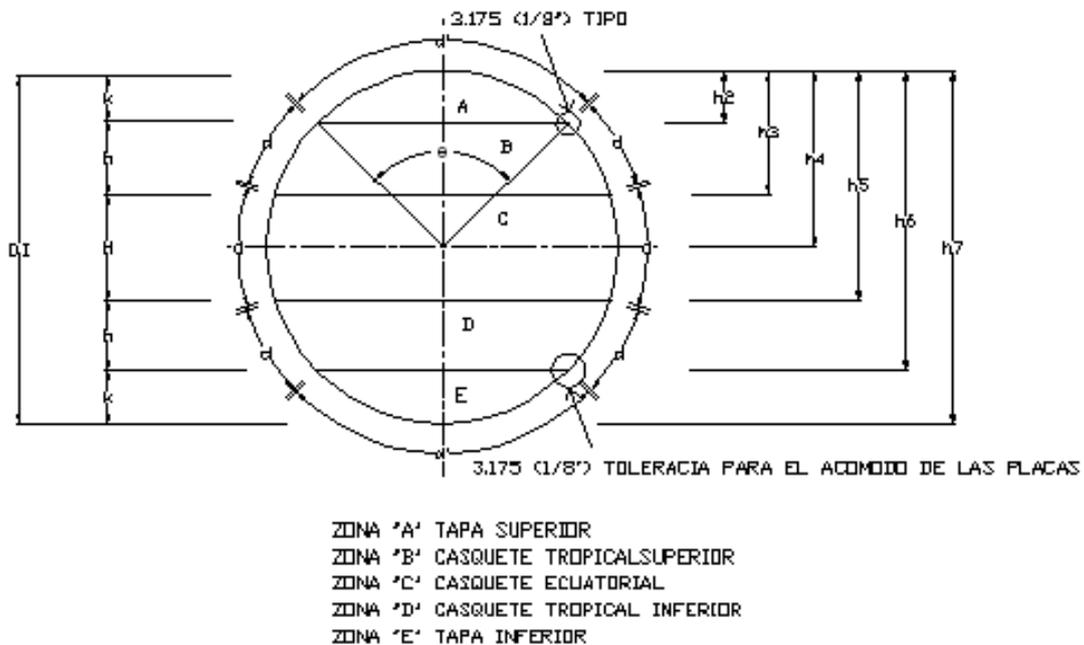


Figura 2.2 Dimensionamiento de una esfera

El dimensionamiento de la esfera consiste en definir las dimensiones de todos los sectores que componen a la misma. Esto puede ser dado en tres formas:

- 1) Definir las dimensiones k, h y H.
- 2) Definir los ángulos para cada sector.
- 3) Definir los arcos denominados d' y d.

Así mismo se lleva a cabo el dimensionamiento en base a definir los arcos d' y d.

El arco **d'** se tomara con un valor de 3048 mm (10 ft) y los arcos **d** serán determinados en base a la ecuación siguiente:

$$d = \frac{\pi D.I - 2d' - 8(3.175)}{6} \quad (2.5)$$

Donde:

3.175 mm (1/8") la tolerancia dada para acomodo de las placas. De esta forma las dimensiones a manejar serán dadas en mm.

D.I = Diámetro interior del recipiente.

1) cálculo de las dimensiones k, h y H

Dimensión "k"

$$k = R(1 - \cos \frac{\theta}{2}). \quad (2.6)$$

Donde:  $\theta = \frac{57.3d'}{R} \quad (2.7)$

R = Radio interior del recipiente.

Dimensión "h"

$$h = R \left[ \cos \left( \frac{\theta}{2} \right) - R \operatorname{sen} \left( \frac{\theta_1}{2} \right) \right] \quad (2.8)$$

Donde:  $\theta_1 = \frac{57.3(d)}{R} \quad (2.9)$

Dimensión "H"

$$H = 2R \operatorname{sen} \left( \frac{\theta_1}{2} \right) \quad (2.10)$$

2) Cálculo de las dimensiones internas, ver Figura 2.3

1) Diámetros polares 2 y 7.

$$D_p = 2R \operatorname{sen}\left(\frac{\theta}{2}\right) = D \operatorname{sen}\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (2.11)$$

2) Diámetro tropical 3 y 5.

$$D_t = 2R \operatorname{sen}\left(\frac{\alpha_3}{2}\right) = D \operatorname{sen}\left(\frac{\alpha_3}{2}\right) \quad (2.12)$$

3) Diámetro tropical medio 6.

$$D_{tm} = 2R \operatorname{sen}\left(\frac{\alpha_2}{2}\right) = D \operatorname{sen}\left(\frac{\alpha_2}{2}\right) \quad (2.13)$$

Siendo:  $\alpha_2 = \frac{(d'+d+13)57.3}{R} \quad (2.14)$

$$\alpha_3 = 2\theta_1 + \theta \quad (2.15)$$

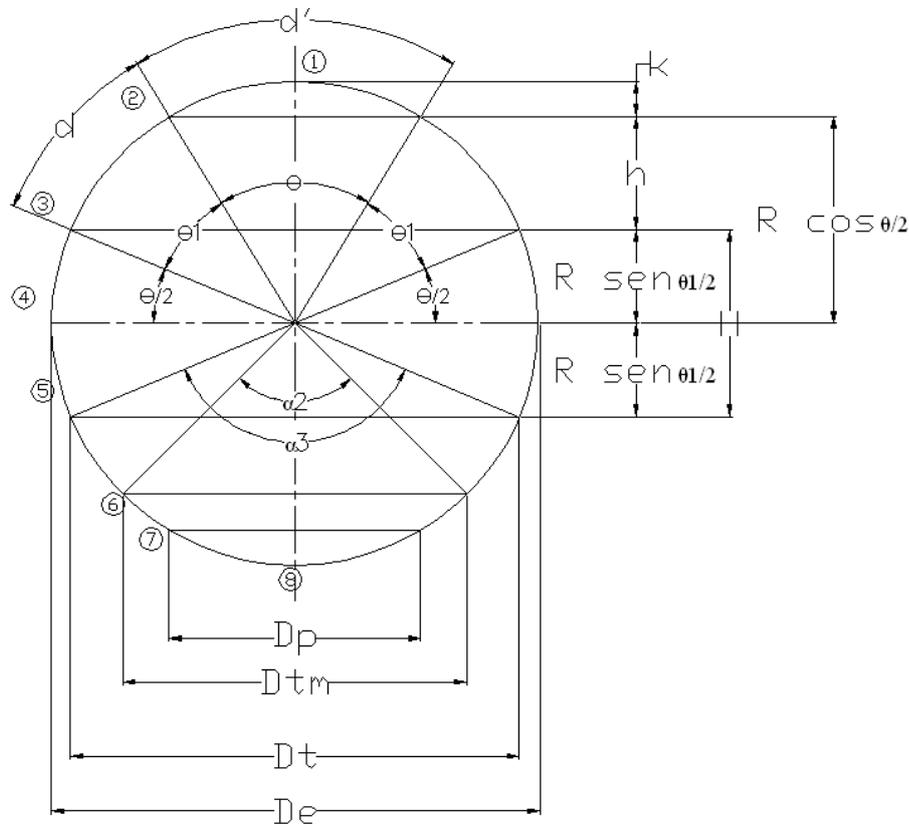


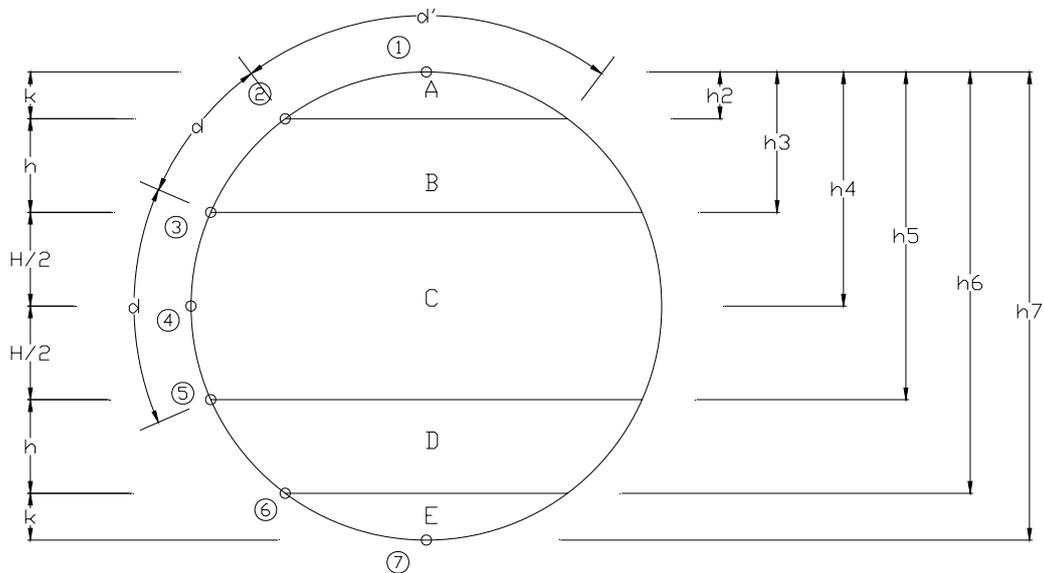
Figura. 2.3 Dimensiones interiores

Para esto se tiene que obtener primero las dimensiones requeridas de la esfera como son diámetro interior, radio, entre otros.

Donde:

Diámetro interior:  $D.I = 18,245 \text{ mm}/25.4 = 718.307 \text{ in.}$

Radio interior:  $R = D/2 = 1824.5/2 = 912.25 \text{ cm}$   $718.307/2 = 359.153 \text{ in.}$



**Figura 2.4 Dimensionamiento de la esfera**

Dimensionamiento mediante el siguiente procedimiento mencionado antes en este mismo capítulo en el cual se comienza asignando el valor a el arco  $d'$  que para este caso se le asignara un valor de 120 in y con el cual será posible comenzar el procedimiento y obtener los valores siguientes, así poder hacer un seccionamiento de la esfera de una manera adecuada para nuestro análisis posterior.

Dimensiones de los arcos:  $d'$  y  $d$ .

$d' = 120 \text{ in.}$

$d = 304.8 \text{ cm.}$

$$d = \frac{\pi D \cdot I - (2d' + 8 \cdot 1/8)}{6} = \frac{\pi(718.307) - (2(120) + 0.75)}{6} =$$

$$d = 335.979 \text{ in}$$

$$d = 853.386 \text{ cm}$$

A continuación se muestra la obtención de las dimensiones: k, h y

H

Se comienza obteniendo el valor del ángulo  $\theta$  mostrado a continuación utilizando la ecuación 2.7

$$\theta = \frac{57.3(d')}{R} = \frac{57.3(120)}{359.153} = 19.145^\circ$$

Una vez obtenido el valor del ángulo  $\theta$  se procede a la obtención de los valores de las dimensiones K, utilizando la ecuación 2.6

$$K = R \left( 1 - \cos \frac{\theta}{2} \right) = 359.1535 \left( 1 - \cos \frac{19.145}{2} \right)$$

$$K = 5 \text{ in}$$

$$K = 12.7 \text{ cm}$$

Continuando con el proceso de obtención de las dimensiones se tiene que obtener el valor del ángulo  $\theta_1$  con ayuda de la ecuación 2.9

$$\theta_1 = \frac{57.3(d)}{R} = \frac{57.3(335.979)}{359.1535} = 53.60^\circ$$

Una vez obtenido el ángulo  $\theta_1$  se procede a aplicar la ecuación 2.8 y ecuación 2.10 para obtener los valores de las dimensiones h y H.

$$h = R \left( \cos \frac{\theta}{2} - \text{sen} \frac{\theta_1}{2} \right) = 359.1535 \left( \cos \frac{19.145}{2} - \text{sen} \frac{53.60}{2} \right)$$

$$h = 192.218 \text{ in}$$

$$h = 488.23 \text{ cm}$$

$$H = 2R \text{sen} \left( \frac{\theta_1}{2} \right) = 2(359.1535) \text{sen} \left( \frac{53.60^\circ}{2} \right)$$

$$H = 323.86 \text{ in}$$

$$H = 822.62 \text{ cm}$$

Como forma de comprobación de que nuestros cálculos fueron realizados adecuadamente podemos hacer la sumatoria de todas las

dimensiones obtenidas y nos debe resultar el diámetro interior de la esfera (D.I).

$$D = 2k + 2h + H = 2(5) + 2(192.24) + 323.81 =$$

$$D = 718.296in$$

$$D = 1824.45cm$$

Dimensiones internas

Donde:

$$\alpha_2 = \frac{(d'+d+13)57.3}{R} = \frac{(304.8+853.386+13)57.3}{912.25}$$

$$\alpha_2 = 73.56^\circ$$

$$\alpha_3 = 2\theta_1 + \theta = 2(53.60^\circ) + 19.145$$

$$\alpha_3 = 126.345^\circ$$

1).- Diámetro polar 2 y 7.

$$Dp = 2Rsen\left(\frac{\theta}{2}\right) = Dsen\left(\frac{\theta}{2}\right) = (1824.5)sen\left(\frac{19.145^\circ}{2}\right) =$$

$$Dp = 303.406cm$$

$$Dp = 119.45in$$

2).- Diámetro tropical 3 y 5.

$$Dt = 2Rsen\left(\frac{\alpha_3}{2}\right) = Dsen\left(\frac{\alpha_3}{2}\right) = (1824.5)sen\left(\frac{126.345^\circ}{2}\right)$$

$$Dt = 1628.127cm$$

$$Dt = 640.995in$$

3).- Diámetro tropical medio.

$$Dtm = 2Rsen\left(\frac{\alpha_2}{2}\right) = Dsen\left(\frac{\alpha_2}{2}\right) = (1824.5)sen\left(\frac{56.33^\circ}{2}\right)$$

$$Dtm = 861.186cm$$

$$Dtm = 339.049in$$

Los resultados obtenidos del dimensionamiento de la esfera serán vaciados en la tabla 2.2 con la cual se procederá al cálculo de los espesores de la esfera.

**Tabla 2.2 Alturas obtenidas de el dimensionamiento de la esfera**

<b>ALTURAS</b>		
<b>Nomenclatura</b>	<b>In</b>	<b>cm</b>
<b>h1</b>	0	0
<b>h2=k</b>	5	12.7
<b>h3= k + h</b>	5 + 192.24 = 197.218	500.93
<b>h4= h3 + H/2</b>	197.218+ 323.86/2 = 359.148.	912.235
<b>h5= h4 + H/2</b>	359.145 + 323.81/2 = 521.078.	1323.538
<b>h6= h5 + h</b>	521.0078 + 192.218 = 713.296.	1811.771
<b>h7= h6 + k</b>	713.29 + 5 = 718.296.	1824.47

### **2.3.1 CALCULO DE ESPESORES.**

Consideraciones generales:

Se analizaran 5 zonas afectadas por presión de diseño y por la hidrostática de la siguiente forma:

- Zona A; Análisis para puntos 1 y 2.
- Zona B; Análisis para punto 3.
- Zona C; Análisis para puntos 4 y 5.
- Zona D; Análisis para puntos 6.
- Zona E; Análisis para punto 7

El espesor se calculara de acuerdo a lo estipulado en el Código ASME, Sección VIII, División 1.

a).- Espesor por presión de diseño:

$$t_p = \frac{PR_i}{2SE - 0.2P} \quad (2.16)$$

Ver tabla 2.4 para resultados obtenidos.

En el caso de que el fluido almacenado tenga una densidad menor que la densidad del agua el espesor deberá ser calculado.

$$th = \frac{\rho hi Ri}{2SE - 0.2\rho hi} \quad (2.17)$$

Ver tabla 2.5 y tabla 2.6 para valores obtenidos.

### 2.3.2 CÁLCULO DE ESPESORES POR PRESIÓN INTERNA

A continuación se establecen las variables necesarias para los cálculos de los espesores por presión interna y presión de prueba hidrostática.

**Tabla 2.3. Conceptos utilizados en el proceso de cálculo.**

CONCEPTO	UNIDADES	
P (presión)	150.63 lb/in <sup>2</sup>	10.6 kg/cm <sup>2</sup>
R (radio)	359.1535in	912.25cm
E (Eficiencia en las juntas)	100%	100%
ρ cloruro	0.032 lb/in <sup>3</sup>	0.000887 kg/cm <sup>3</sup>
C (Corrosión permisible)	0.125 in.	3.2 mm
ρ agua	0.0361 lb/in <sup>3</sup>	0.001 kg/cm <sup>2</sup>
ρ acero	0.2836 lb/in <sup>3</sup>	0.00785 kg/cm <sup>2</sup>

**Tabla 2.4 Espesores calculados por presión interior.**

Zonas en las que fue dividida la esfera	Punto al cual se le aplica la presión	Altura de los puntos hi (in)	Espesor por presión interior (tp)	
			In	Cm
A	1	0	1.1827	3.00
	2	5.02814961	1.1827	3.00
B	3	197.534449	1.1827	3.00
C	4	359.153543	1.1827	3.00
	5	520.772638	1.1827	3.00
D	6	713.278937	1.1827	3.00
E	7	718.307087	1.1827	3.00

**Tabla 2.5 Resultados obtenidos de la aplicación de la prueba hidrostática.**

Zonas en las que fue dividida la esfera	Punto al cual se le aplica la presión	Altura de los puntos hi (in)	Espesor por presión hidrostática (th)	
			In	Cm
A	1	0	0	0
	2	5.02814961	0.00127	0.00321
B	3	197.534449	0.04965	0.12613
C	4	359.153543	0.09029	0.22933
	5	520.772638	0.13092	0.33254
D	6	713.278937	0.17932	0.45548
E	7	718.307087	0.18059	0.45869

**Tabla 2.6 Sumatoria de los espesores obtenidos.**

Zonas en las que fue dividida la esfera	Punto al cual se le aplica la presión	Altura de los puntos hi (in)	tr=tp+th	
			In	Cm
A	1	0	1.18278	3.00427
	2	5.02814961	1.18404	3.00748
B	3	197.534449	1.23244	3.13040
C	4	359.153543	1.27307	3.23361
	5	520.772638	1.31371	3.33682
D	6	713.278937	1.36211	3.45976
E	7	718.307087	1.36337	3.46297

La tabla 2.6 representa el resultado de los espesores requeridos por los cálculos de presión interna y la presión hidrostática debida al fluido contenido. anterior solo se muestra el resultado de la suma de los espesores obtenidos de aplicar la formula de espesor por presión de diseño y presión hidrostática debida al fluido contenido, pero como lo ya mencionado se debe de aplicarle un espesor por corrosión el cual fue proporcionado en la hoja de proceso (ver

tabla 2.7) y con el cual obtendremos el espesor requerido para el diseño pero como las placas de acero no se pueden hacer del espesor obtenido por los cálculos se tiene que seleccionar el espesor comercial inmediatamente superior y con lo cual se agrega mayor seguridad al diseño.(ver tabla 2.8)

**Tabal 2.7 Espesor resultante mas el espesor por corrosión.**

Zona	Punto	hi (in)	t=tr+c	
			In	Cm
A	1	0	1.3087	3.32427
	2	5.02814961	1.3100	3.32748
B	3	197.534449	1.3584	3.45040
C	4	359.153543	1.3990	3.55361
	5	520.772638	1.4396	3.65682
D	6	713.278937	1.4880	3.77976
E	7	718.307087	1.4893	3.78297

**Tabla 2.8 Espesor nominal o comercial utilizado.**

Zona	Punto	hi (in)	t=tr+c		Nominal Comercial	
			In	cm	In	Cm
A	1	0	1.3087	3.32427	1-3/8	3.49
	2	5.02814961	1.3100	3.32748	1-3/8	3.49
B	3	197.534449	1.3584	3.45040	1-3/8	3.49
C	4	359.153543	1.3990	3.55361	1-1/2	3.81
	5	520.772638	1.4396	3.65682	1-1/2	3.81
D	6	713.278937	1.4880	3.77976	1-1/2	3.81
E	7	718.307087	1.4893	3.78297	1-1/2	3.81

### 2.3.3 Revisión por presión exterior de seguridad.

Debido a que durante el funcionamiento de estos quipos se pueden presentar condiciones de vacío, se hace necesaria su revisión por presión exterior. El vacío que puede presentar podría ser total o parcial.

La revisión por presión exterior consiste básicamente en checar si el espesor calculado por presión interior es adecuado para resistir la presión exterior.

Así en este trabajo se mostrara el procedimiento propuesto en el código A.S.M.E. Para llevar a cabo la revisión por presión exterior de recipientes esféricos.

Procedimiento estipulado en el código ASME. SEC. VIII. DIV. 1.

Paso 1. Asumir un valor para  $t$ , tomar el espesor menor obtenido en el diseño por presión interior y calcule el valor de  $A$  usando la formula siguiente:

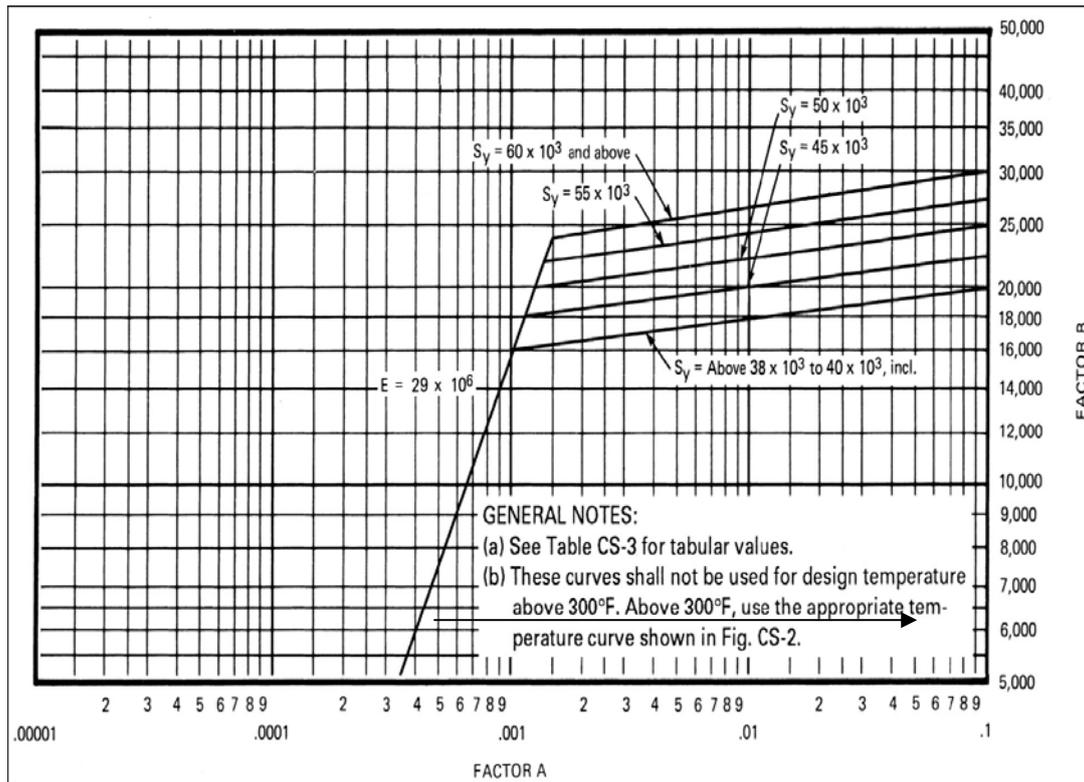
$$A = \frac{0.125}{(Ro/t)} \quad (2.18)$$

Siendo:  $Ro$  = El radio exterior de la esfera.

$t$  = El menor espesor de la esfera en condición de corrosión.

$$A = \frac{0.125}{Ro/tc} = \frac{0.125}{360.46604/1.248} = 0.0004327$$

Paso 2. Usando el valor de  $A$ , calculado en el paso 1, entrar a la carta aplicable al material utilizado (ver la figura 2.5) obtenida en el apéndice 5. Moverse verticalmente hasta la intersección de la línea material/temperatura para la temperatura de diseño. Se puede interpolar para valores intermedios.



**Figura 2.5** Tabla para obtener el valor del facto B para el material a usar.

En los casos en los cuales el valor de A caiga a la derecha de la línea material/temperatura, asumir una intersección con la proyección horizontal de la parte superior de la línea material/temperatura. Para valores de A que caigan a la izquierda de la línea material/temperatura ver el paso 5.

Paso 3. De la intersección obtenida en el paso 2, moverse horizontalmente a la derecha y leer el valor del factor B.

**Para nuestro caso el factor B es de 6000**

Paso 4. Usando el valor de B obtenido en el paso 3, calcular el valor de la presión exterior máxima permisible P, usando la formula siguiente:

$$Pa = \frac{B}{(Ro/t)} \quad (2.19)$$

$$Pa = \frac{B}{(Ro/tc)} = \frac{6000}{(360.46604/1.248)} = 20.773lb/in^2$$

**Como Pa = 20.773 lb/in<sup>2</sup> > P.E.S. = 15 lb/in<sup>2</sup>**

En nuestro caso se cumplió con esta condición y por consecuencia concluiremos que el espesor es adecuado, para soportar la presión exterior a la que podrá estar sometido durante su vida útil y no se tendrá ningún problema de deformación con respecto a su forma.

Paso 5. Para valores de A que caigan a la izquierda de la línea de material/temperatura, el valor de Pa será calculado usando la formula siguiente:

$$Pa = \frac{0.0625E'}{(Ro/tc)^2} \quad (2.20)$$

Siendo: E' = El modulo de elasticidad del material a la temperatura de diseño.

Paso 6. Compare el valor de Pa, obtenido en el paso 4 ó 5, con la presión exterior de diseño (P.E.S.). Si Pa es menor que P.E.S., seleccione un valor mayor de t y vuelva a repetir el procedimiento hasta que se obtenga que Pa se a mayor o igual a P.E.S.

## **2.4 PRESIÓN MÁXIMA PERMISIBLE DE TRABAJO**

La presión máxima permisible de trabajo para un recipiente es la máxima presión a la cual el equipo puede operar. Esta deberá ser el menor valor encontrado para la máxima presión de trabajo permisible para cualquiera de las partes esenciales del recipiente y es ajustada por cualquier diferencia de presión estática, producida por el tirante del líquido, que pudiera existir entre la parte considerada y la parte superior del recipiente.

Así, la presión máxima permisible de trabajo, para una parte del recipiente, es la presión interna o externa máxima, excluyendo la presión hidrostática del fluido almacenado, determinada por las que pueden presentarse durante la operación del mismo, para la temperatura de operación, excluyendo el espesor especificado como corrosión permisible.

De esta manera el cálculo de la presión máxima permisible de trabajo de cada zona de la esfera será:

$$P.M.P.T = P - \gamma h_i \quad (2.21)$$

La cual deberá ser mayor o igual a la presión de diseño.

Donde:

$$P = \frac{2SEt_{ci}}{R_i + 0.2t_{ci}} \quad (2.22)$$

Siendo:  $t_{ci}$  = espesor sin corrosión de la sección bajo consideración.

Las presiones de diseño serán vaciadas en las tablas 2.9, 2.10 y 2.11 Y de estos podremos determinar cual es la sección que soporta la menor presión y así tomar esta presión como la presión máxima permisible de trabajo del equipo (P.M.P.T).

Nota: como P.M.P.T se deberá tomar la menor.

**Tabla 2.9 Valores de presión de diseño**

Zona	Punto	hi (in)	ti=t-c		$P = \frac{2SEti}{(R+C)+0.2ti}$	
			in	Cm	Lb/in <sup>2</sup>	Kg/cm <sup>2</sup>
A	1	0	1.18278	3.004275	150.6791	10.600
	2	5.02814961	1.18404	3.007486	166.8779	11.743
B	3	197.534449	1.23244	3.130409	173.0380	12.176
C	4	359.153543	1.27307	3.233614	178.2097	12.54
	5	520.772638	1.31371	3.336823	183.3814	12.904
D	6	713.278937	1.36211	3.459764	189.5415	13.338
E	7	718.307087	1.36337	3.462975	189.7024	13.349

**Tabla 2.10 Valores de presión hidrostática.**

Zona	Punto	Hi (in)	ti=t-c		γ hi
			in	Cm	(lb/in <sup>2</sup> )
A	1	0	1.18278	3.004275	0
	2	5.02814961	1.18404	3.007486	0.1611
B	3	197.534449	1.23244	3.130409	6.3302
C	4	359.153543	1.27307	3.233614	11.5094
	5	520.772638	1.31371	3.336823	16.6887
D	6	713.278937	1.36211	3.459764	22.8577
E	7	718.307087	1.36337	3.462975	23.0189

**Tabla 2.11 Valores de la presión de trabajo máxima permisible.**

$P = \frac{2SEti}{(R+C)+0.2ti}$	Γ hi (lb/in <sup>2</sup> )	P.T.M.P (P- γ hi)
166.8779	0.1611	150.6790
173.0380	6.3302	150.6709
178.2097	11.5094	150.6640
183.3814	16.6887	150.6572
189.5415	22.8577	150.6491
189.7024	23.0189	150.6489

La presión de trabajo máxima permisible (PTMP) es de 150.6489 lb/in<sup>2</sup>.

## 2.5. PRESIÓN DE PRUEBA HIDROSTÁTICA

De acuerdo al código ASME.

Los recipientes diseñados por la presión interior deberán ser sujetos a una presión hidrostática la cual deberá ser al menos, en cada punto del recipiente, igual a 1.3 veces la presión máxima permisible de trabajo del equipo, marcada sobre el recipiente, multiplicada por la menor relación (entre material del recipiente) del esfuerzo S para la temperatura de prueba y el esfuerzo S a la temperatura de diseño. Se deberán considerar todas las cargas que se pudieran presentar.

Además se deberá tomar en cuenta la presión ejercida por el tirante del líquido, que se encuentra encima de elemento bajo consideración. De manera similar podemos llenar una tabla como la realizada para el cálculo de la P.M.P.T., y así podemos determinar la presión de prueba hidrostática (P.P.H.) a la que deberá someterse el equipo.

Nota: se deberá tomar la menor de todas.

El espesor  $t_i$ , es el espesor nuevo de la sección en consideración.

En este paso es considerada la densidad del agua.

**Densidad del agua       $\gamma =$       0.0361      lb/in<sup>3</sup>**

**$h_i =$       718.3608 in**

$$\gamma \cdot h_i = (0.0361)(718.3608) = 22.8577 \text{ lb/in}^2$$

$$P = (1.3) \frac{2SEt}{R + (0.2t)} = 246.613 \text{ lb/in}^2$$

$$P - (\gamma \cdot h_i) = 248.456 - 25.93282 = 223.59 \text{ lb/in}^2$$

Los valores obtenidos serán vaciados en la tabla 2.12

**Tabla 2.12 tabla de presión de prueba hidrostática**

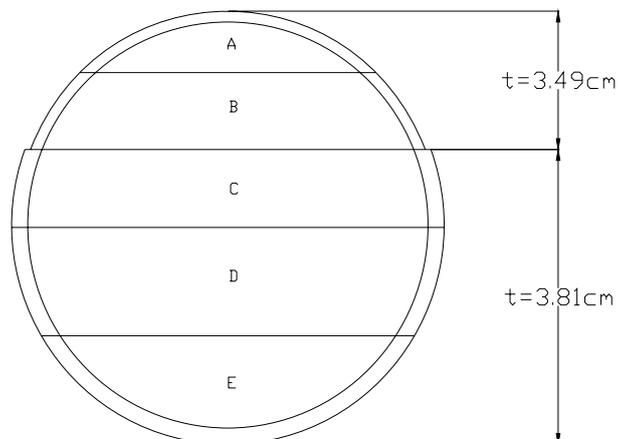
$P = (1.3) \times \frac{2SEti}{(R + C) + 0.2ti}$ Lb/in <sup>2</sup>	$\gamma$ hi (lb/in <sup>2</sup> )	PPH Lb/in <sup>2</sup>
195.88	0	195.88
216.941	0.1611	216.77
224.949	6.3302	218.61
231.660	11.5094	220.15
238.395	16.6887	221.70
246.403	22.8577	223.54
246.613	23.0189	223.59

**Presión de prueba hidrostática (pph) = 223.59 lb/in<sup>2</sup>**

**15.719 kg/cm<sup>2</sup>**

**Gobierna = Sección interior "E".**

En la figura 2.6 se muestran los espesores finales obtenidos de los análisis hechos



**Figura 2.6 Espesores finales**

### **CAPITULO 3.**

#### **DISEÑO DE LOS SOPORTES DE LA ESFERA.**

Hasta este momento solo se ha diseñado la envolvente de la esfera, así en este capítulo se darán los criterios a seguir para el diseño del soporte de la esfera.

Las esferas son generalmente soportadas por columnas de sección circular, las cuales son soldadas a la esfera en la zona del ecuador. El número de columnas va a depender de las dimensiones de la esfera.

El diseño de las columnas de soporte consiste en determinar las dimensiones de las columnas, para que sean adecuadas para soportar las cargas a las que estará sujeta la esfera durante el montaje, cuando se este llevando a cabo la prueba de presión hidrostática y durante la operación de la misma. Así en el diseño de las columnas se deberá tomar en cuenta las siguientes cargas:

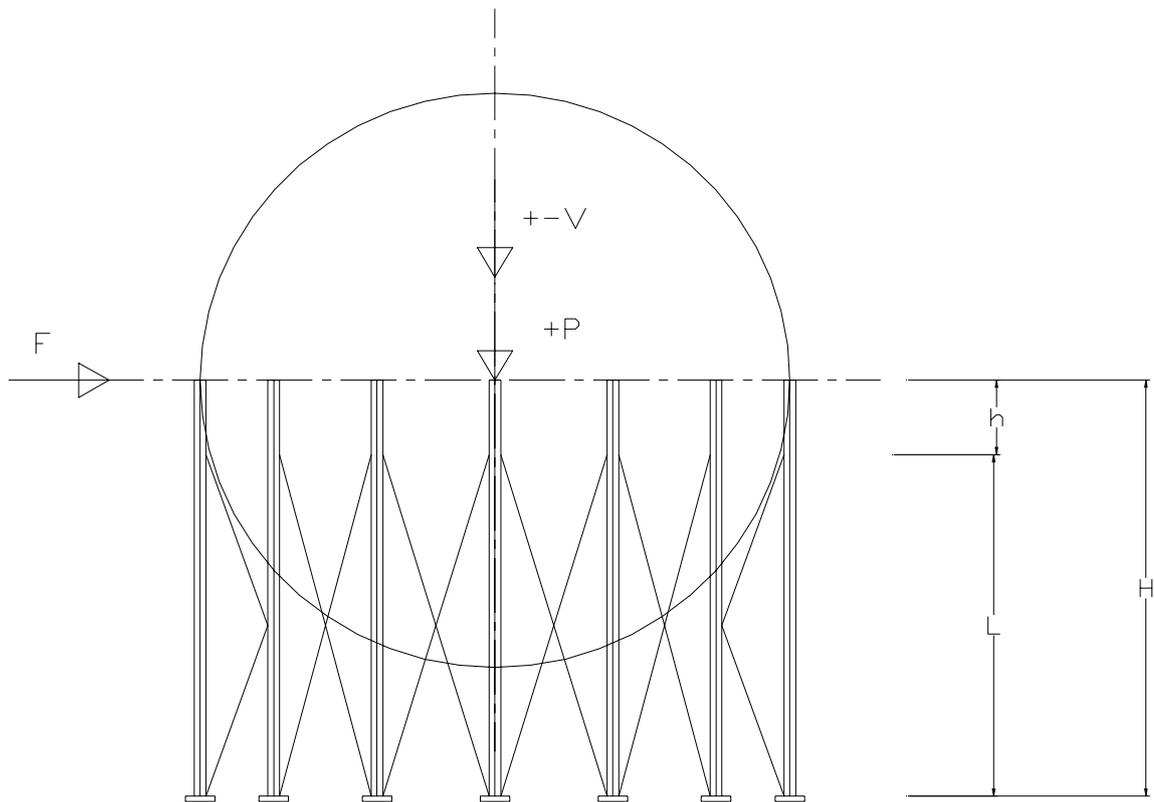
- a).- Carga debida al peso propio y en operación (con su contenido).
- b).- Carga debida a efectos del viento.
- c).- Carga debida a los efectos de un sismo, en la dirección horizontal.

En la figura 3.1., se muestra esquemáticamente las cargas aplicadas a la esfera.

**+ P=** peso propio + peso del producto almacenado + peso del aislamiento.

**F =** fuerza horizontal (viento o sismo) aplica en cualquier dirección.

**± V=** fuerza vertical debida a sismo, si es requiera por los códigos (Manual del Diseño de Obras Civiles de la C.F.E.).



**Fig. 3.1 Cargas aplicadas a la esfera**

### 3.1. CARGA VERTICAL DEBIDA AL PESO DE LA ESFERA (+P).

Como puede observarse en la Figura 3.1., esta carga se distribuirá uniformemente la parte superior de cada columna, de esta manera la carga en cada columna será:

$$P_A = P_B = \frac{W_{op}}{N} \quad (3.1)$$

Donde: **W<sub>op</sub>**= peso en operación de la esfera.

**PA=PB**= carga vertical en cada columna.

**N**= numero de columnas.

Para nuestro caso será de 12 columnas.

El peso de operación se obtiene de la suma del acero que contiene la envolvente más el peso del fluido almacenado esto se muestra en la tabla 3.1 donde se encuentra el cálculo de los pesos del acero.

**Tabla 3.1 Peso del equipo**

ÁREAS	ESPEJOR	DENSIDAD ACERO	PESO
Cm <sup>2</sup>	Cm	kg/cm <sup>3</sup>	kg
10452432.8	3.81	0.00785	312616.586
8263033.81	3.81	0.00785	247134.947
2194725.06	3.49	0.00785	60127.7851
		<b>total</b>	<b>307262.732</b>
VOLUMEN	DENSIDAD DEL AGUA	DENSIDAD DEL CV	PESO
Cm <sup>3</sup>	kg/cm <sup>3</sup>	kg/cm <sup>3</sup>	kg
3180030175	0.001		3180030.17
2818919415		0.000887	2500381.52
<b>Peso de operación</b>		<b>Wop</b>	<b>2807644.25</b>

Aplicando la ecuación 3.1, obtenemos el peso soportado por cada columna lo que nos ayuda para la obtención de las dimensiones de las columnas.

$$P_A = P_B = \frac{Wop}{N} = \frac{2807644.25\text{kg}}{12} = 233970.35\text{kg}$$

### 3.2. CARGA VERTICAL DEBIDA A SISMO (V).

De acuerdo al manual de diseño de obras civiles de la C.F.E., solo deberán ser consideradas aceleraciones, o bien cargas, verticales en las zonas C y D (por esta razón esta parte es solo como complementación por si se necesitara hacer una consideración para las zonas C y D con un recipiente similar), y cuya magnitud será determinadas de acuerdo a la formula siguiente:

$$V = CvWop \quad (3.2)$$

Donde

**V=** carga vertical debida a sismo.

**Cv=** coeficiente sísmico vertical.

**Cv=** 0.5 C para la zona C.

**Cv=** 0.75 C para la zona D.

Siendo: **C**= coeficiente sísmico básico así la carga vertical en cada columna será.

$$V_A = V_B = \frac{V}{N} \quad (3.3)$$

### **3.3. FUERZA HORIZONTAL DEBIDA A VIENTO.**

Para el análisis estructural debemos considerar las siguientes variables que dependen de distintos factores como lo son viento y sismo para los cuales se lleva distintas formas de calcular las afectaciones de estas variables sobre nuestro recipiente dependiendo de los siguientes criterios que se van a explicar en este trabajo y con ayuda del manual de C.F.E. edición 1993. se debe de seguir el diagrama de flujo de la figura 3.2.

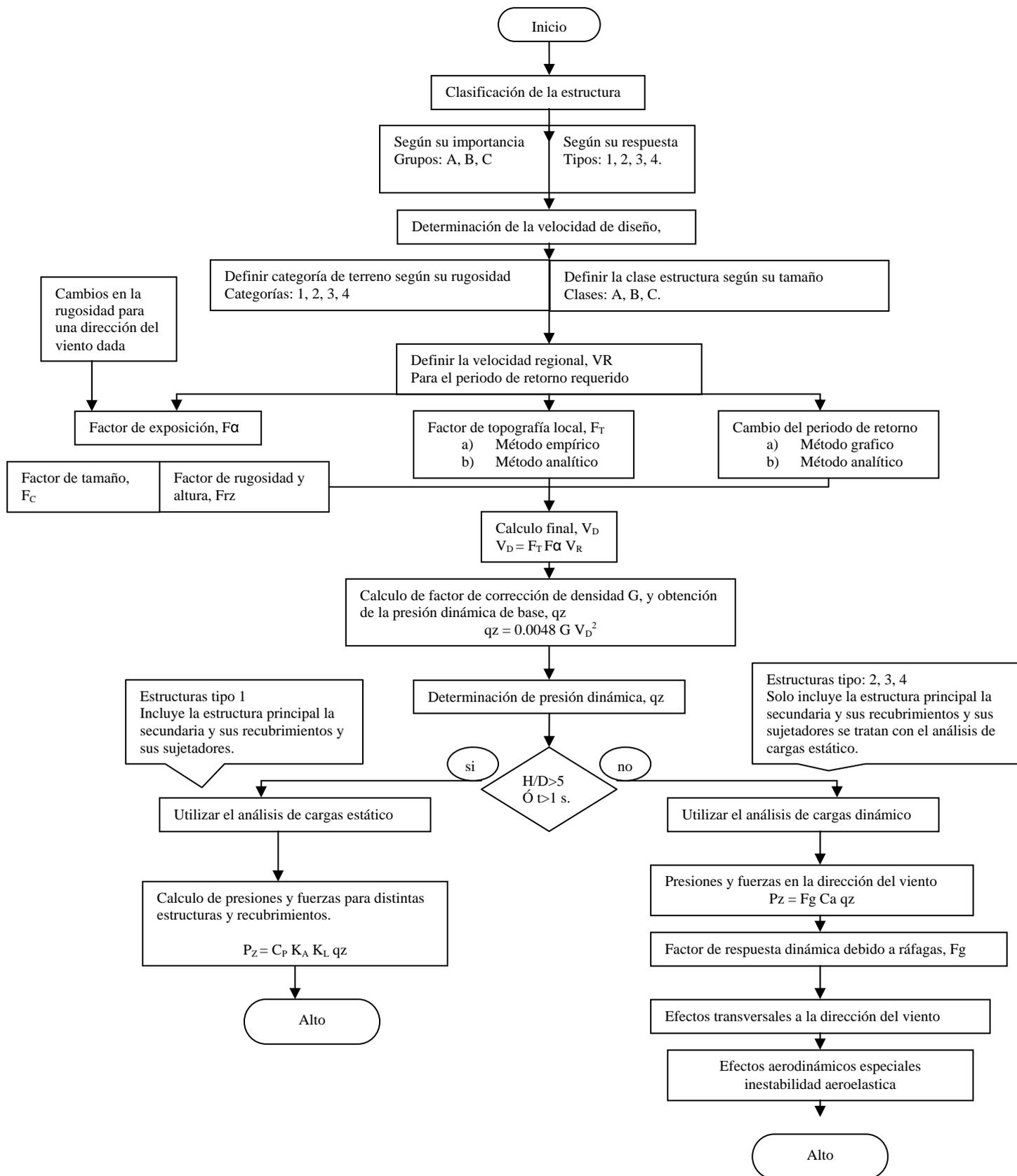


Figura. 3.2 Diagrama de flujo para el análisis de viento

### 3.3.1. Clasificación de las estructuras según su importancia

Atendiendo al grado de seguridad aconsejable para una estructura, las construcciones se clasifican según los grupos que se indican a continuación en la tabla 3.2:

**Tabla 3.2 Clasificación de las estructuras según su importancia**

<b>Grupo A</b>	Estructuras para las que se recomienda un grado de seguridad elevado. Pertenecen a este grupo aquellas que en caso de fallar causarían la pérdida de un número importante de vidas, o perjuicios económicos o culturales excepcionalmente altos; asimismo, las construcciones y depósitos cuya falla implique un peligro significativo por almacenar o contener sustancias tóxicas o inflamables.
<b>Grupo B</b>	Estructuras para las que se recomienda un grado de seguridad moderado. Se encuentran dentro de este grupo aquellas que en caso de fallar, representan un bajo riesgo de pérdida de vidas humanas y que ocasionarían daños materiales de magnitud intermedia. Este es el caso de plantas industriales, bodegas ordinarias, gasolineras, comercios, restaurantes, etc.
<b>Grupo C</b>	Estructuras para las que se recomienda un bajo grado de seguridad. Son aquellas cuya falla no implica graves consecuencias, ni puede causar daños a construcciones de los grupos A y B. Este es el caso de bodegas provisionales, cimbras, carteles, así como sus recubrimientos tales como cancelerías y elementos estructurales que formen parte de las fachadas de las construcciones.

Por la importancia del compuesto a almacenar y como es peligroso, se pueden poner en peligro muchas vidas si llegara a fallar el recipiente por esta razón se considera que el recipiente esta dentro de el **grupo A**.

### 3.3.2. Clasificación de las estructuras según su respuesta ante la acción del viento

Las construcciones se clasifican en cuatro tipos. Con base en esta clasificación podrá seleccionarse el método para obtener las cargas de diseño por viento sobre las estructuras y la determinación de efectos dinámicos suplementarios si es el caso. (Ver tabla 3.3).

**Tabla 3.3 Clasificación de las estructuras según su respuesta a la acción del viento.**

<b>Tipo 1</b>	<b>Estructuras poco sensibles a las ráfagas y a los efectos dinámicos del viento. Abarca todas aquellas en las que la relación de aspecto <math>H/D \leq 5</math>. Pertenecen a este tipo la mayoría de los edificios para habitación u oficinas, bodegas, naves industriales, teatros y auditorios, puentes cortos y viaductos.</b>
<b>Tipo 2</b>	Dentro de este tipo se cuentan los edificios con relación de aspecto $H/D > 5$ . Pertenecen a este tipo tanques elevados, antenas, bardas, parapetos, anuncios y en general, las construcciones que presentan una dimensión muy corta paralela a la dirección del viento.
<b>Tipo 3</b>	En este tipo se incluyen las construcciones y elementos aproximadamente cilíndricos o prismáticos esbeltos, tales como chimeneas, tuberías exteriores o elevadas.
<b>Tipo 4</b>	En este tipo se hallan las formas aerodinámicamente inestables como son los cables de las líneas de transmisión, las tuberías colgantes y las antenas parabólicas.

Para nuestro caso se hace el análisis y la operación para poder determinar como se va seguir considerando el recipiente

$$\frac{H}{D} = \frac{21.245m}{18.245m} = 1.16 \quad (3.4)$$

Por lo tanto cumple con lo establecido por el tipo 1 de la clasificación de las estructuras según su respuesta ante la acción del viento.

### **3.3.3. Categorías de terrenos y clases de estructuras**

Tanto en el procedimiento de análisis estático como en el dinámico intervienen factores que dependen de las condiciones topográficas y de exposición locales del sitio en donde se instalará la construcción, así como del tamaño de ésta, a fin de evaluar correctamente dichos factores, es necesario establecer clasificaciones de carácter práctico. En la tabla 3.4. Se consignan cuatro categorías de terreno atendiendo al grado de rugosidad que se presenta alrededor de la zona de instalación. La tabla 3.5 se dividen a las estructuras y a los elementos que forman parte de ellas en tres clases de acuerdo con su tamaño.

**Tabla 3.4. Categoría del Terreno Según su Rugosidad**

Cat.	Descripción	Ejemplos	Limitaciones
1	Terreno abierto, prácticamente plano y sin obstrucciones.	Franjas costeras planas, zonas de pantanos, campos aéreos, pastizales y tierras de cultivo sin setos o bardas alrededor. Superficies nevadas planas	La longitud mínima de este terreno en la dirección del viento debe ser de 2000 m o diez veces la altura de la construcción por diseñar, la que sea mayor.
2	Terreno plano u ondulado con pocas obstrucciones.	Campos de cultivo o granjas con pocas obstrucciones tales como setos o bardas alrededor, árboles y construcciones dispersas.	Las obstrucciones tienen alturas de 1.5 m a 10 m en una longitud mínima de 1500 m.
3	Terreno cubierto por numerosas obstrucciones estrechamente espaciadas.	Áreas urbanas, suburbanas y de bosques, o cualquier terreno con numerosas obstrucciones estrechamente espaciadas. El tamaño de las construcciones corresponde al de las casas y viviendas.	Las obstrucciones presentan alturas de 3 a 5 m. la longitud mínima de este tipo de terreno en la dirección del viento debe ser de 500 m o diez veces la altura de la construcción, la que sea mayor.
4	Terreno con numerosas obstrucciones largas, altas y estrechamente espaciadas.	Centros de grandes ciudades y complejos industriales bien desarrollados.	Por lo menos el 50% de los edificios tienen una altura mayor que 20 m. las obstrucciones miden de 10 a 30 m de altura, la longitud mínima de este tipo de terreno en la dirección del viento debe ser la mayor entre 400 m y diez veces la altura de la construcción.

**Tabla 3.5. Clase de Estructura Según su Tamaño**

Clase	Descripción
A	Todo elemento de recubrimiento de fachadas, de ventanearías y de techumbres y sus respectivos sujetadores. Todo elemento estructural aislado, expuesto directamente a la acción del viento. Asimismo, todas las construcciones cuya mayor dimensión, ya sea horizontal o vertical, no sea mayor que 20 m.
B	<b>Todas las construcciones cuya mayor dimensión, ya sea horizontal o vertical, varíe entre 20 y 50 m.</b>
C	Todas las construcciones cuya mayor dimensión, ya sea horizontal o vertical, sea mayor que 50 m.

De las tablas anteriores se ha determinado que la categoría del terreno según su rugosidad, y la clase de estructura a considerar son “1”, “B” respectivamente.

### 3.3.4. Velocidad Regional $V_R$

La velocidad regional del viento  $V_R$  es la máxima velocidad media probable de presentarse con un cierto periodo de recurrencia en una zona o región determinada del país. En este caso se tomó de 130 km/h para un periodo de recurrencia de 50 años.

### 3.3.5. Factor de Exposición $F_a$

El coeficiente  $F_a$  refleja la variación de la velocidad del viento con respecto a la altura  $H$ . Asimismo, considera el tamaño de la construcción o de los elementos de recubrimiento y las características de exposición. El factor de exposición se calcula con la siguiente expresión:

$$F_a = F_c \cdot F_{rz} \quad (3.5)$$

Donde:

<b>Fa =</b>	Factor de exposición
<b>Fc =</b>	Factor de Tamaño
<b>Frz =</b>	Factor de rugosidad y altura

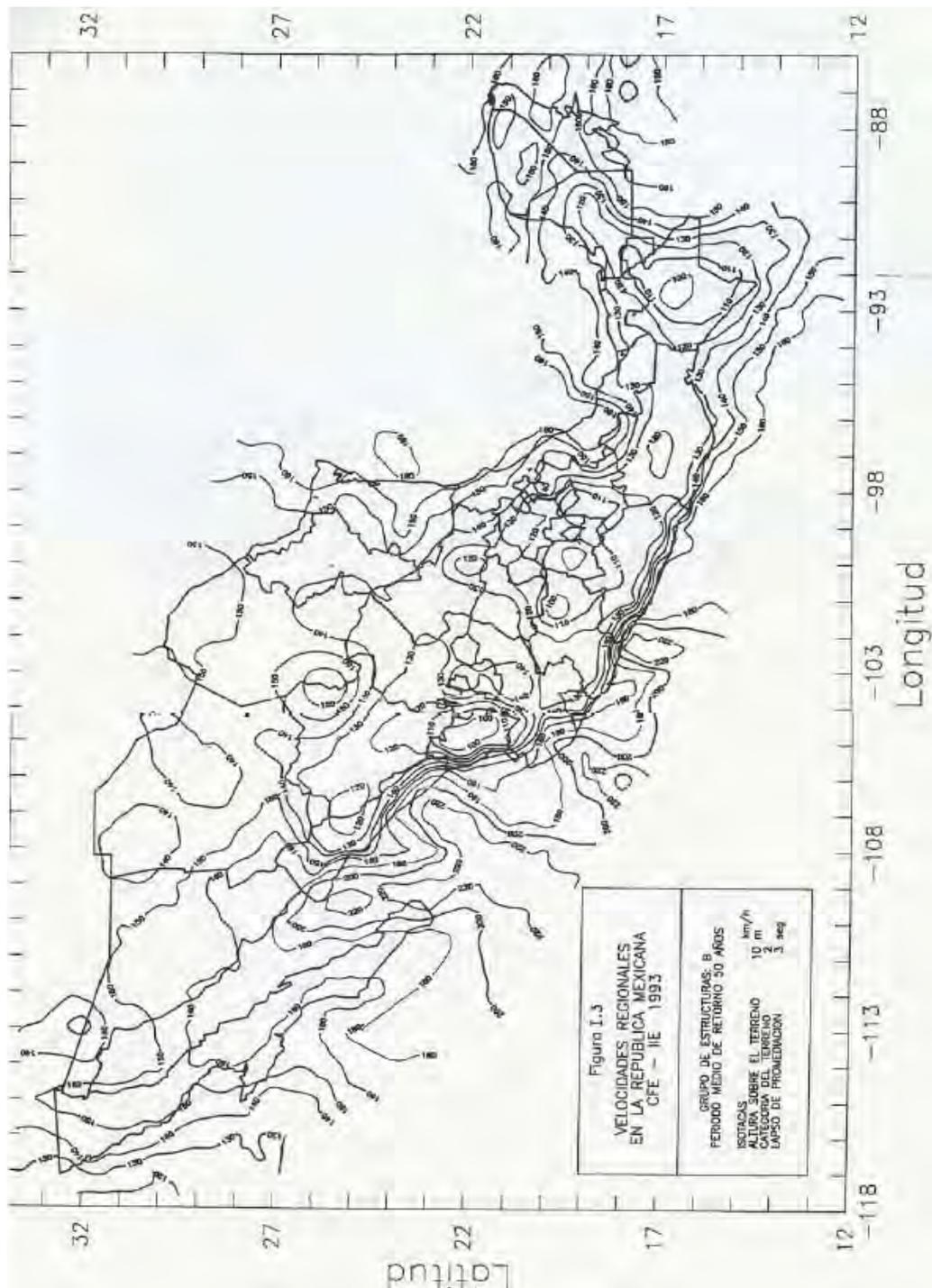


Figura 3.3. Velocidades regionales para un periodo de retorno de 50 años

### 3.3.6. Factor de Tamaño Fc

Factor que determina la influencia del tamaño de la construcción, toma en cuenta el tiempo en el que la ráfaga del viento actúa de manera efectiva sobre una construcción y puede determinarse de acuerdo a la siguiente tabla .3.6:

**Tabla.3.6. Factor de Tamaño Fc**

Clase de la Estructura	Fc
A	1.0
B	<b>0.95</b>
C	0.90

Como la clase de la estructura según su tamaño es B se ha determinado que  $F_c = 0.95$

### 3.3.7. Factor de Rugosidad y Altura Frz

Factor que establece la variación de la velocidad del viento con la altura H. Dicha variación está en función de la rugosidad del terreno y del tamaño de la construcción. Se obtiene de acuerdo a las ecuaciones 3.6 a 3.8.

$$Fr_z = 1.56 \left[ \frac{10}{\delta} \right]^\alpha \quad si H \leq 10 \quad (3.6)$$

$$Fr_z = 1.56 \left[ \frac{H}{\delta} \right]^\alpha \quad si 10 < H < \delta \quad (3.7)$$

$$Fr_z = 1.56 \quad si H \geq \delta \quad (3.8)$$

Donde:

$\delta =$	Altura gradiente
$\alpha =$	Exponente que determina la forma de la variación de la velocidad del viento con la altura

Ambos coeficientes se obtienen de la siguiente tabla:

**Tabla 3.7. Valores de  $\alpha$  y  $\delta$**

Categoría del Terreno	A			$\Delta$ (m)
	Clase de Estructura			
	A	B	C	
1	0.099	0.101	0.105	245
2	0.128	0.131	0.138	315
3	0.156	0.160	0.171	390
4	0.170	0.177	0.193	455

Como la categoría del terreno es 1, y la clase de la estructura es B se puede establecer que los valores para  $\alpha$  y  $\delta$  son 0.099 y 245 respectivamente. Por lo tanto como:

$$10 < H < \delta$$

$$10 < 21.245 < 245$$

Entonces se utiliza la **(3.7)**

$$Frz = 1.56 \left[ \frac{H}{\delta} \right]^\alpha$$

$$Frz = 1.56 \left[ \frac{21.245 m}{245 m} \right]^{0.101}$$

$$Frz = 1.218$$

Ya con los dos factores se procede a calcular el factor de exposición  $F_a$ :

$$F_a = F_c \cdot Frz$$

$$F_a = 0.95 \times 1.218 = 1.157$$

### 3.3.8. Factor de Topografía Local $F_t$

Este factor toma en cuenta el efecto topográfico local del sitio donde se instala la estructura. Se obtiene de la tabla

**Tabla 3.8. Factor de Topografía Local Ft**

Sitios	Topografía	Ft
Protegidos	Base de promontorios y faldas de serranías del lado de sotavento.	0.8
	Valles cerrados	0.9
Normales	Terreno prácticamente plano, campo abierto, ausencia de cambios topográficos importantes, con pendientes menores que 5%.	1.0
Expuestos	<b>Terrenos inclinados con pendientes entre 5 y 10 %, valles abiertos y litorales planos</b>	1.1
	Cimas de promontorios, colinas o montañas, terrenos con pendientes mayores que 10%, cañadas cerradas y valles que forman un embudo o cañón, islas.	1.2

Con base en la tabla se ha determinado un factor de topografía **Ft = 1.1**

### 3.3.9. Velocidad de Diseño

Con los datos anteriores se procede a calcular la velocidad de diseño  $V_D$ . La velocidad de diseño es la velocidad a partir de la cual se calculan los efectos del viento sobre la estructura o sobre un componente de la misma. Ésta obtiene de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$V_D = Ft \cdot Fa \cdot V_R$$

$$V_D = 1.1 * 1.157 * 130 \frac{km}{h} \quad (3.9)$$

$$V_D = 165.451 \frac{km}{h}$$

**Tabla.3.9. Valores obtenidos de análisis por viento**

ANÁLISIS DEL RECIPIENTE SOMETIDO A VIENTO		
Clasificación del grupo según su importancia	Grupo A	1
Según su tamaño	H/D	21.245/18.245=1.164
Tipo de terreno		1
Categoría del terreno		1
Según su tamaño	Grupo B	
Velocidad regional en Coatzacoalcos	$V_R =$ velocidad regional	130 km/h
Factor de exposición	$F\alpha = F_c * Fr_z$	1.157
Factor de tamaño	Por ser clase B	$F_c = 0.95$
Factor de rugosidad	$Fr_z = 1.56 [Z/\delta]^\alpha$	1.218
Clase B	$A = 0.101$	
Categoría 1	$\delta = 245$	
Factor de topografía lineal	$F_t$	1.1
G	$G=0.392\Omega/273+t$	$\Omega=760\text{mmHg}$
Temperatura promedio en Coatzacoalcos	$T = 26^\circ \text{C}$	
Velocidad de diseño	$V_D = F_t * F\alpha * V_R$	$V_D = 165.451 \text{ km/h}$
Presión dinámica en la base	$qz=0.0048GV_D^2$	131.0788137

**Tabla. 3.10 Análisis del comportamiento de la estructura a distintas alturas**

Secciones	Altura (m)	Factor de rugosidad (Fr <sub>z</sub> )	Factor de exposición (F <sub>α</sub> )	Velocidad de diseño (V <sub>D</sub> )	Presión dinámica en la base (q <sub>z</sub> )
2	4	1.12932469	1.07285846	153.4187594	112.5710304
3	6	1.12932469	1.07285846	153.4187594	112.5710304
4	8	1.12932469	1.07285846	153.4187594	112.5710304
5	10	1.12932469	1.07285846	153.4187594	112.5710304
6	12	1.15031327	1.09279761	156.2700577	116.7941938
7	14	1.16836289	1.10994475	158.722099	120.4881968
8	16	1.18422695	1.12501561	160.8772318	123.782394
9	18	1.19839875	1.13847881	162.80247	126.7627603
10	20	1.2112195	1.15065852	164.5441688	129.4895437
11	21	1.21720288	1.15634274	165.3570118	130.7720522

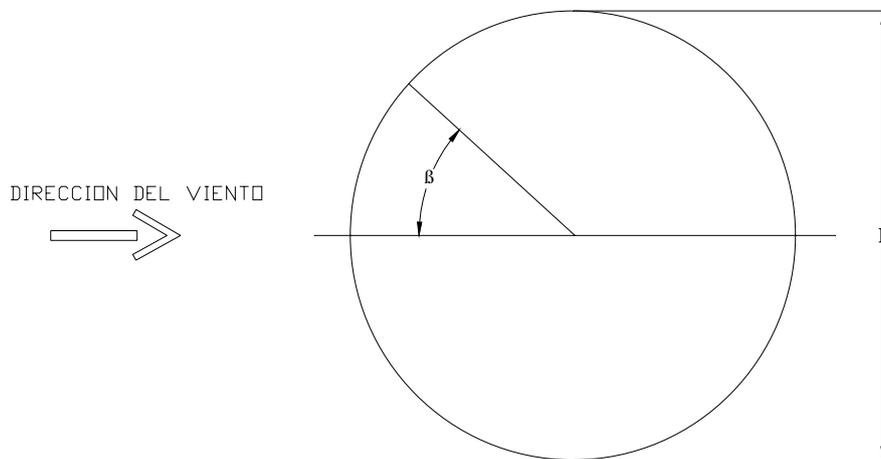
A continuación se muestra la tabla 3.11 en la cual se vaciaron los valores obtenidos de la aplicación de la ecuación 3.10. la cual nos sirve para la obtención de el coeficiente de de presión exterior ( $C_{pe}$ ), para las distintas variaciones según el ángulo de contacto con el viento.

$$C_{pe} = K_s C_{p1} \quad (3.10)$$

Donde:

$$C_{p1} = -0.5 + 0.4 \cos \beta + 0.8 \cos 2\beta + 0.3 \cos 3\beta - 0.1 \cos 4\beta - 0.05 \cos 5\beta \quad (3.11)$$

$\beta$  = es el ángulo entre la dirección del viento y un punto sobre la pared del silo o tanque circular (Ver Figura 3.4)

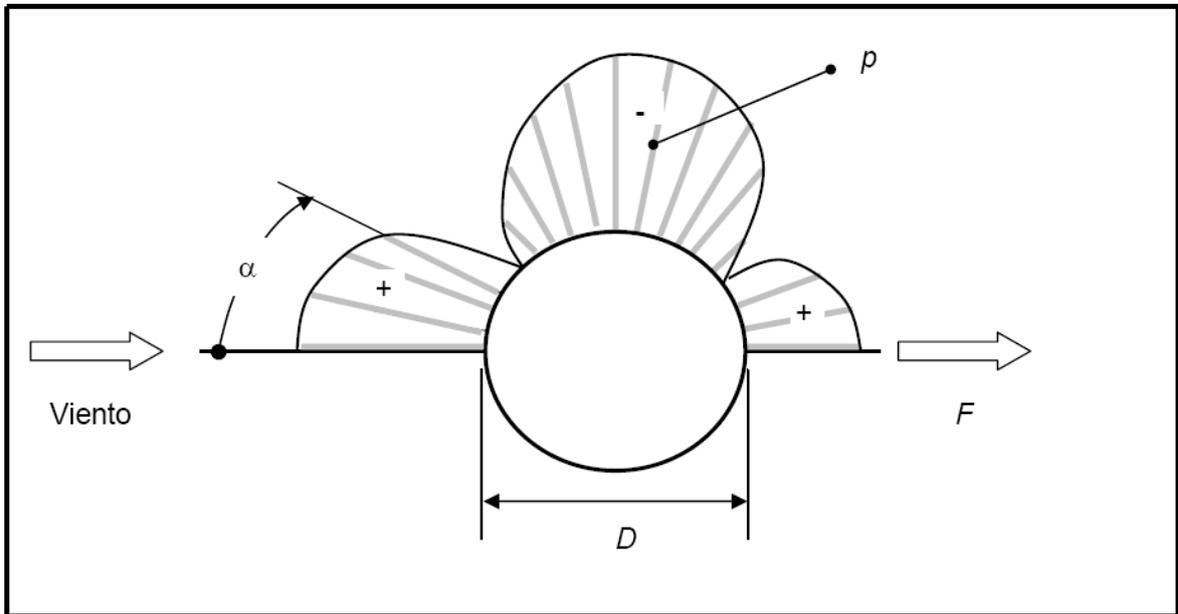


**Figura 3.4 Dirección de aplicación del viento en un elemento circular.**

**Tabla 3.11 Valores de coeficiente de presión exterior a distintas alturas**

B	Cp1	resultado a10m	resultado a 10.6m	Resultado a 14.76m	resultados 18.07m	Resultado a 19.99m
0	0.85	0.009568538	0.00958010	0.010351446	0.01078329	0.0110055
30	0.33971143	0.003824167	0.00382879	0.004137064	0.00430965	0.00439846
60	-0.975	-0.010975675	-0.0109889	-0.01187371	-0.01236906	-0.01262396
90	-1.4	-0.015759944	-0.015779	-0.01704944	-0.01776071	-0.0181267
120	-0.725	-0.0081614	-0.0081712	-0.00882917	-0.00919751	-0.00938704
150	-0.4397114	-0.004949877	-0.0049558	-0.00535488	-0.00557828	-0.00569323
180	-0.45	-0.005065696	-0.0050718	-0.00548017	-0.0057088	-0.00582644
210	-0.4397114	-0.004949877	-0.0049558	-0.00535488	-0.00557828	-0.00569323
240	-0.725	-0.0081614	-0.0081712	-0.00882917	-0.00919751	-0.00938704
270	-1.4	-0.015759944	-0.015779	-0.01704944	-0.01776071	-0.0181267
300	-0.975	-0.010975675	-0.0109889	-0.01187371	-0.01236906	-0.01262396
330	0.33971143	0.003824167	0.00382879	0.004137064	0.00430965	0.00439846
360	0.85	0.009568538	0.00958010	0.010351446	0.01078329	0.0110055

De los valores obtenidos en la tabla 3.11 se puede obtener la grafica de comportamiento que presentara el viento, que incide en la esfera (envolvente) a los distintos ángulos de afectación (ver figura 3.5)



**Figura 3.5 Comportamiento del viento sobre la envolvente (esfera).**

### **3.4. FUERZA HORIZONTAL DEBIDA A SISMO**

Para el análisis de la estructura sometida a cargas debidas a sismo se tiene que llevar una metodología similar a la forma de estudio de la estructura sometida a cargas debidas a viento. Por lo cual trataremos de desarrollarlo a continuación:

#### **3.4.1 Clasificación de las construcciones según su destino**

**GRUPO A** Estructuras que requieren un grado de seguridad alto.

**Construcciones cuya falla estructural causaría la pérdida de un número elevado de vidas o pérdidas económicas o culturales de magnitud excepcionalmente alta o que constituyan un peligro significativo por contener sustancias tóxicas o inflamables, así como construcciones cuyo funcionamiento sea esencial a raíz de un sismo.**

**GRUPO B** Estructuras que requieren de un grado de seguridad intermedio

Construcciones cuya falla estructural ocasionaría pérdidas de magnitud intermedia o pondría en peligro otras construcciones de este tipo o del A, tales

como naves industriales, locales comerciales, estructuras comunes destinada a vivienda u oficinas, entre otras.

**GRUPO C** Estructuras que requieren un grado de seguridad bajo

Construcciones cuya falla estructural ocasionaría pérdidas de magnitud sumamente pequeña y no causaría normalmente daños a las estructuras de los grados A y B ni pérdidas de vidas.

### **3.4.2 Clasificación de construcciones según su estructuración**

Atendiendo a las características estructurales que influyen en la respuesta sísmica de la estructura las construcciones se clasifican según su estructuración como se indica a continuación.

**Tipo 1** Estructuras de edificios: Estructuras comunes tales como edificios urbanos naves industriales típicas, salas de espectáculos y estructuras semejantes.

**Tipo 2** Péndulos invertidos y apéndices: péndulos invertidos o estructuras en que 50% o mas de su masa se halle en el extremo superior y tenga un solo elemento resistente en dirección de análisis o una sola hilera de columnas perpendicular a esta. Apéndices o elementos cuya estructuración difiera radicalmente de la del resto de la estructura, tales como tanques, parapetos pretilas, anuncios, ornamentos, ventanales, muros y revestimientos, entre otros.

**Tipo 3** Muros de retención

**Tipo 4** Chimeneas, silos y similares: chimeneas y silos o estructuras semejantes en que la masa y rigidez se encuentren distribuidas continuamente a lo largo de su altura y donde se dominen las deformaciones por flexiones.

**Tipo 5** Tanques depósitos y similares: tanques elevados y depósitos superficiales, o estructuras semejantes destinadas al almacenamiento de líquidos que originan importante fuerzas hidrodinámicas sobre el recipiente.

**Tipo 6** Estructuras industriales

- Tipo 7**      Puentes
- Tipo 8**      Tuberías
- Tipo 9**      Presas.
- Tipo 10**    Otras estructuras.

### 3.4.3 Regionalización sísmica.

Con base en el estudio de riesgo sísmico, se encontró que para fines de diseño sísmico la República Mexicana se considera dividida en cuatro zonas, según se indica en la figura 3.6.

Las fronteras entre zonas coinciden con curvas de igual aceleración máxima del terreno; la zona A es la de menor intensidad sísmica, mientras que la de mayor es la de zona D.



**Figura.3.6 Regionalización Sísmica de la República Mexicana**

### 3.4.4. Espectros de diseño sísmico.

Las ordenadas del espectro de aceleraciones para el diseño sísmico, **a**, expresadas como fracción de la aceleración de la gravedad, están dadas por las siguientes expresiones:

$$a = a_0 + (c - a_0) \frac{T}{T_a}; \text{ si } T < T_a \quad (3.12)$$

$$a = c; \text{si } T_a \leq T \leq T_b \quad (3.13)$$

$$a = c \left[ \frac{T_b}{T} \right]^r; \text{si } T > T_b \quad (3.14)$$

Donde

**a<sub>0</sub>** Es el coeficiente de aceleración del terreno

**c** El coeficiente sísmico.

**T** El periodo natural de interés

**T<sub>a</sub> y T<sub>b</sub>** Son dos periodos característicos que delimitan la meseta.

**r** Un exponente que define la parte curva del espectro de diseño. Los valores de estos parámetros se consignan en la tabla 3.13 para las diferentes zonas sísmicas y los distintos tipos de terreno de cimentación en la tabla 3.12.

**Tabla 3.12. Clasificación de los terrenos de acuerdo a su rigidez.**

I	Terrenos firmes; como tepetate, arenisca medianamente cementada, arcilla muy compacta o suelo con características similares.
II	Suelo de baja rigidez; como arenas no cementadas o limos de mediana o alta compacidad, arcillas de mediana compacidad o suelos de características similares.
III	<b>Arcillas blandas muy compresibles.</b>

**Tabla 3.13. Espectros de diseño sísmico para estructuras del grupo B**

Zona sísmica	Tipo de suelo	a <sub>0</sub>	C	T <sub>a</sub> (s)	T <sub>b</sub> (s)	R
A	I	0.02	0.08	0.2	0.6	½
	II	0.04	0.16	0.3	1.5	2/3
	III	0.05	0.20	0.6	2.9	1
B	I	0.04	0.14	0.2	0.6	½
	II	0.08	0.30	0.3	1.5	2/3
	III	<b>0.10</b>	<b>0.36</b>	<b>0.6</b>	<b>2.9</b>	<b>1</b>
C	I	0.36	0.36	0.0	0.6	½
	II	0.64	0.64	0.0	1.4	2/3
	III	0.64	0.64	0.0	1.9	1
D	I	0.50	0.50	0.0	0.6	½
	II	0.86	0.86	0.0	1.2	2/3
	III	0.86	0.86	0.0	1.7	1

Los espectros de diseño especificados son aplicables a estructuras del grupo B. para estructuras del grupo A, los valores de las ordenadas espectrales deberán de multiplicarse por 1.5, a fin de tener en cuenta la importancia de la estructura.

De acuerdo con la estructura que se esta analizando es considerada como un péndulo invertido se considera dentro de las estructuras tipo 2: Péndulos Invertidos y apéndices.

#### **3.4.5. Estructuras tipo 2: Péndulos Invertidos y Apéndices.**

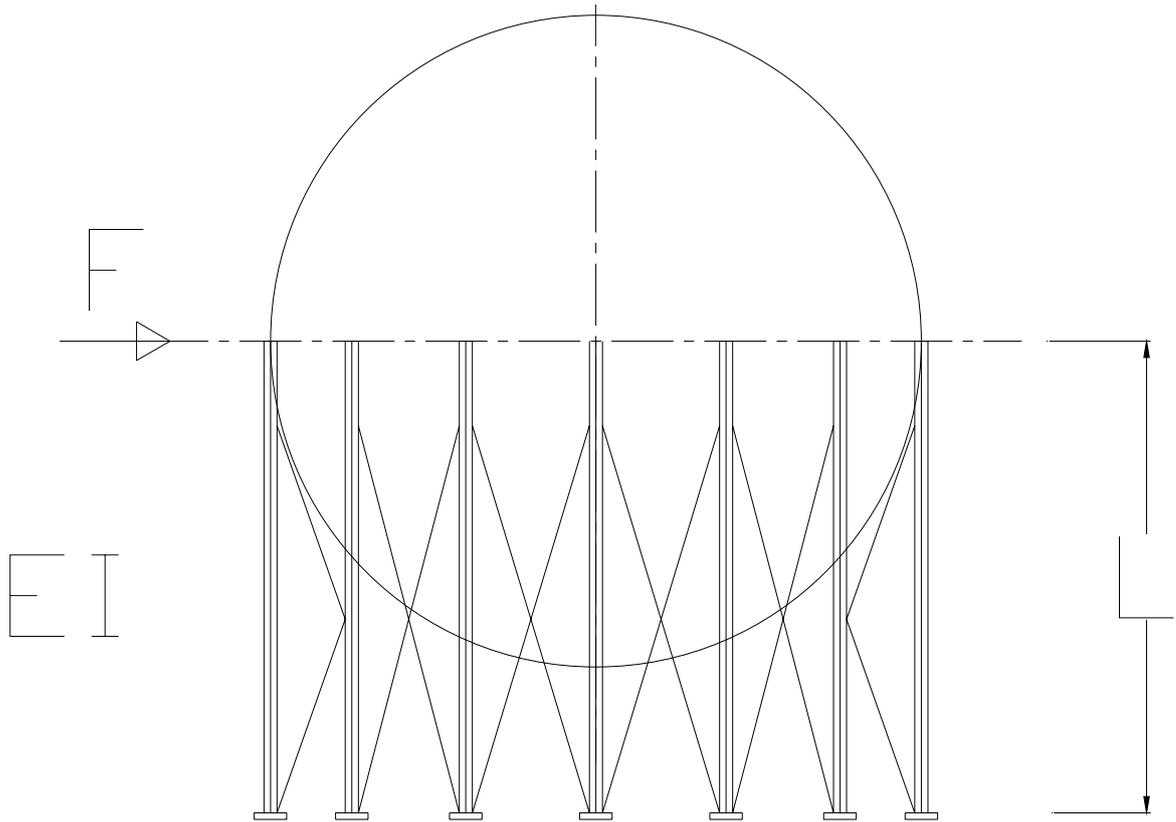
Para el análisis sísmico de péndulos invertidos y estructuras con apéndices serán aplicables todas las disposiciones, procedentes estipuladas para estructuras de edificios, con la salvedad de que en el análisis estático de péndulos invertidos no se permite reducción de la fuerza cortante en función del periodo fundamental ni reducción del momento de volteo.

Como se menciona en el párrafo anterior el péndulo invertido será considerado como una estructura de edificio, para hacer el análisis se tiene que seleccionar el tipo de análisis a realizar. Dentro de los que se puede recurrir a tres métodos: a) método simplificado, b) análisis estático, c) análisis dinámico.

El método simplificado solo se aplica a ciertas estructuras con altura no mayor de 13m. Las estructuras que no pasen de 60m de alto se pueden con el método estático. Para las alturas superiores a 60m es forzoso aplicar un método dinámico.

Con base en la zona sísmica "B", y al tipo de suelo "III" podemos determinar el coeficiente sísmico C, el cual es 0.36

Considerando la esfera como un péndulo invertido se calcula la rigidez de las columnas, con las condiciones a las que serán sometidas durante su vida útil, para lo cual se selecciono la figura 3.7 y las ecuaciones de rigidez de un péndulo invertido, periodo y frecuencia para fines de ver el comportamiento que tendrán las columnas dentro de un sismo con respecto a su peso y la aceleración que podrá tener debido a su posición geográfica.



**Figura. 3.7 Rigidez de un péndulo invertido**

Al haber considerado a la esfera con lleva a que se tengan que utilizar las ecuaciones para un péndulo invertido como son: rigidez, frecuencia y periodo natural.

$$k = \frac{3EI}{l^3} \quad (3.12)$$

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (3.13)$$

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}} \quad (3.14)$$

Donde:

- E** = Modulo de young
- I** = Momento polar de inercia de las columnas
- L** = Longitud total de las columnas
- F** = Fuerza aplicada a la esfera
- K** = Rigidez de las columnas
- m** = Masa de la esfera

- f** = Frecuencia natural de la esfera  
**T** = Periodo natural de la esfera

Considerando que la esfera se encontrara en diversas condiciones se realizaran las operaciones considerando a la esfera dentro de peso propio y en operación, los resultados de aplicar las ecuaciones anteriores serán mostrados en la tabla 3.14a y b.

**Tabla 3.14 a Tabla de valores en condiciones de peso propio**

<b>K = rigidez de la columna</b>	375.777 kg/cm
<b>E = modulo de elasticidad</b>	2100000 kg/cm <sup>2</sup>
<b>I = momento polar</b>	106325 cm <sup>4</sup>
<b>L=longitud de columna</b>	1212.5 cm
<b>Frecuencia</b>	0.60 hertz
<b>Periodo natural</b>	1.66 s

**Tabla 3.14 a Tabla de valores en condiciones de operación**

<b>K = rigidez de la columna</b>	375.777 kg/cm
<b>Masa en operación</b>	2861.36 kg s <sup>2</sup> /cm
<b>E = modulo de elasticidad</b>	2100000 kg/cm <sup>2</sup>
<b>I = momento polar</b>	106325 cm <sup>4</sup>
<b>L=longitud de columna</b>	1212.5 cm
<b>Frecuencia (ω)</b>	0.199 Hertz
<b>Periodo natural</b>	5.025 s

Una vez obtenidos los valores que afectan la estructura podemos determinar también el comportamiento que presentara durante un sismo con ayuda de la ecuación 3.15, la cual nos indica la máxima aceleración que pueden presentar las estructuras que se encuentran en la zona sísmica B

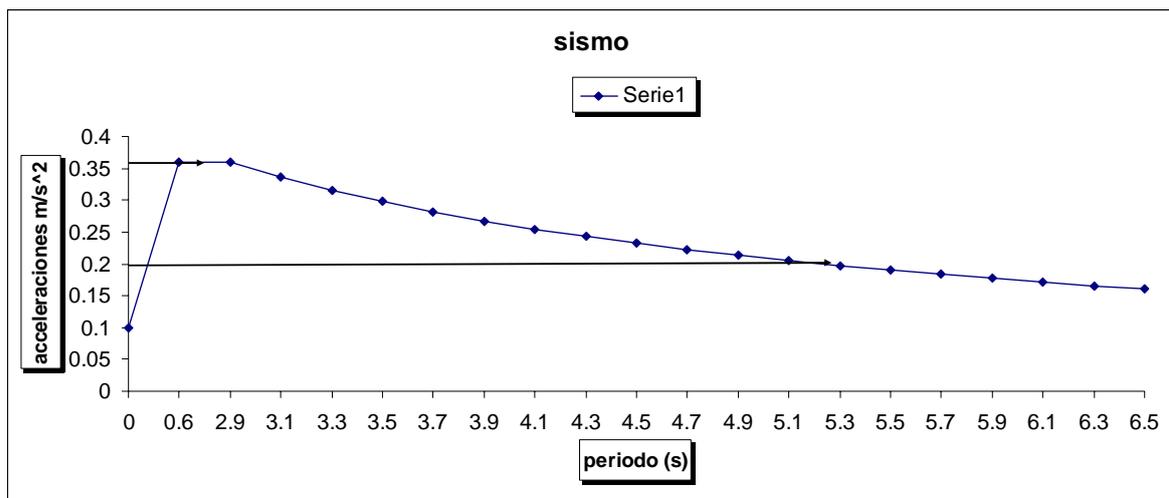
$$a = c \left[ \frac{Tb}{T} \right]^r ; si T > Tb \quad (3.15)$$

Donde:

- a** = aceleración
- T** = Periodo natural de interés.
- T<sub>b</sub>** = Periodo característico que limita la meseta
- r** = Es un exponente de diseño que define la parte curva del espectro.

Para este caso que el análisis esta dentro de la zona B se ocupara la tabla 3.13 de la cual se obtendrán los factores necesarios para la continuación del análisis de la estructura debido a sismo.

De los datos obtenidos en la tabla 3.13 y aplicando la ecuación 3.15 se obtiene una grafica que muestra el espectro de diseño para las estructuras que se encuentran dentro de la zona B del país. (Ver figura 3.8)



**Figura 3.8. Espectro de diseño para la estructura en la zona sísmica B**

Dentro de la figura 3.8 se muestran unas flechas las cuales indican la aceleración a la que estará sometida la esfera dentro de las distintas condiciones de funcionamiento como son:

- a) Condición de peso propio
- b) Condición de operación

Para mostrar las diferencias que existen entre las condiciones analizadas nos apoyaremos de la tabla 3.15 en donde se muestran los valores obtenidos de las distintas consideraciones.

**Tabla 3.15 Valores para obtener la fuerza ejercida respecto a sismo**

<b>Masa de la esfera en peso propio</b>	312.94 kg s <sup>2</sup> /cm
<b>Masa de la esfera en operación</b>	2861.36 kg s <sup>2</sup> /cm
<b>Coefficiente sísmico en peso propio</b>	0.36
<b>Coefficiente sísmico en operación</b>	0.2
<b>Fuerza horizontal por sismo sobre las 12 columnas en peso propio</b>	Peso propio *cs = 110520 kg
<b>Fuerza horizontal por sismo sobre las 12 columnas en operación</b>	Peso en operación *cs = 2861.36 kg
<b>Fuerza horizontal sobre una columna en condición de peso propio</b>	(110520/12) = 9210 kg
<b>Fuerza horizontal sobre una columna en condición de operación</b>	(2861.36/12) = 238.41 kg

Una vez obtenida la fuerza horizontal debida a sismo se procede a comparar con la fuerza obtenida debido viento y solo se debe de ocupar la fuerza horizontal mayor ya que resulta muy difícil que ambas condiciones se presenten al mismo tiempo, esto da como resultado que la fuerza aplicada por sismo es la mayor de las fuerzas vivas que se pueden presentar en el equipo durante su vida útil.

### **3.5 DISEÑO DE LAS COLUMNAS.**

Considerando que las columnas no están sujetas a presión interna o en contacto con el fluido a almacenar se utilizara acero estructural (SA-36). Con ayuda de el manual diseño básico de estructuras de acero obtenemos las siguientes formulas las cuales deben ser aplicadas en columnas bajo cargas axiales

$$C_c = \sqrt{\frac{2\pi^2 E}{F_y}} \quad (3.16)$$

$$F_a = \left[ 1 - \frac{(Kl/r)^2}{2C_c^2} \right] \frac{F_y}{FS} \quad (3.17)$$

En donde:

$$FS = \frac{5}{3} + \frac{3}{8Cc} \left( \frac{Kl}{r} \right) - \frac{1}{8Cc^3} \left( \frac{Kl}{r} \right)^3 \quad (3.18)$$

Donde:

**Cc** Columna

**r** radio de giro del perfil asignado.

**K** Factor de longitud efectiva (ver figura 3.9)

**L** longitud de la columna

**Fy** Resistencia a la fluencia del acero estructural (SA-36)

**KL/r** relación de esbeltez.

	A	B	C	D	E
LA FORMA PANDEADA DE LA COLUMNA SE INDICA CON LA LINEA INTERRUPTIDA.					
VALOR TEÓRICO DE K.	1.0	0.5	0.7	1.0	2.0
VALORES RECOMENDADOS PARA DISEÑO.	1.0	0.65	0.8	1.2	2.0

**Figura 3.9. Factores de longitud efectiva**

Ahora continuamos con la aplicación de la ecuación 3.16

$$Cc = \sqrt{\frac{2\pi^2 E}{Fy}} = \sqrt{\frac{2 * \pi^2 * 2100000}{2530}} = 128$$

Cuando  $KL/r < Cc$ . (3.19)

**KL/r** 1212.25/21.12=57.39

Aplicando la desigualdad de la ecuación 3.19 obtenemos que se deben de ocupar las formulas siguientes: para poder obtener el esfuerzo permisible de compresión ecuación 3.15 y el factor de seguridad ecuación 3.16.

$$F_a = \left[ 1 - \frac{(Kl/r)^2}{2C_c^2} \right] \frac{F_y}{FS}$$

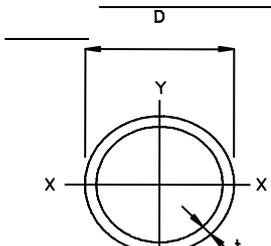
En donde:

$$FS = \frac{5}{3} + \frac{3}{8C_c} \left( \frac{Kl}{r} \right) - \frac{1}{8C_c^3} \left( \frac{Kl}{r} \right)^3$$

Ahora se procede a encontrar un perfil adecuado para soportar el esfuerzo actuante y para eso se debe de hacer una serie de comparaciones en la que se determine el perfil que tenga un esfuerzo permisible a compresión que sea mayor al esfuerzo actuante sobre el área transversal, para esto nos apoyaremos del manual de construcción en acero (IMCA).

Para nuestro diseño obtuvimos de la aplicación de las ecuaciones anteriores una columna circular la cual cumple con las condiciones de que el esfuerzo permisible a compresión sea mayor que el esfuerzo actuante en donde obtuvimos estos resultados.

Columna de acero estructural SA-36(ver Figura 3.10)



**OC**  
**TUBO CIRCULAR**  
**DIMENSIONES Y PROPIEDADES**

Designación <i>D x t</i>		Diametro nominal	Diametro interior	Peso	Area	Ejes X-X y Y-Y		
						<i>I</i>	<i>S</i>	<i>r</i>
mm x mm	in. x in.	in.	mm	kg/m	cm <sup>2</sup>	cm <sup>4</sup>	cm <sup>3</sup>	cm
610 x 6.35	24 x 0.250	24	597.3	94.53	120.42	54857.4	1798.6	21.3
x 9.53	x 0.375		590.94	141.12	179.77	81045.4	2657.2	21.2
x 12.7	x 0.500		584.6	187.07	238.31	106325.0	3486.1	21.1

**Figura 3.10. Perfil de acero estructural SA-36**

De diámetro de **24"=60.96cm**

Espesor (t) de **.5"=12.7cm**

Área transversal= **238.31cm<sup>2</sup>**

Radio de giro (r)=**21.12cm**

En donde se obtiene los siguientes esfuerzos.

**Fa=1247.91kg/cm<sup>2</sup>** (esfuerzo permisible).

**fa=974.4415kg/cm<sup>2</sup>** (esfuerzo actuante )

En donde:

Fa>fa

Por ende el perfil es adecuado para soportar el peso de la esfera en condiciones de operación.

### **3.6 DISEÑO DE CONTRAVENTEOS**

Una vez determinadas las columnas que soportaran al equipo en condiciones de operación y durante la prueba hidrostática pero ahora se tiene que obtener los tensores que se encargaran de transmitir las cargas horizontales ya sea de fuerzas de acuerdo a sismo o viento el cual sea mayor de acuerdo con lo obtenido anteriormente por esta razón se utilizara la fuerza horizontal de sismo ya que es mayor que la de viento.

La forma de obtener los tensores es con ayuda de las siguientes ecuaciones, para 12 columnas y serán mostradas las dimensiones a las que deben de estar de las columnas y su separación entre ellas en las figura 3.10

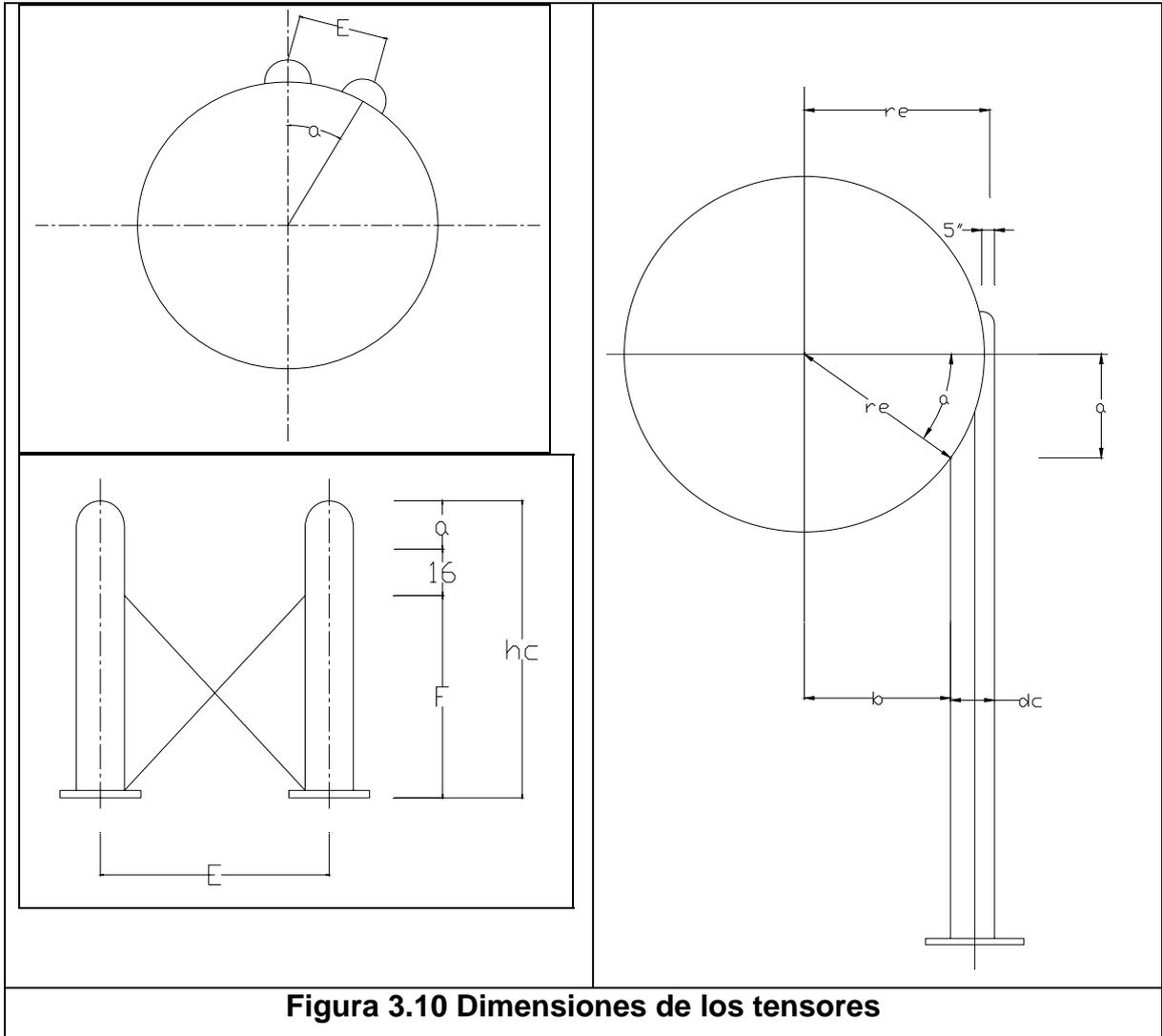
Ángulo entre las columnas (ver figura 3.10)

$$\alpha/12 \quad (3.20)$$

$$r_e = R + t \quad (3.21)$$

Distancia entre las columnas (ver figura 3.10)

$$E = 2r_e \frac{\alpha}{2} \quad (3.22)$$



**Figura 3.10 Dimensiones de los tensores**

Altura del tensor es la distancia **F**

Distancia **b** (ver figura 3.10)

$$b = r_e \frac{3}{4} dc \quad (3.23)$$

Distancia **a** (ver figura 3.10)

$$a = \sqrt{r_e^2 - b^2} \quad (3.24)$$

Distancia **F** (ver figura 3.10)

$$F = hc - (a + 16) \quad (3.25)$$

Donde:

$r_e$  = radio exterior

$h_c$  = altura de las columnas

$d_c$  = diámetro de las columnas

Una vez obtenidas la distancias que deben de tener los contraventeos ahora se debe de obtener el perfil del tensor el cual tiene que soportar la fuerza horizontal mayor que para nuestro análisis es debida a sismo para lo cual es necesario descomponer la fuerza horizontal en las fuerzas sobre el contraventeo como se muestra en la figura 3.11

Donde:

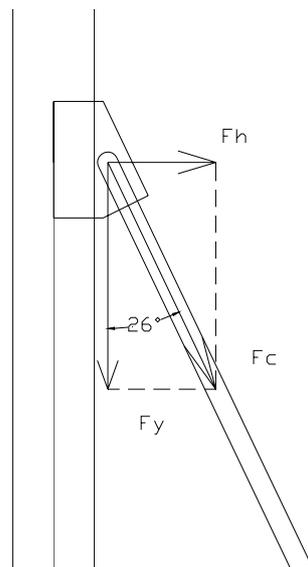
$F_h$  = es la fuerza horizontal

$F_c$  = es la fuerza ejercida sobre el contraventeo

$$F_c = F_h / \cos \theta \quad (3.26)$$

$F_y$  = es la fuerza en el eje y

$$F_y = F_h / \tan \theta \quad (3.27)$$



**Figura 3.11 Descomposición de la fuerza horizontal**

Se continúa obteniendo el área que tendrá el contraventeo para soportar la fuerza horizontal con ayuda de la siguiente ecuación.

$$A = \frac{F}{\text{esfuerzo}} \quad (3.28)$$

Donde:

**F** = será igual a la fuerza ejercida sobre el contraventeo

**Esfuerzo** = .8 FY (acero SA 36)

Donde:

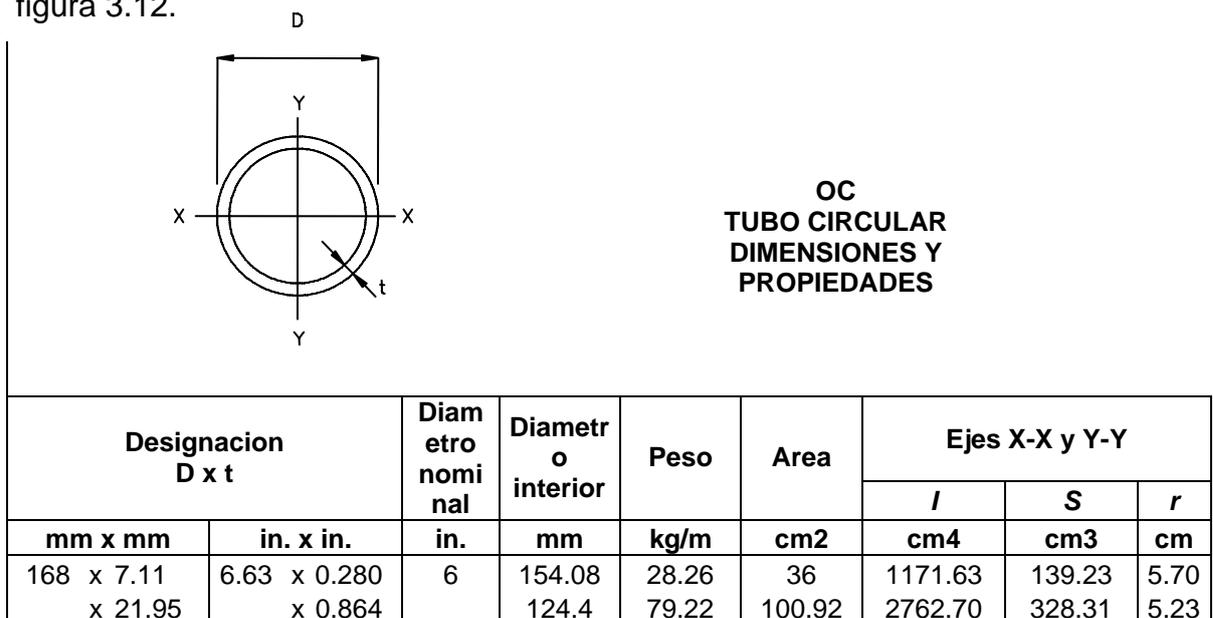
**FY** resistencia a la fluencia.

**.8** factor de seguridad.

Usando la ecuación 3.28 se obtiene el área transversal que tiene que tener el contraventeo.

$$A = \frac{223067.2536}{2530 * .8} = 110.21 \text{cm}^2$$

Ahora con el área transversal obtenida se encuentra el perfil adecuado para soportar la fuerza que será ejercida sobre el contraventeo la cual se muestra en la figura 3.12.



**Figura 3.12. Perfil propuesto para los contraventeos**

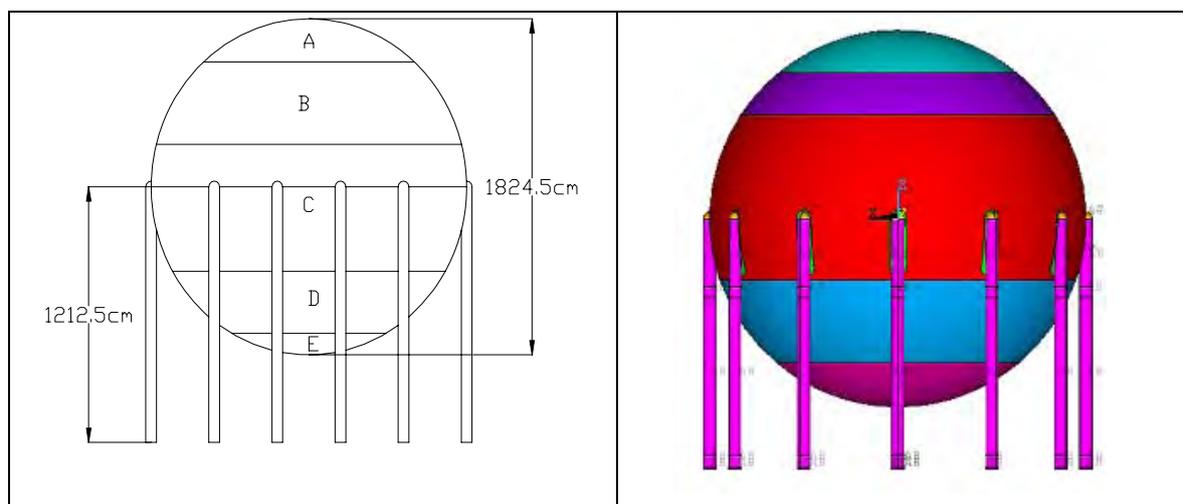
## CAPITULO 4

### ANÁLISIS DE LA ESFERA

#### 4.1 Modelado de la esfera dentro del programa ANSYS

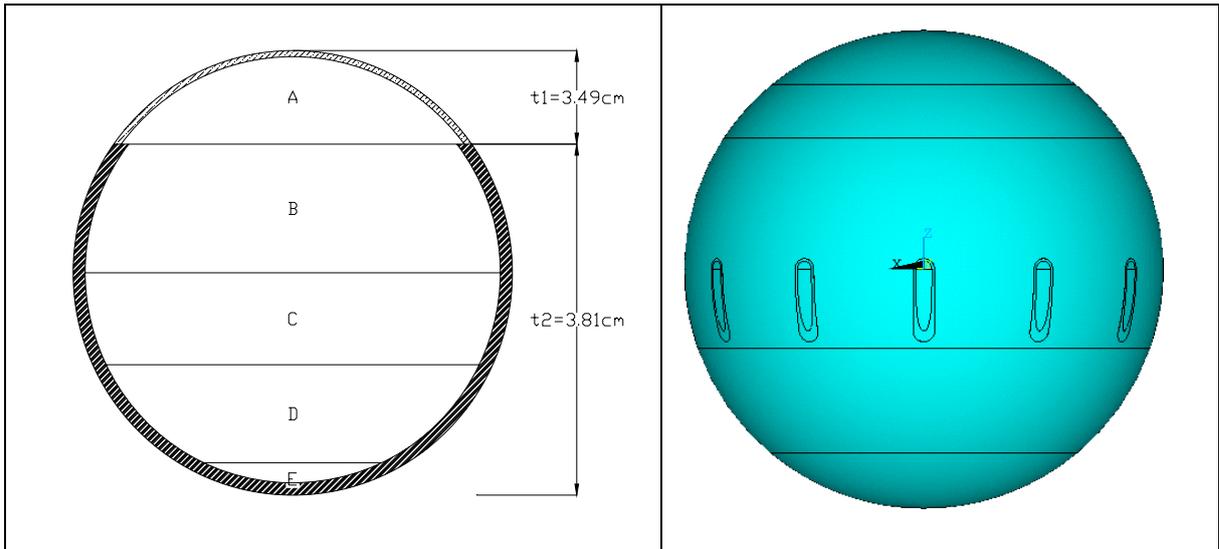
Para realizar el análisis de la esfera, se utilizó el método de los elementos finitos haciendo uso del programa ANSYS 11.0, por consiguiente se tiene que realizar el modelo dentro de la interfase del programa.

El modelo está compuesto de figuras básicas pero con dimensiones reales que se obtuvieron en el capítulo dos como son diámetro, altura de las columnas, división de la esfera, también se considera el área transversal de las columnas propuesto dentro del capítulo tres, también los contraventeos, el modelo obtenido se muestra en la figura 4.1.



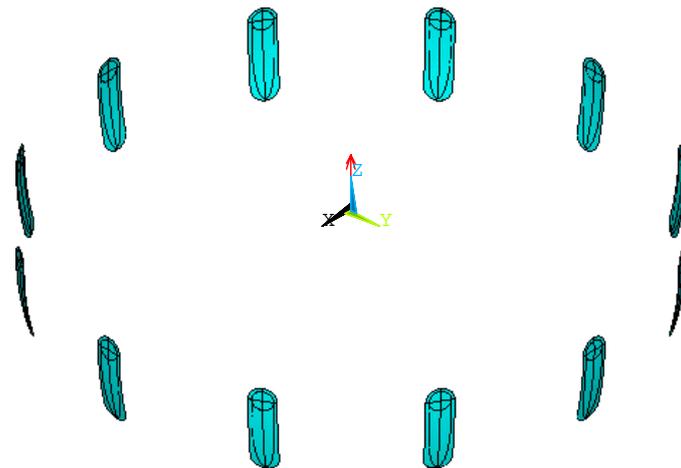
**Figura 4.1 Modelo terminado y comparación con las dimensiones reales**

Una vez terminado el modelo se tiene que proceder a aplicar las propiedades, geométricas y mecánicas como son: densidades, espesores, el módulo de elasticidad y el módulo de Poisson. Para realizar este procedimiento se tiene que separar en áreas debido a que no todas las áreas tendrán el mismo espesor o densidad, por ejemplo en la parte de la esfera existen tres diferentes espesores debido a que los resultados obtenidos en el capítulo dos se consideraron dos diferentes espesores del cuerpo de la esfera para esto está basado en las divisiones de la esfera y se muestra el resultado final después de aplicar los espesores obtenidos en la figura 4.2.



**Figura 4.2 Esfera con diferentes espesores**

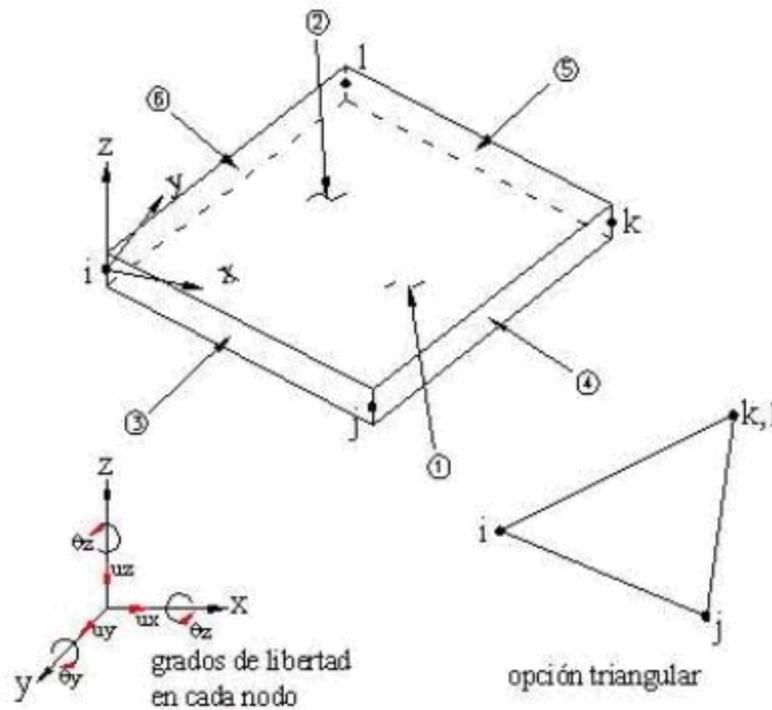
Como se puede observar dentro de la esfera existen las uniones con las piernas lo cual se tiene que separar del cuerpo de la esfera debido a que para hacer la unión de dos espesores distintos por esta razón se asignara otro espesor, para esto se considera el espesor de la zona de la esfera en donde se encuentran situados mas en espesor adecuado para hacer la unión de las piernas y la esfera, en la figura 4.3 se muestran las intersecciones a las cuales se les aplico un espesor distinto.



**Figura 4.3 Parches de refuerzo.**

Ahora se le asignara el elemento adecuado para que el análisis sea correcto, dentro de la librería del programa ANSYS se encuentran distintos

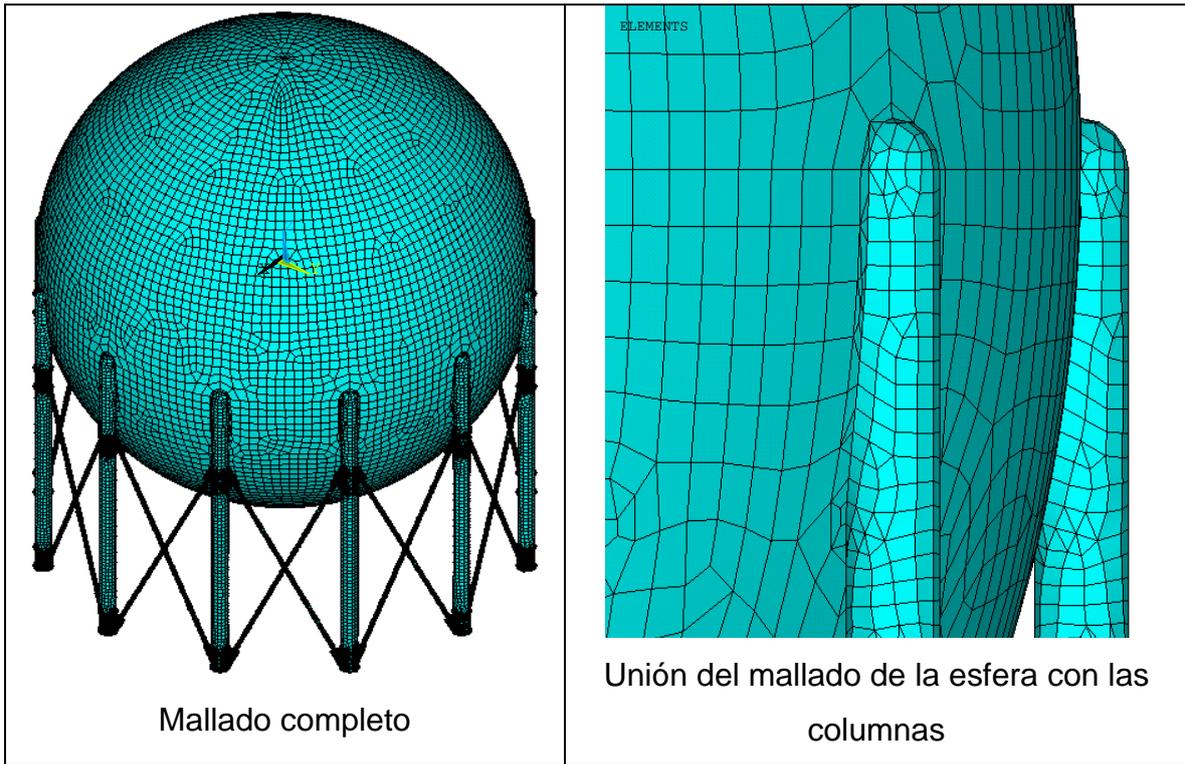
elementos pero que tienen distintas características y comportamientos, para el caso de cascarones se debe de aplicar el elemento llamado Shell 63 ya que es el que tiene un comportamiento adecuado para el tipo de análisis que se desea hacer ver figura 4.4



**Figura 4.4. Elemento Shell 63**

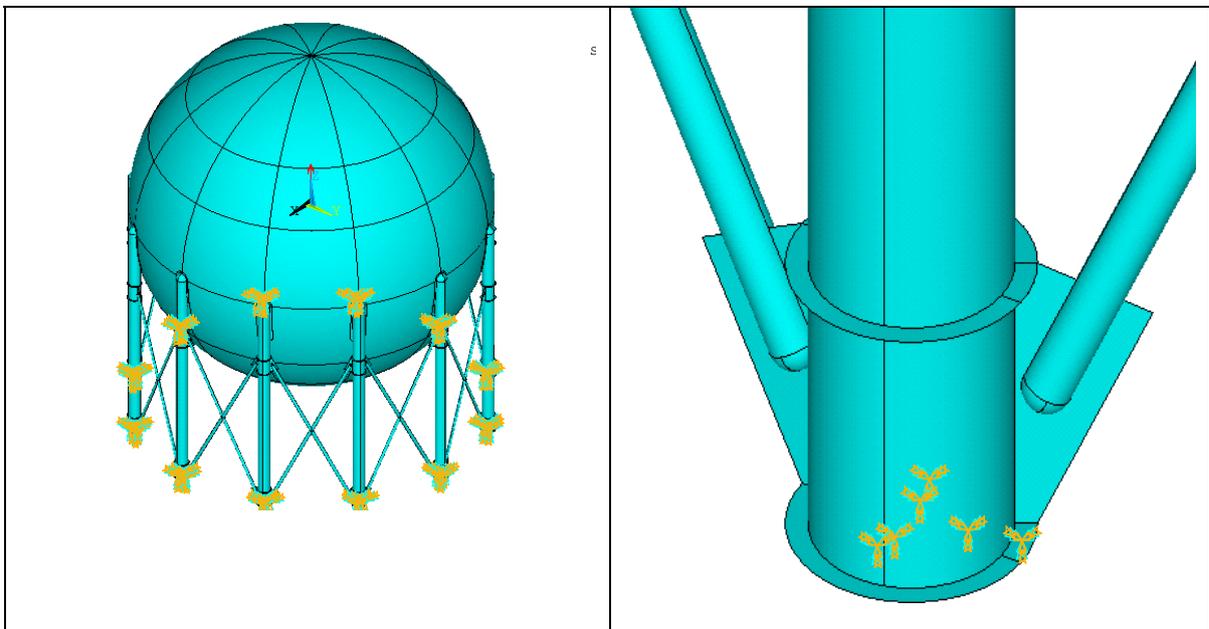
El elemento tiene seis grados de libertad en cada nodo: traslaciones en las direcciones de los nodos X, Y y Z y rotaciones nodales sobre los ejes X, Y y Z.

Una vez seleccionado el elemento a emplearse, se tienen que mallar el modelo (consiste en dividir el modelo en pequeños elementos) el cual tendrá distintos tamaños según la parte de la geometría en la que se dese tener menos elementos; por ejemplo en la parte de la esfera se le asigno un tamaño de malla mayor al de las columnas como se muestra en la figura 4.5, el mallado se tiene que hacer de distintos tamaños para poder observar mejor comportamiento en las secciones de interés como lo son las uniones del cuerpo con las columnas.



**Figura 4.5 Mallado de la esfera**

Una vez terminado el modelo se tienen que aplicársele las condiciones de frontera ya que se tiene que restringir las columnas, y también aplicar las cargas externas que afectaran el modelo para poder comenzar el análisis ver figura 4.6.



**Figura 4.6 Condiciones de frontera.**

Una vez finalizada la aplicación de las condiciones de frontera se realizaran con los análisis, como lo son:

- a) Peso propio.
- b) Vacío (presión exterior).
- e) Condición de operación.  
Presión interior mas el peso del acero mas el peso del fluido
- c) Prueba hidrostática.  
Presión interior mas el peso del acero mas el peso de la esfera  
llena de agua
- d) Condiciones de viento en operación  
Sobre el eje X  
Sobre el eje Y  
Sobre el eje XY
- e) Condiciones de sismo en operación  
Sobre el eje X  
Sobre el eje Y  
Sobre el eje XY

#### **4.2 ANÁLISIS CON RESPECTO AL PESO PROPIO DE LA ESFERA**

Dentro de este análisis solo se considera el peso del acero de toda la esfera sin considerar ninguna presión o fuerza que altere el comportamiento de la esfera, es necesario este análisis para observar el comportamiento de la esfera cuando se encuentre vacía. El resultado del análisis es mostrado en la figura 4.7 se muestra el esfuerzo máximo y en la figura 4.8 se muestra la deformación máxima que podría sufrir la esfera cuando se encuentre sometida a esta condición.

1  
NODAL SOLUTION  
STEP=1  
SUB =1  
TIME=1  
SEQV (AVG)  
DMX =.048169  
SMX =293.897

ANSYS  
SEP 24 2009  
19:22:26

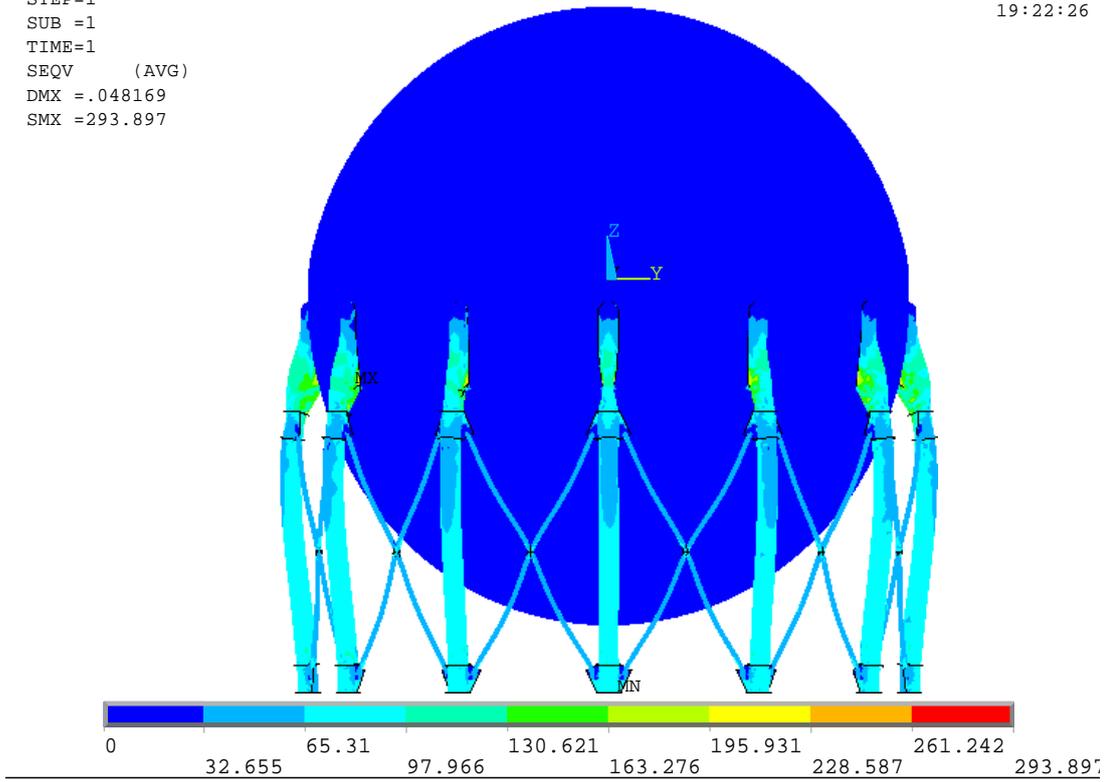


Figura 4.7 Esfuerzo máximo.

1  
NODAL SOLUTION  
SUB =1  
TIME=1  
USUM (AVG)  
RSYS=0  
DMX =.048169  
SMX =.048169

ANSYS  
SEP 30 2009  
16:54:30

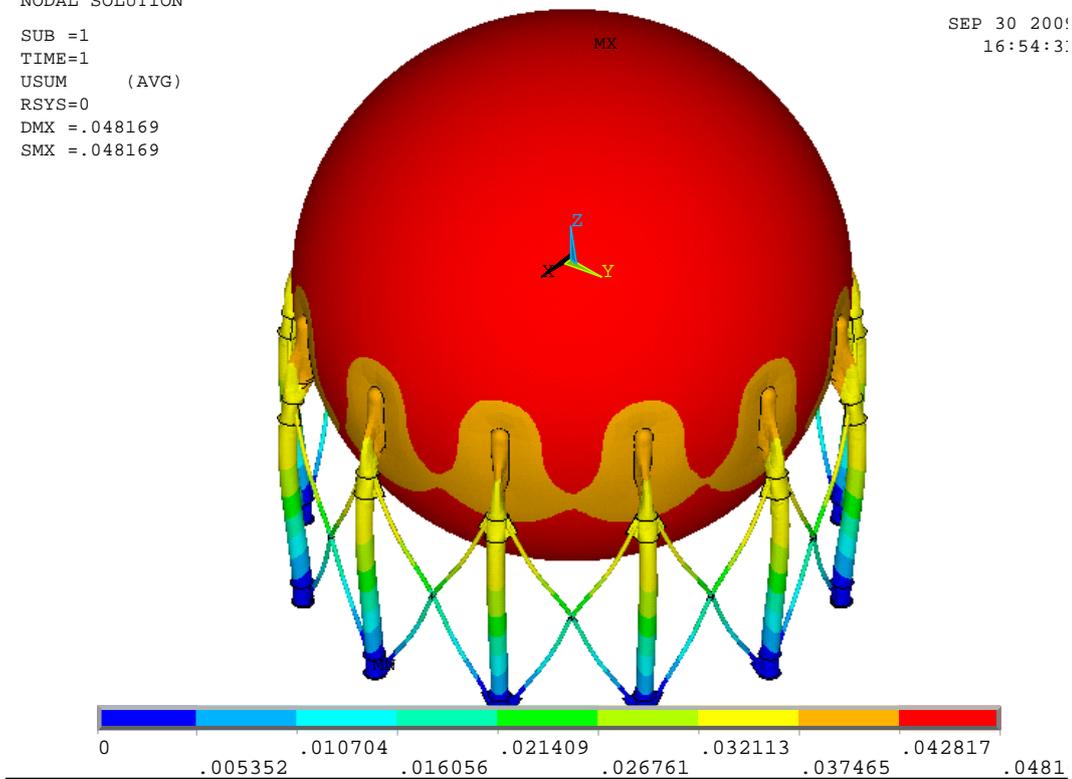


Figura 4.8 Deformación máxima.

Como se puede observar en las figuras el esfuerzo máximo y la deformación máxima que ocurre en la esfera es de dimensiones mínimas como son: de 293 kg/cm<sup>2</sup> el esfuerzo máximo y de 0.048 cm la deformación máxima, de acuerdo con el este análisis se puede llegar a la conclusión de que la esfera funcionara adecuadamente.

Con ayuda del programa ANSYS también se pueden obtener las fuerzas resultantes sobre el eje Z que es el peso de la esfera de este análisis, ver tabla 4.1 debido a que el programa da las resultantes sobre cada nodo, solos se mostraran los últimos nodos, y poder compararlas con los resultados obtenidos manualmente ver tabla 4.2.

**Tabla 4.1 resultantes sobre el eje Z**

NODE	FZ
25208	0.31905
25209	0.31575
25210	0.33667
25211	0.33582
25212	0.38152
25213	0.34873
25214	0.32265
25215	0.32540
TOTAL VALUES	
VALUE	0.36418E+06

**Tabla 4.2 Pesos obtenidos manualmente**

Sección	ESPESOR	DENSIDAD ACERO	PESO
	Cm	kg/cm <sup>3</sup>	kg
Esfera	3.81	0.00785	247134.947
Esfera	3.49	0.00785	60127.7851
12 Piernas	1.27	0.00785	27213.56
Tapa de la pierna	1.27	0.00785	295.62
Tensores	2.2	0.00785	17015.166
Tapa de los tensores	2.2	0.00785	349.1679
Peso de las placas de soporte	2.54	0.00785	4138.49
Peso de las placas de soporte	2.54	0.00785	4450.55
Peso total en vacío			360725.286

Comparando los resultados obtenidos con el programa y los resultados obtenidos se podrá saber el tamaño del error que se esta presente dentro de este análisis usando la ecuación 4.1

Peso total en vacío	360725.286
Resultante	0.36418E+06

$$error = \frac{FZ}{PTV} = \frac{364180}{360725.286} = 1.00\% \quad (4.1)$$

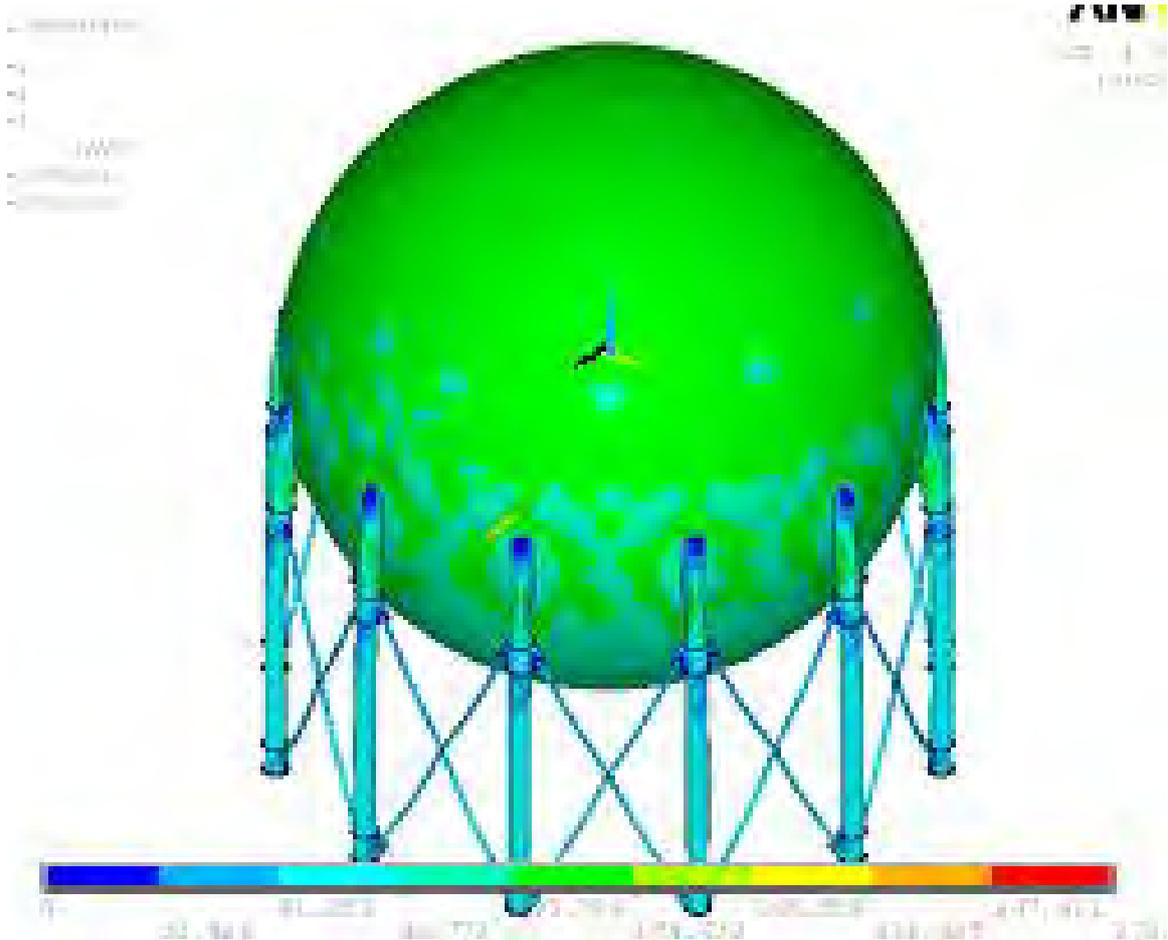
Donde:

**FZ** Resultante de fuerzas en Z

**PTV** Peso total en vacío

### **4.3 ANÁLISIS DE LA ESFERA EN CONDICIÓN DE PRESIÓN EXTERIOR.**

Dentro de esté análisis se considera a la esfera con el peso propio la única diferencia es que como en vacío se tiene que aplicar una presión negativa dentro del cascaron de la esfera esto es de acuerdo por que cuando un recipiente se encuentra en vacío ya sea por el proceso, o por otra operación, se presenta una succión dentro del cascaron, en este análisis se aplico la presión exterior máxima que podría llegar a presentarse y los resultados se muestran en la Figura 4.9



**Figura 4.9 En condición de presión exterior.**

En este análisis el resultado del esfuerzo máximo producido es de 278 kg/cm<sup>2</sup> y una deformación máxima de 0.095 cm esto representa un aumento en las deformaciones con paradas con el primer análisis.

#### **4.4 ANÁLISIS DE LA ESFERA EN CONDICIÓN DE OPERACIÓN**

Para análisis de la esfera bajo esta condición el cambio significativo con respecto al de los otros análisis es que para poder analizar la esfera con el peso del fluido almacenado se tiene que obtener una densidad relativa para poder analizar la esfera con el peso del acero mas el peso del fluido almacenado para poder obtener esta densidad se tiene que utilizar la ecuación 4.2.

$$\gamma_1 V_c = (\gamma_{cv})(V_{cv}) + (\gamma_A)(V_A) \quad (4.2)$$

Despejando la  $\gamma_1$  de la ecuación 4.2 se obtiene la ecuación 4.3  $V_A = V_C$

$$\gamma_1 = \frac{(\gamma_{cv})(V_{cv}) + (\gamma_A)(V_A)}{V_c} \quad (4.3)$$

Donde:

- $\gamma_1$  Densidad relativa (parte del fluido más la del cascaron)
- $V_C$  Volumen del cascaron.
- $V_{cv}$  Volumen del fluido almacenado.
- $\gamma_{cv}$  Densidad del fluido.(cloruro vinílico)
- $V_A$  Volumen del acero.
- $\gamma_A$  Densidad del acero
- $V_A$  Volumen de la zona donde se encuentra almacenado el fluido.

Utilizando la ecuación 4.3 obtenemos la densidad que se tiene que ocupar en la sección donde se encuentra el fluido almacenado.

$$\gamma_1 = \frac{2500125.7 + 247134.37}{31482085.18} = 0.087 \text{ kg} / \text{cm}^3$$

Debido a que la unión de las columnas con la zona del ecuador de la esfera tiene otro espesor por los parches de refuerzo el cual no considera que toda la unión tenga el mismo peso por esta razón es necesario obtener otra densidad con ayuda de la ecuación 4.4.

$$\gamma_2 = \frac{V_{PI}\gamma_1 + V_{PN}\gamma_A}{V_P} \quad (4.4)$$

Donde:

- $\gamma_2$  Densidad relativa (parche que interviene y no con el fluido)
- $V_{PI}$  Volumen del parche que interviene dentro de la esfera.
- $V_{PN}$  Volumen del parche que no interviene dentro de la esfera.
- $V_P$  Volumen total del parche.
- $\gamma_1$  Densidad relativa (parte del fluido más la del cascaron).
- $\gamma_A$  Densidad del acero

Utilizando la ecuación 4.4 se obtiene la densidad que se tiene que asignar a los parches ya considerando el fluido almacenado.

$$\gamma_2 = \frac{(148919.6954)(0.087) + (99279.79692)(0.00785)}{248199.4923} = 0.0554 \text{ kg} / \text{cm}^3$$

Después de aplicar las densidades se puede realizar el análisis considerando la condición de operación se mostrara el esfuerzo máximo y la deformación máxima en las figuras 4.10 y 4.11.

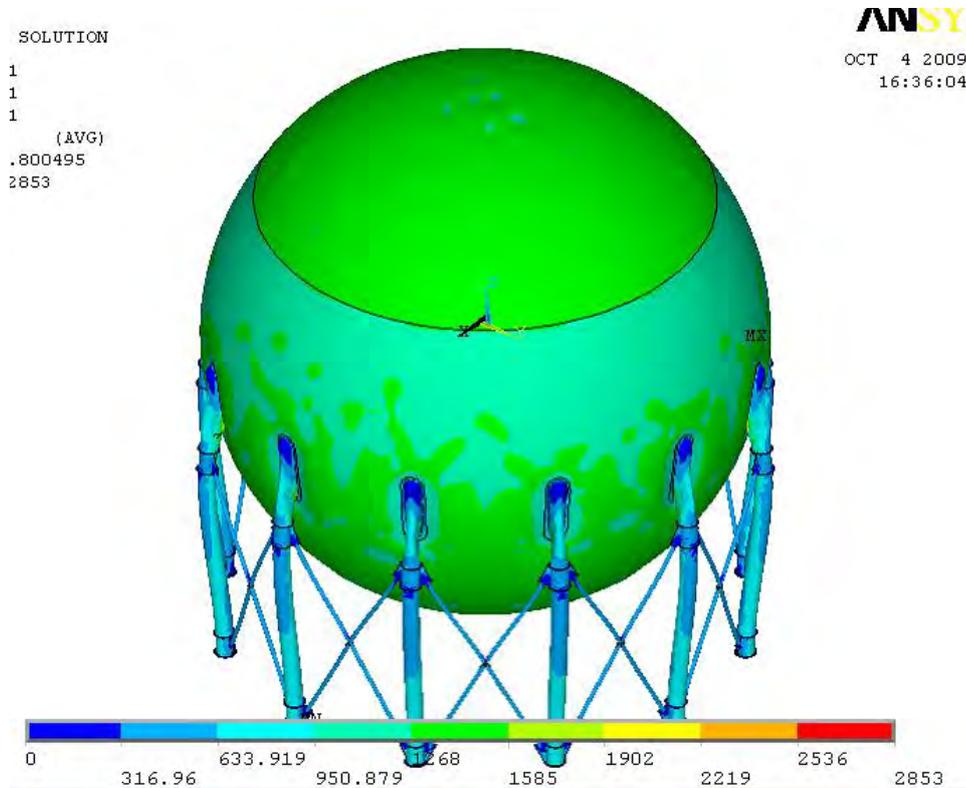


Figura 4.10 Esfuerzo máximo

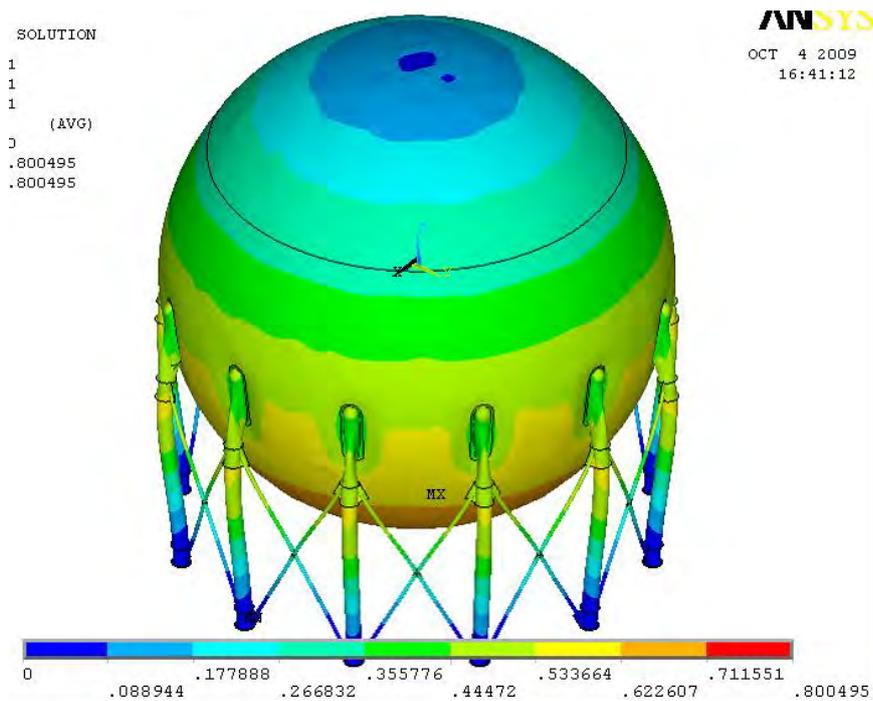


Figura 4.11 Deformación máxima

## 4.5 ANÁLISIS DE LA ESFERA DURANTE LA PRUEBA HIDROSTÁTICA

Esté análisis se hizo considerando la esfera llena de agua, mas el peso del acero y con la presión de prueba hidrostática obtenida en el capitulo dos (pph = 15.791 kg/cm<sup>2</sup>), como el peso total de la esfera dentro de esta condición es diferente se tiene que obtener otras densidades que se utilizaron para analizar la esfera para poder realizar esto se ocupa la ecuación 4.5 y ecuación 4.6.

$$\gamma_3 = \frac{(V_{H_2O}t1)(\gamma_{H_2O}) + (V_{AC}t1)(\gamma_A)}{(V_Ct1)} \quad (4.5)$$

Donde:

**Y<sub>3</sub>** Densidad relativa (zona donde el espesor es de 3.49 cm)

**V<sub>H20t1</sub>** Volumen del agua que interviene dentro de la zona del espesor de 3.49.

**V<sub>ACT1</sub>** Volumen de la zona de un espesor de 3.49 cm dentro de la esfera.

**V<sub>Ct1</sub>** Volumen del cascaron con espesor de 3.49 cm.

**Y<sub>H2O</sub>** Densidad del agua.

**Y<sub>A</sub>** Densidad del acero

$$\gamma_3 = \frac{(7659572.543)(0.00785) + (361391667.1)(0.001)}{(7659572.543)} = 0.055 \text{kg/cm}^3$$

Ahora utilizando la ecuación 4.6 se obtendrá la densidad relativa a utilizar para la parte del cascaron que tienen el espesor de t=3.81.

$$\gamma_4 = \frac{(V_{H_2O}t2)(\gamma_{H_2O}) + (V_{AC}t2)(\gamma_A)}{(V_Ct2)} \quad (4.6)$$

Donde:

**Y<sub>4</sub>** Densidad relativa (zona donde el espesor es de 3.81 cm)

**V<sub>H20t2</sub>** Volumen del agua que interviene dentro de la zona del espesor de 3.81.

$V_{Act2}$  Volumen de la zona de un espesor de 3.81 cm dentro de la esfera.

$V_{ct2}$  Volumen del cascaron con espesor de 3.81 cm.

$\gamma_{H2O}$  Densidad del agua.

$\gamma_A$  Densidad del acero

$$\gamma_4 = \frac{(2818631072)(0.001) + (207832.17)}{(31482085.2)} = 0.0961 \text{ kg/cm}^3$$

También se hizo la misma operación para obtener la densidad de los parches se obtiene utilizando la ecuación 4.7.

$$\gamma_5 = \frac{V_{PI}\gamma_4 + V_{PN}\gamma_A}{V_P} \quad (4.8)$$

Donde:

$\gamma_5$  Densidad relativa (zona del parche)

$V_{PI}$  Volumen del parche que interviene con el agua.

$V_{PN}$  Volumen del parche que no interviene con el agua.

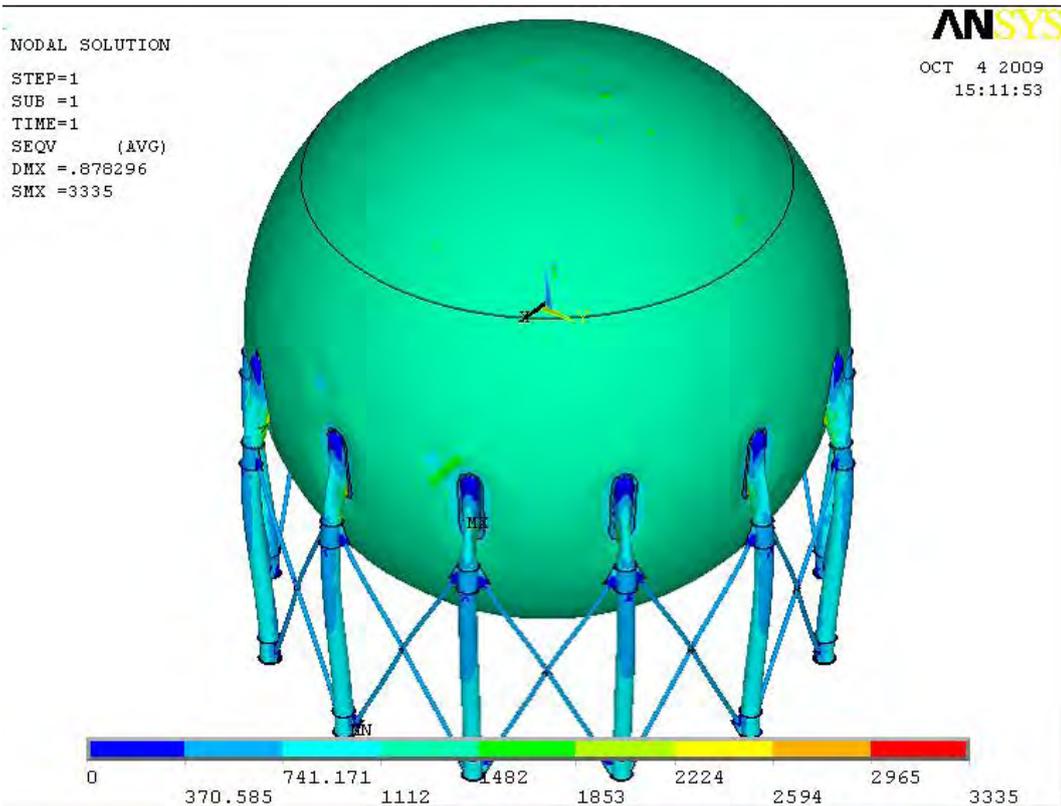
$V_{ct2}$  Volumen total del parche.

$\gamma_{H2O}$  Densidad del agua.

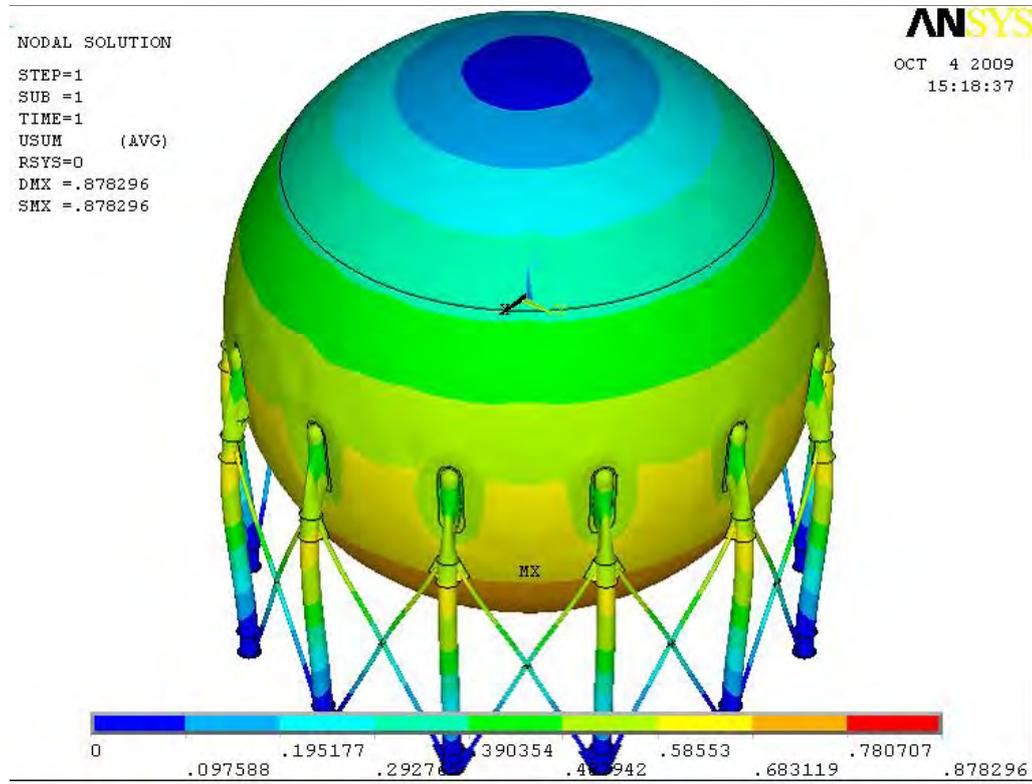
$\gamma_A$  Densidad del acero

$$\gamma_5 = \frac{(0.00785)(99279.692) + (0.0961)(148919.6954)}{248199.4923} = 0.06079 \text{ kg / cm}^3$$

Después de haber definido las densidades se aplican para hacer el análisis en condición de prueba hidrostática y obtener el esfuerzo máximo y la deformación máxima mostrados en las figuras 4.12 y 4.13 respectivamente.



**Figura 4.12 Esfuerzo máximo**



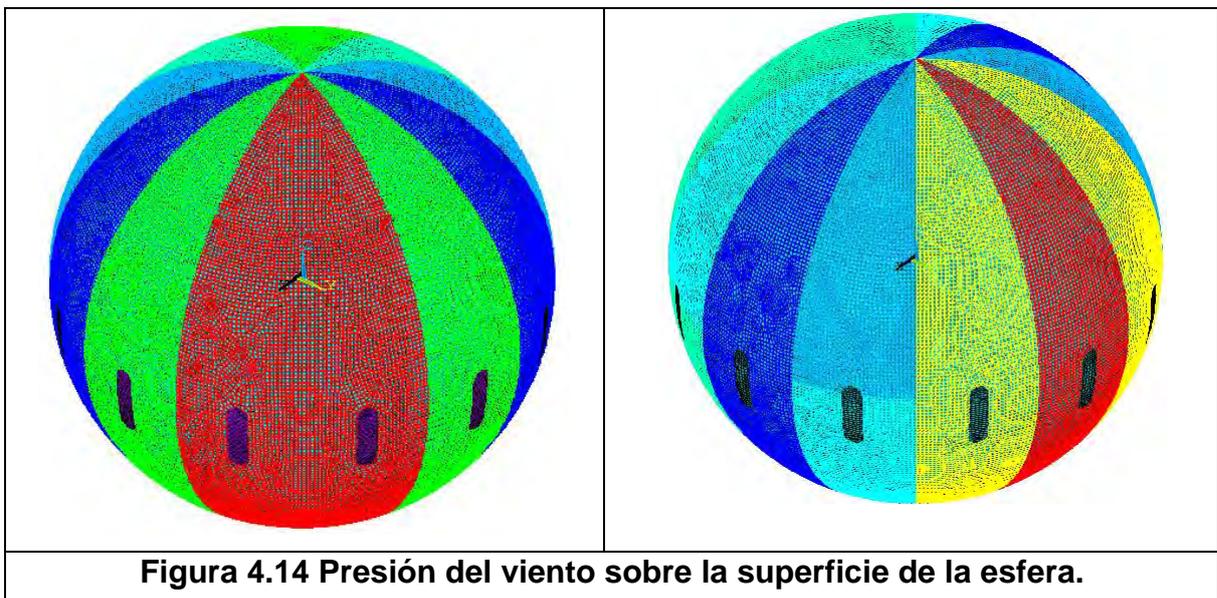
**Figura 4.13 Deformación máxima**

#### 4.6 ANÁLISIS DE LA ESFERA APLICANDO LAS CARGAS DE VIENTO EN OPERACIÓN.

Dentro de los análisis es adecuado hacer uno donde se considere las presiones del viento que afectan el cascaron de la esfera ocupando el coeficiente de presión exterior obtenido en el capítulo tres, respetando la dirección del la presión ya sea positivo o negativo dentro de este análisis se considera el peso de la esfera en condición de operación con presión interior de diseño, se aplico la presión del viento de la tabla 4.3 y el resultado de aplicar la presión sobre la superficie de la esfera se muestra en la figura 4.14.

**Tabla 4.3 Coeficiente de presión exterior de viento.**

B	cp1	resultado a10m	resultado a 10.6m	Resultado a 14.76m	resultados 18.07m	Resultado a 19.99m
0	0.85	0.009568538	0.00958010	0.010351446	0.01078329	0.0110055
30	0.33971143	0.003824167	0.00382879	0.004137064	0.00430965	0.00439846
60	-0.975	-0.010975675	-0.0109889	-0.01187371	-0.01236906	-0.01262396
90	-1.4	-0.015759944	-0.015779	-0.01704944	-0.01776071	-0.0181267
120	-0.725	-0.0081614	-0.0081712	-0.00882917	-0.00919751	-0.00938704
150	-0.4397114	-0.004949877	-0.0049558	-0.00535488	-0.00557828	-0.00569323
180	-0.45	-0.005065696	-0.0050718	-0.00548017	-0.0057088	-0.00582644
210	-0.4397114	-0.004949877	-0.0049558	-0.00535488	-0.00557828	-0.00569323
240	-0.725	-0.0081614	-0.0081712	-0.00882917	-0.00919751	-0.00938704
270	-1.4	-0.015759944	-0.015779	-0.01704944	-0.01776071	-0.0181267
300	-0.975	-0.010975675	-0.0109889	-0.01187371	-0.01236906	-0.01262396
330	0.33971143	0.003824167	0.00382879	0.004137064	0.00430965	0.00439846
360	0.85	0.009568538	0.00958010	0.010351446	0.01078329	0.0110055



#### 4.6.1 Análisis en condición de viento sobre el eje X

Considerando que la presión del viento no solo se presentara sobre el mismo eje siempre, se tiene que hacer análisis considerando otras direcciones en donde incida el viento, ver figura 4.15a donde se presenta el esfuerzo máximo y en la figura 4.15b es la deformación máxima producida por presión del viento en la dirección sobre el eje X.

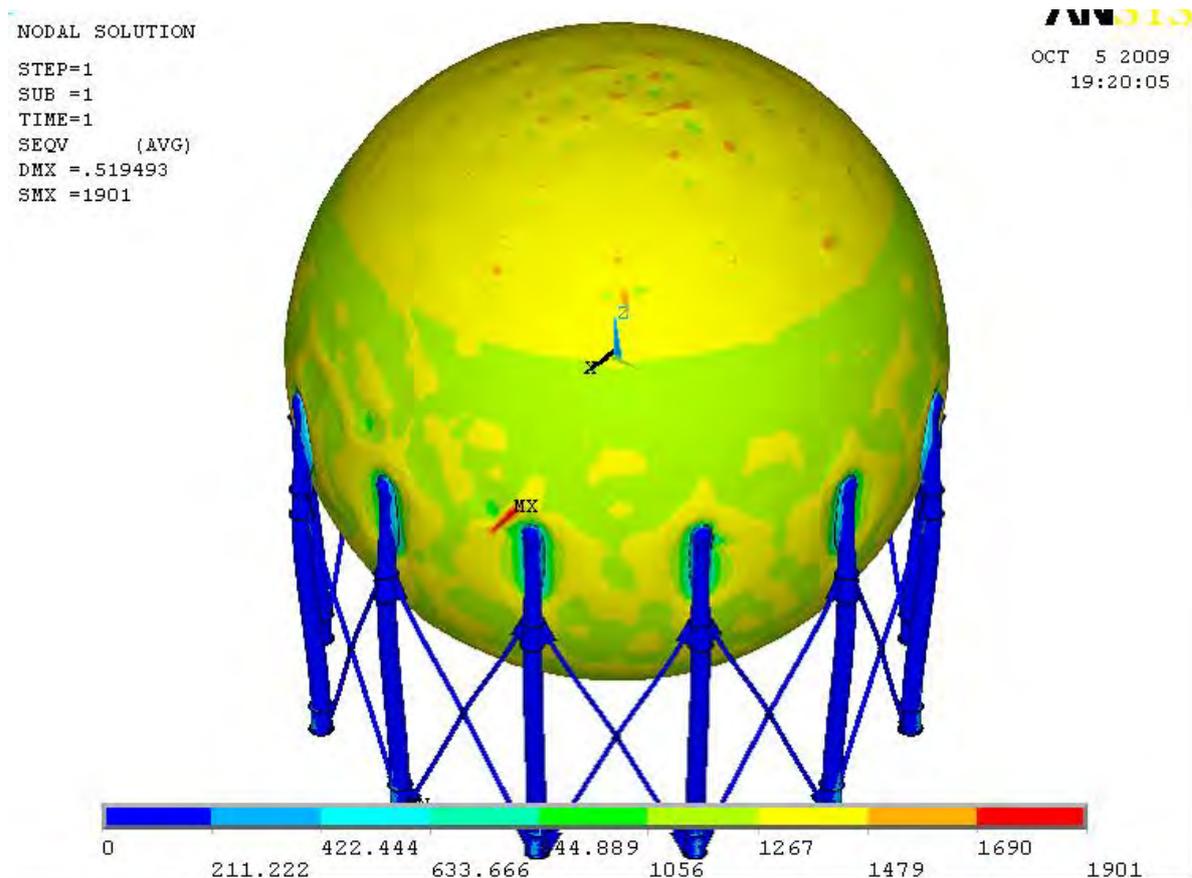
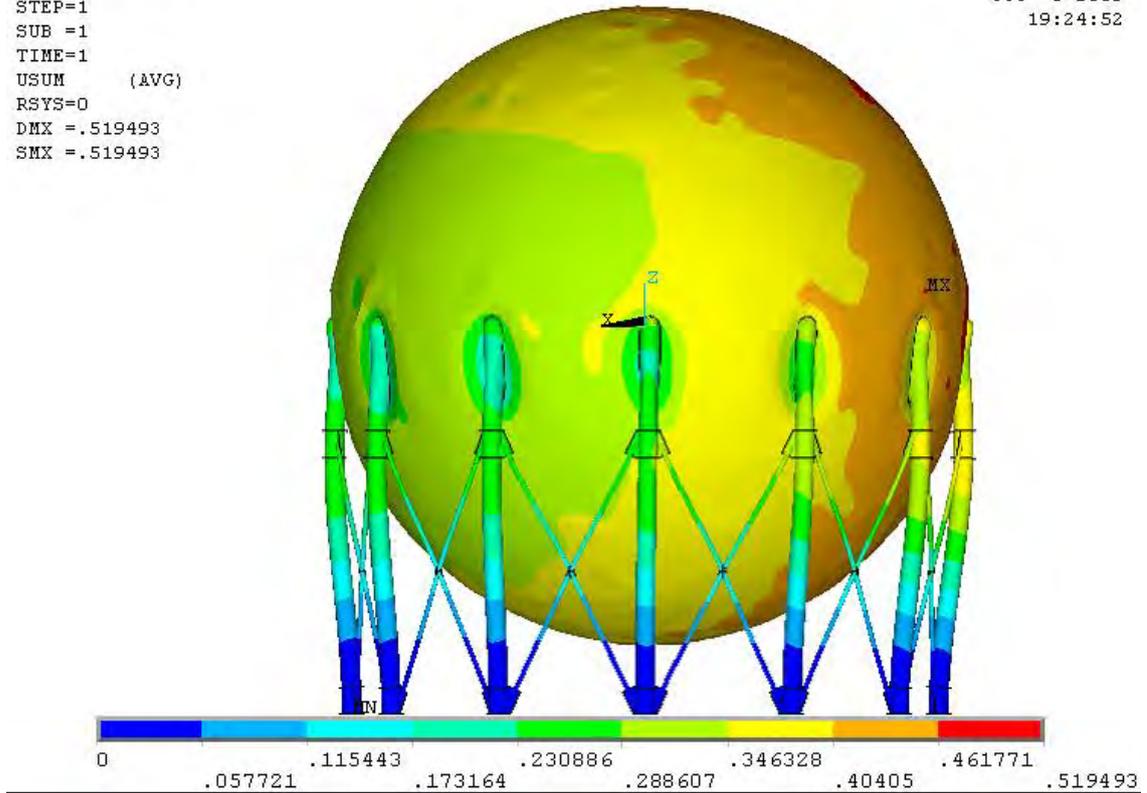


Figura 4.15a Esfuerzo máximo

NODAL SOLUTION  
STEP=1  
SUB =1  
TIME=1  
USUM (AVG)  
RSYS=0  
DMX =.519493  
SMX =.519493

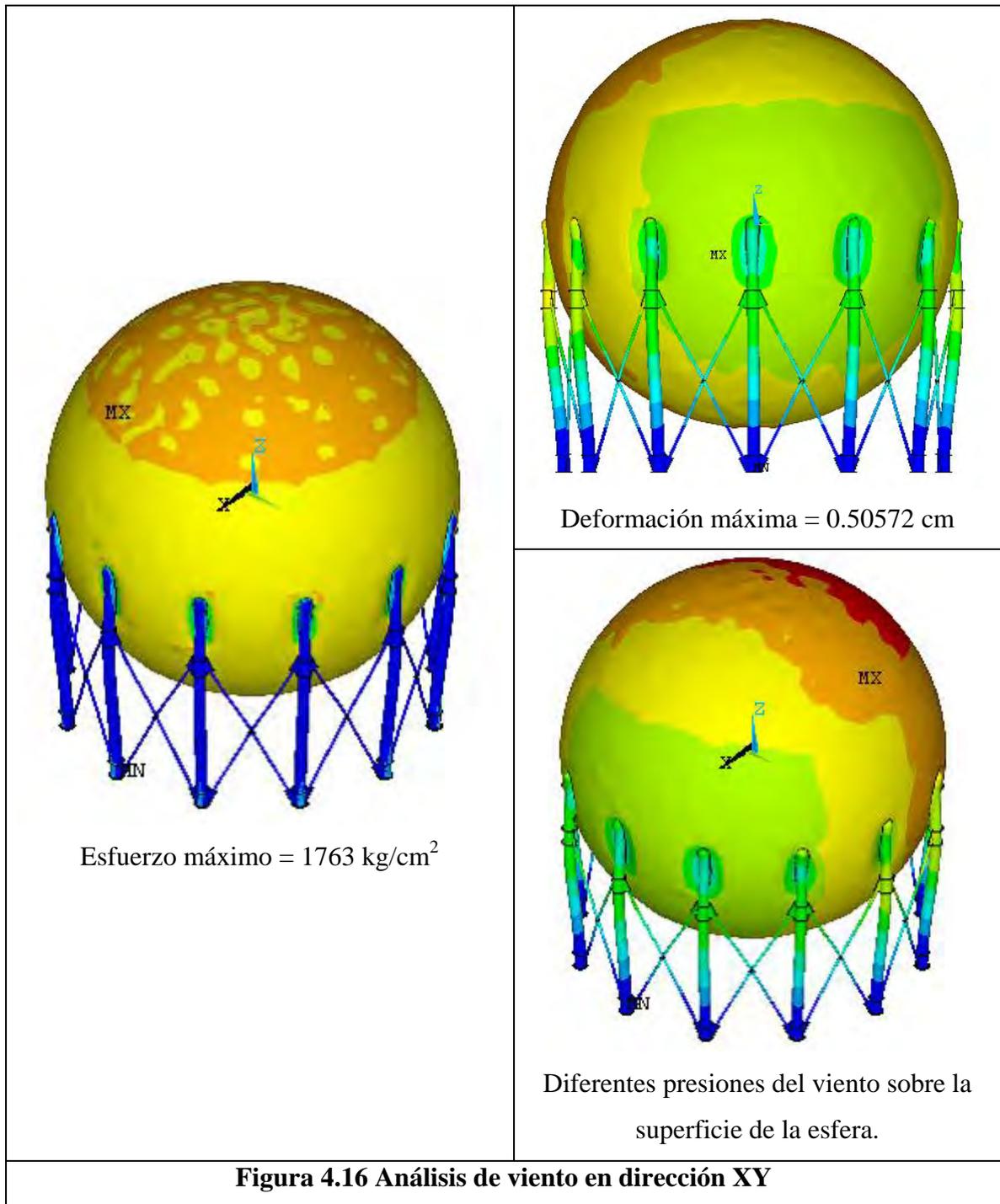
**ANSYS**  
OCT 5 2009  
19:24:52



**Figura 4.15b Deformación máxima**

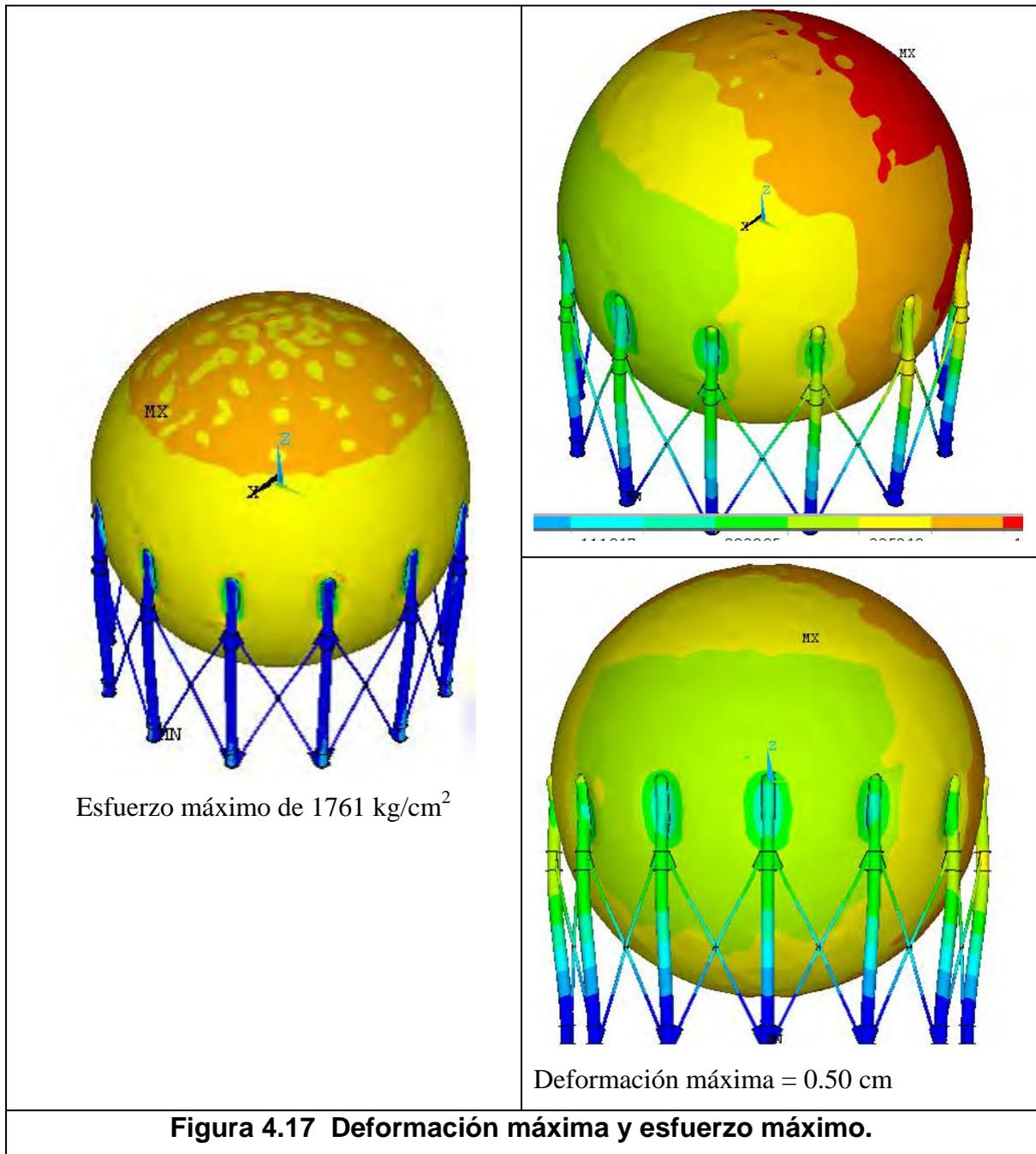
#### **4.6.2 Análisis de la esfera sometida a viento en la dirección XY**

Con respecto a este análisis de la esfera sometida a viento se realizaron tres consideraciones distintas de afectación del viento sobre la superficie de la esfera, como ya se presentó la primera en donde se considero que el viento esta presente sobre el eje X, ahora para este análisis se considera que el viento esta en contacto con la esfera en la zona intermedia entre el eje X y Y como se muestra en las figuras 4.16



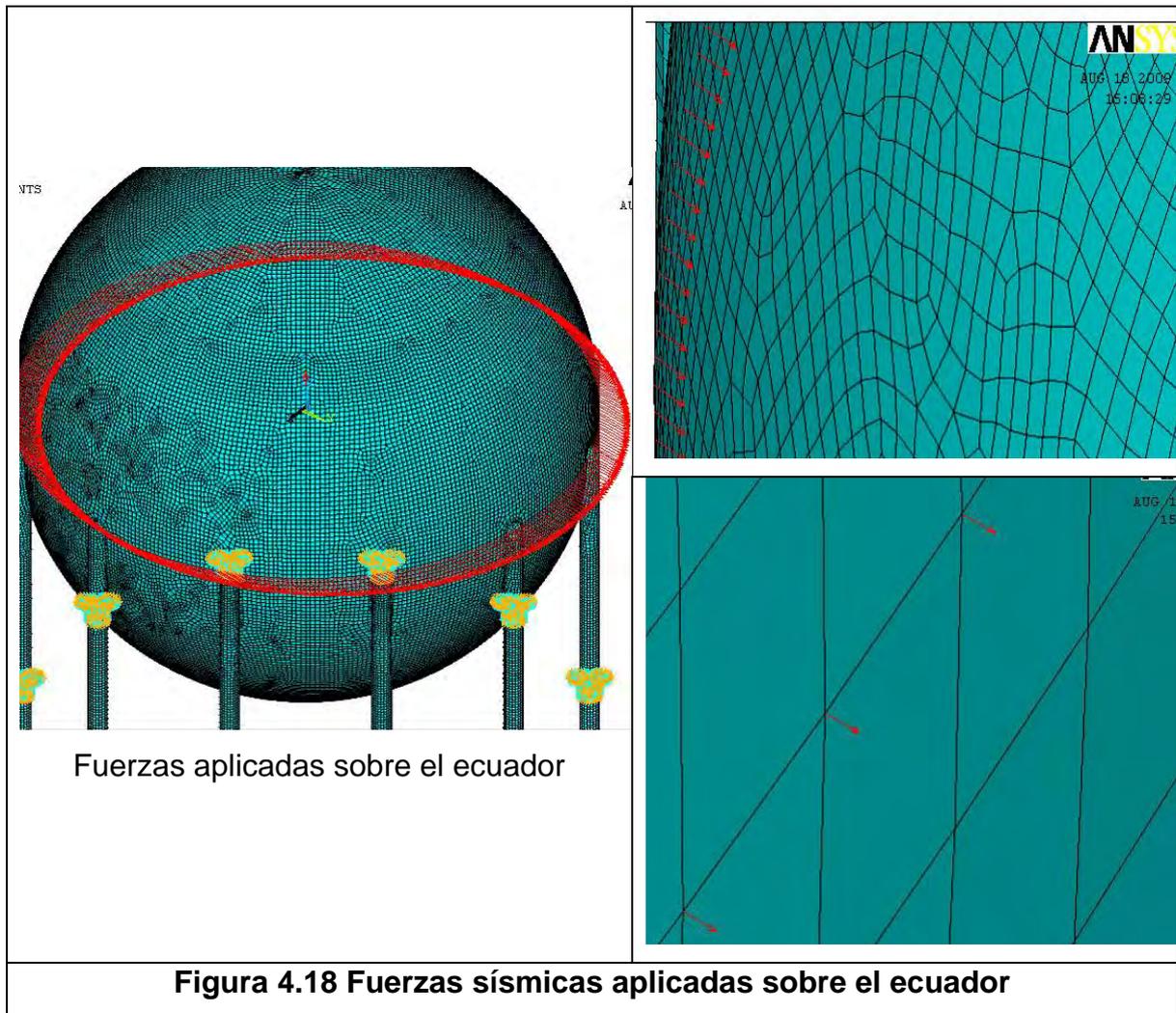
#### 4.6.3 Análisis de la esfera sometida a viento en la dirección Y

Los análisis con respecto al efecto que tiene el viento sobre la superficie de la esfera se realizaron sobre el eje y para ver la variación de la respuesta que presenta la esfera, el resultado obtenido se muestran en la figura 4.17 en donde se muestra la deformación máxima y esfuerzo máximo.



#### 4.7 ANÁLISIS DE LA ESFERA APLICANDO LAS CARGAS DE SISMO EN OPERACIÓN.

Dentro de este análisis se aplicó la fuerza obtenida de sismo del capítulo tres, esta fuerza fue aplicada sobre el ecuador de la esfera en la dirección horizontal, como se muestra en la figura 4.18, esta fuerza fue dividida sobre todos los nodos que se encuentran situados sobre la línea del ecuador y son representados con flechas sobre la dirección en la cual están aplicadas.



#### 4.7.1 Análisis de la esfera sometida a fuerzas sísmicas sobre el eje X

Como se mostró en la figura 4.18 la fuerza se puede presentar sobre cualquier dirección que se piense que las fuerzas sísmicas se puedan presentar, por esta razón se hizo el análisis de la esfera en donde las fuerzas sísmicas estén presentes solo sobre el eje X. del que se obtuvieron los resultados mostrados en la figura 4.19 donde se muestra la deformación máxima y el esfuerzo máximo.

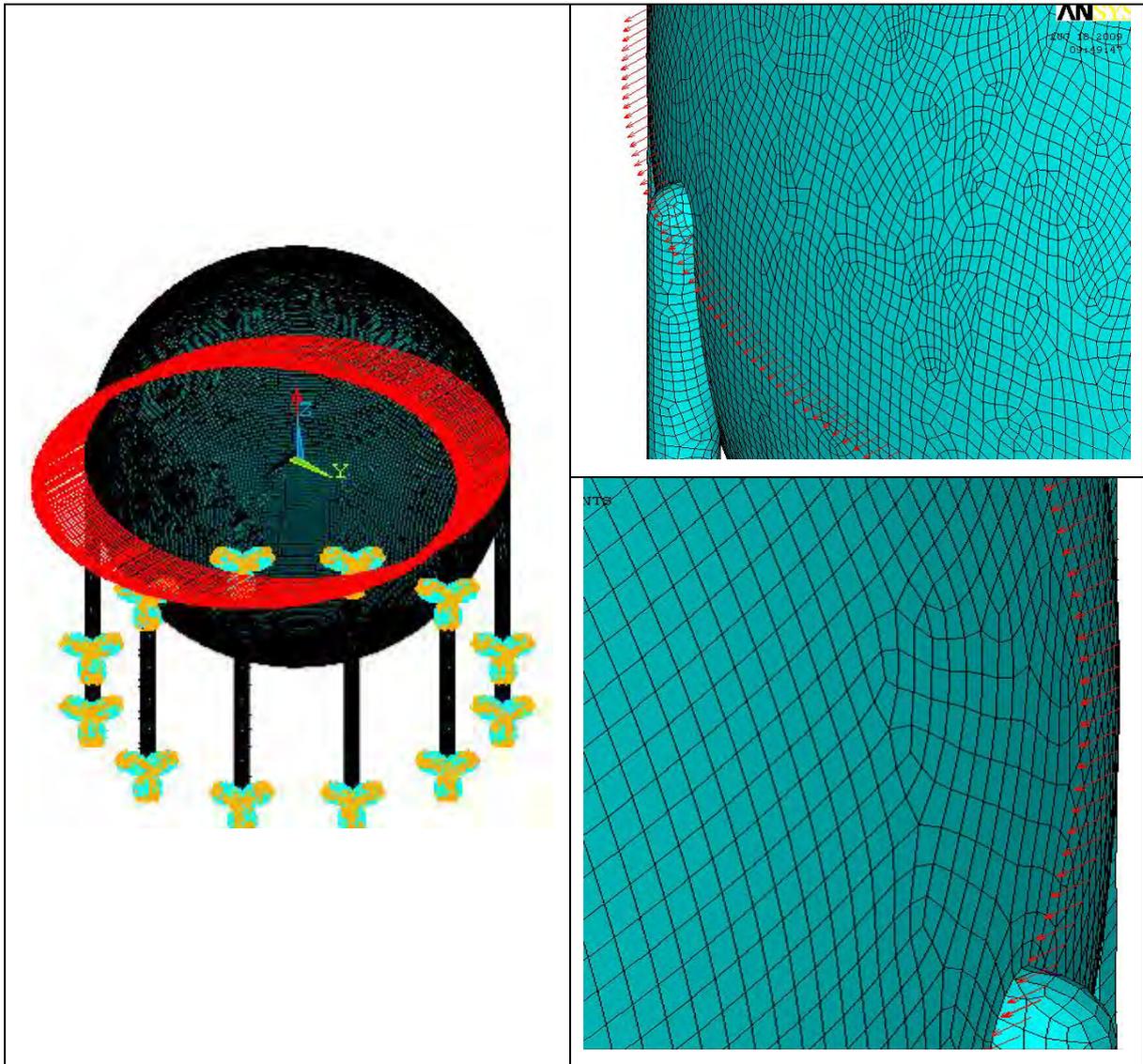
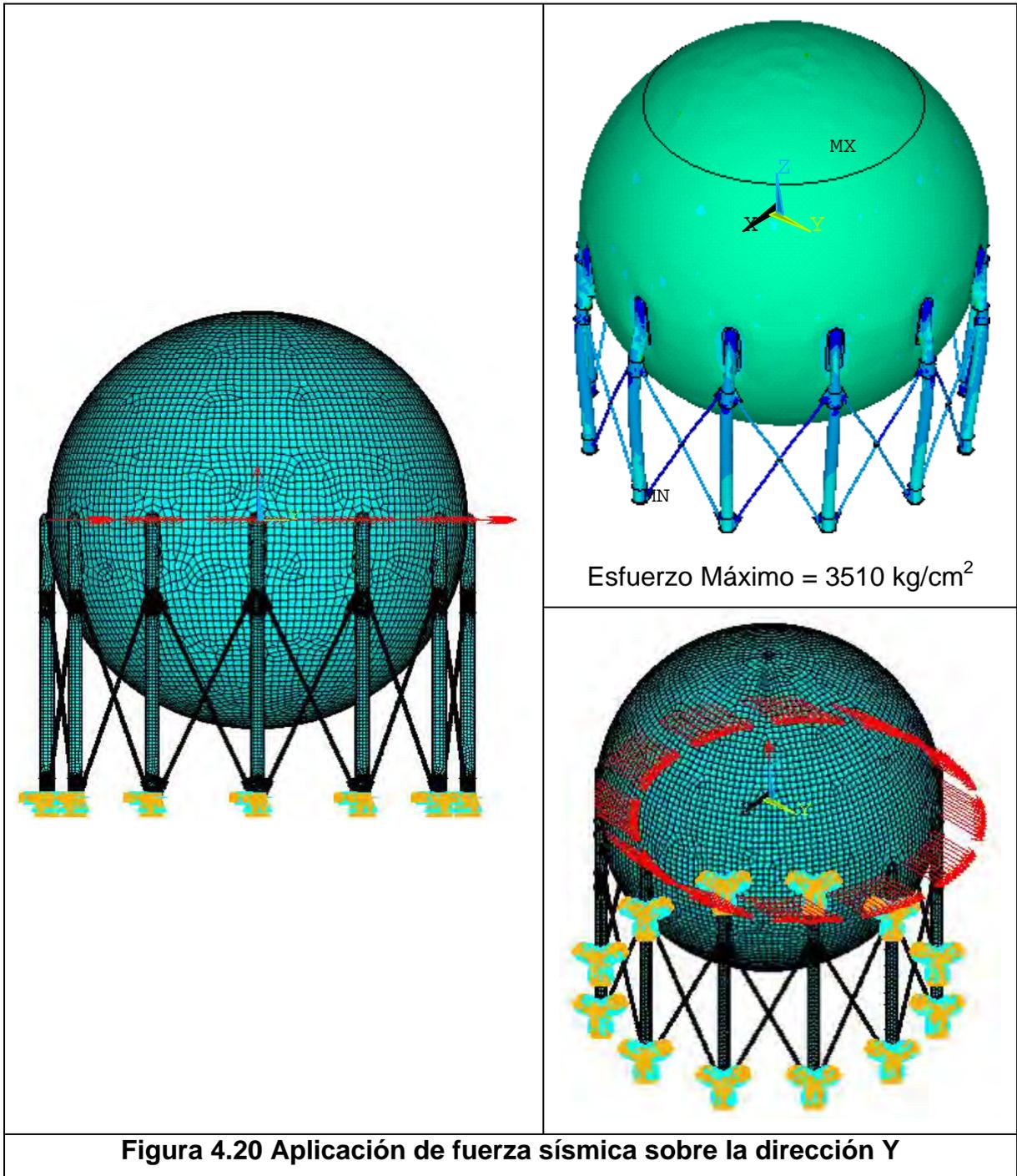


Figura 4.19 Donde se muestra la deformación máxima y el esfuerzo máximo.

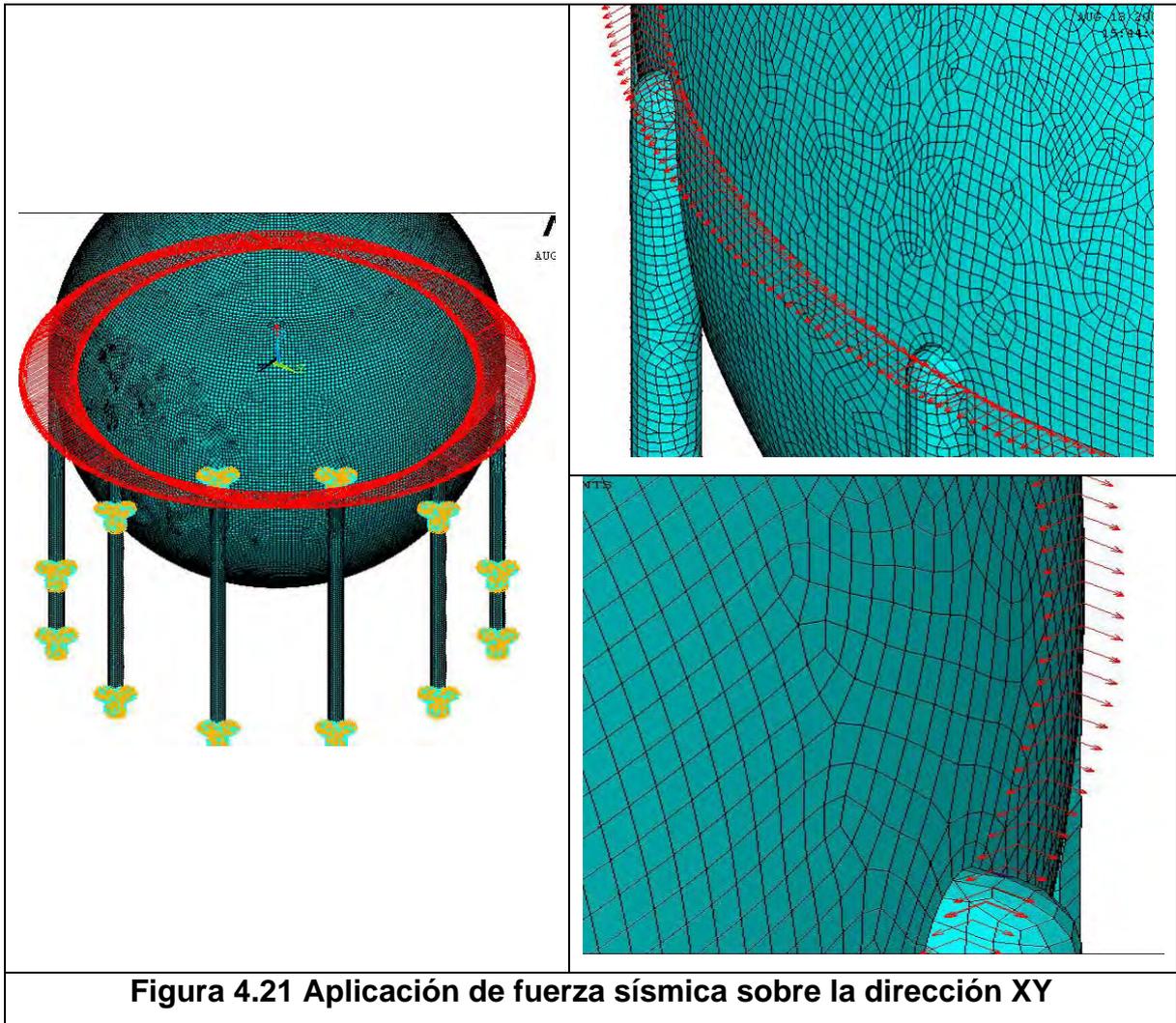
#### 4.7.2 Análisis de la esfera sometida a fuerzas sísmicas sobre el eje Y

Dentro del análisis se aplicaron las fuerzas sísmicas de la misma magnitud que en el análisis anterior pero la diferencia es que las fuerzas fueron aplicadas en la dirección del eje Y, los resultados obtenidos se muestran en la figura 4.20 donde se muestra el esfuerzo máximo y la deformación máxima.



### 4.7.3 Análisis de la esfera sometida a fuerzas sísmicas sobre el eje XY

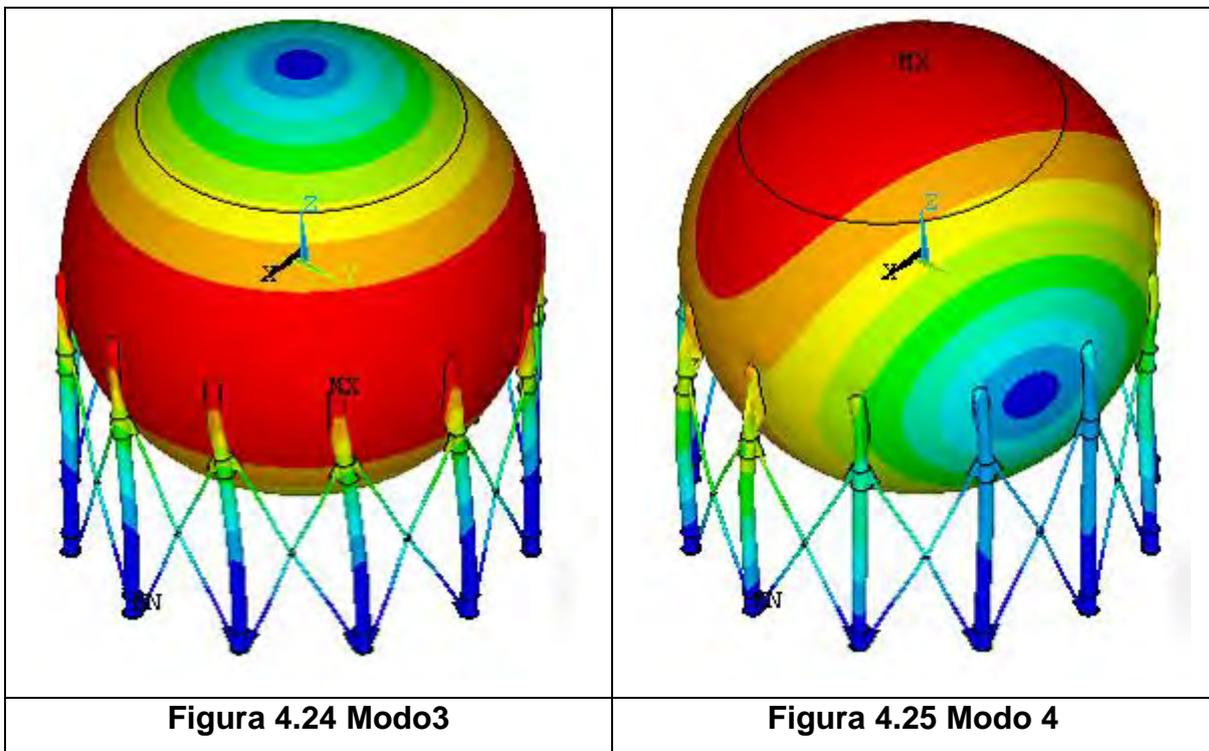
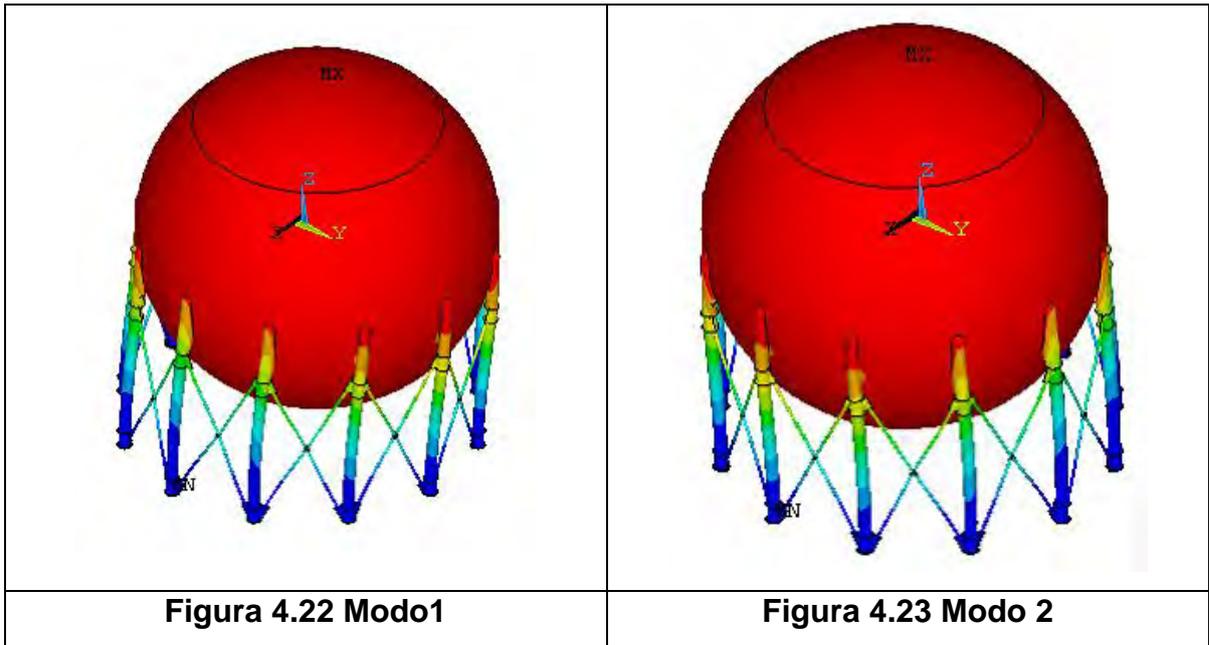
Como un sismo se puede presentar sobre cualquier dirección, en los análisis también se considero la dirección XY, a lo que se refiere es que se presenta una fuerza sobre X al mismo tiempo sobre el eje Y como se muestra en la figura 4.21.



## 4.8 ANÁLISIS DINÁMICO DE LA ESFERA.

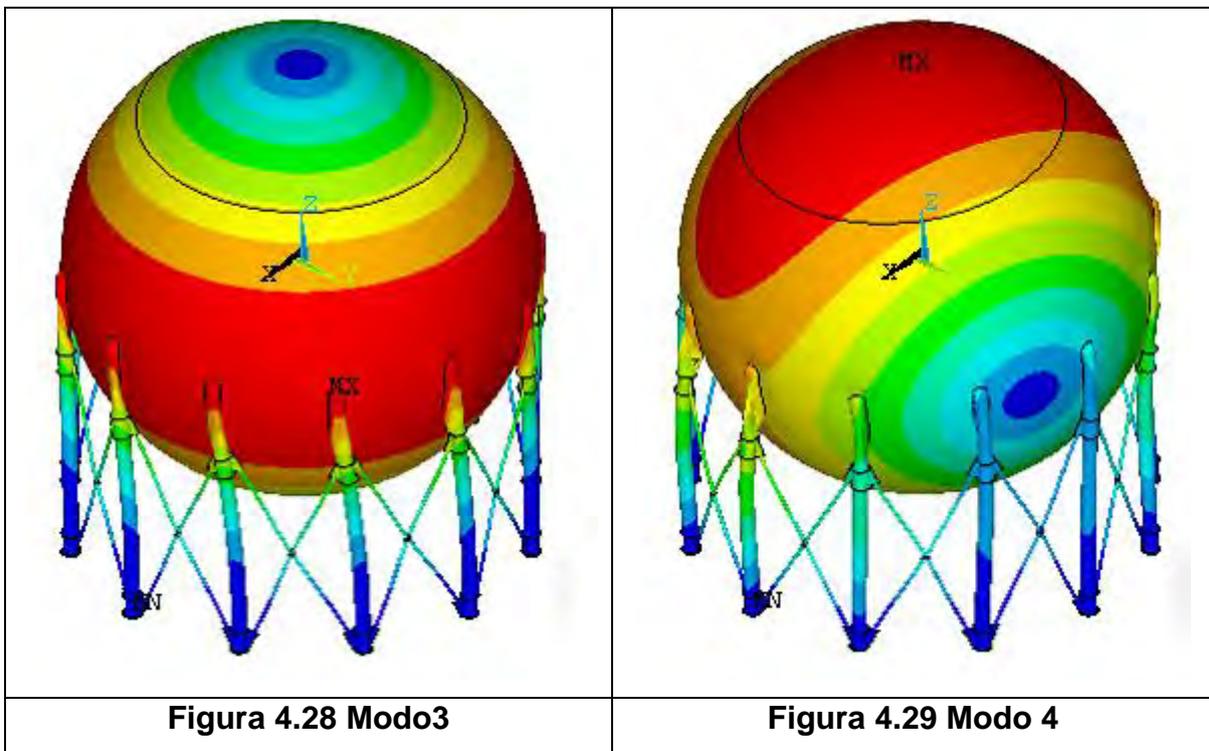
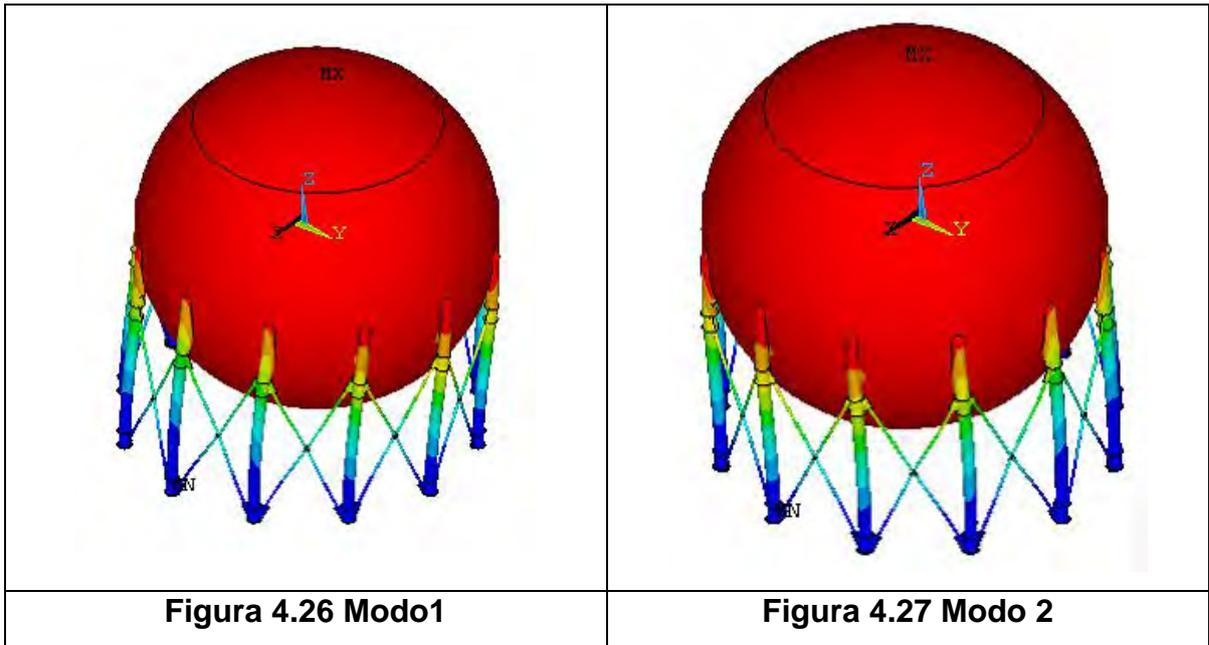
### 4.8.1 Modos de vibración de la esfera en condición de vacío.

Se realizaron análisis modales de la esfera considerando el vacío, con esto se obtuvieron veinte frecuencias y periodos, con lo que se seleccionaron los modos de vibrar que afectan mas a la esfera y se presentan en las figuras 4.22 a 4.25 en donde se puede observar el desplazamiento máximo que se puede llegar a presentar durante esa forma de vibrar.



#### 4.8.2 Modos de vibración de la esfera en condición de operación.

También se realizó el análisis considerando la esfera con el peso de operación y se obtuvieron los mismos modos de vibrar, para poder observar la diferencia que existe entre los modos de vibración de la esfera en vacío y la esfera en operación, también se muestran los modos mas críticos en las siguientes figuras 4.26 a 4.29.



#### 4.9 COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE LOS DISTINTOS ANÁLISIS

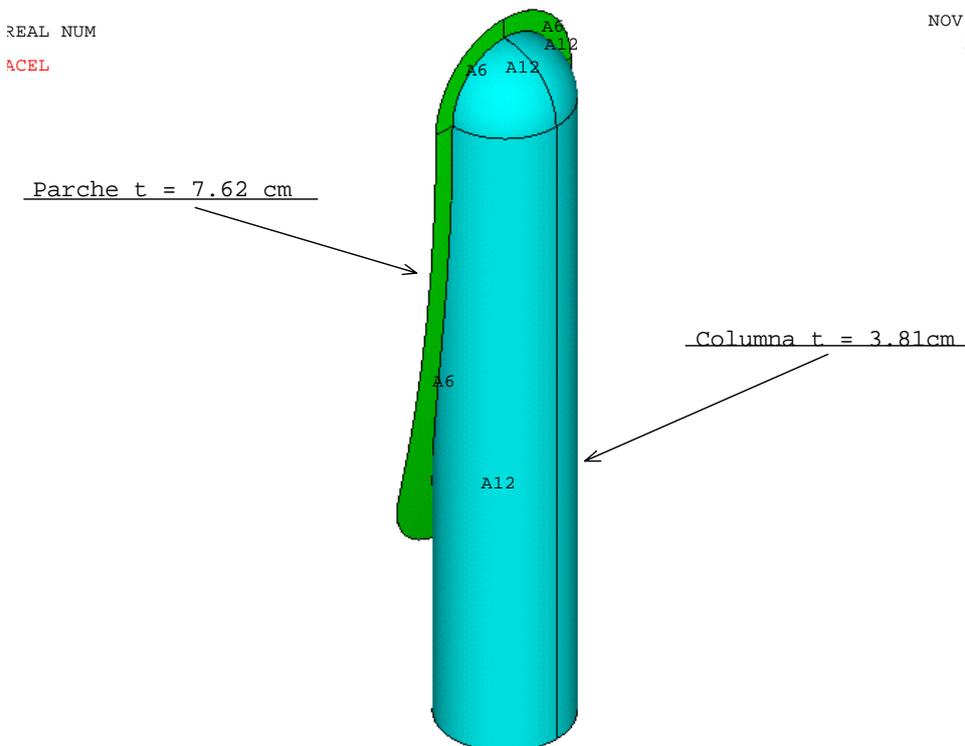
Una vez terminados todos los análisis realizados se presentara una comparación de los resultados obtenidos de cada análisis comparando el esfuerzo máximo que se presento dentro de cada análisis los cuales serán presentados dentro de la tabla 4.4

**Tabla 4.4 Comparación de resultados**

Condición	Von Mises	
	smx kg/cm <sup>2</sup>	dmx cm
Peso propio	293.897	0.048169
Operación	2853	0.800629
Prueba hidrostática	3334	0.878094
Operación + fuerza sísmica + presión interior	3359	0.908253

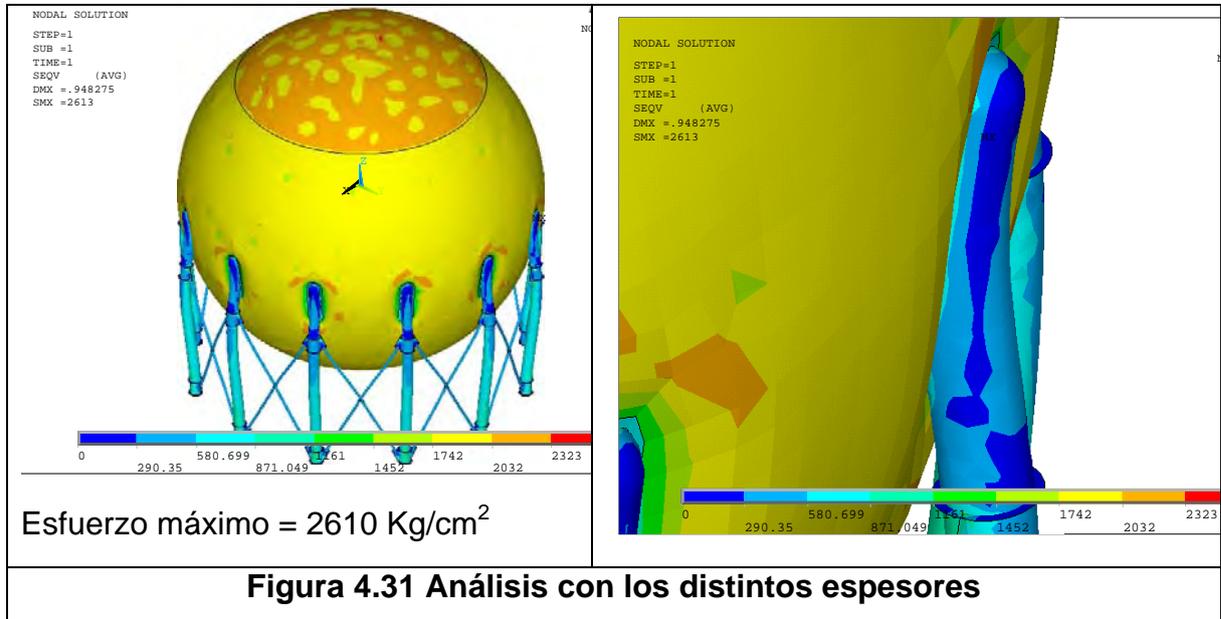
Con se puede observar en los resultados obtenidos con ayuda del programa ANSYS ver.11 las condiciones más críticas son: prueba hidrostática y con fuerzas sísmicas.

Para poder resolver esté problema se hicieron cambios de espesores en las zonas en donde se presenta el máximo esfuerzo con lo que se determino incrementar el espesor en la parte superior de las piernas y el parche como se muestran en la figura 4.30.



**Figura 4.30 Espesores modificados**

Con la modificación de los espesores el esfuerzo máximo obtenido con ayuda del programa ANSYS ver.11 se logro disminuir en una gran proporción el esfuerzo y la deformación como se muestra en la figura 4.31.



## CONCLUSIONES

- 1.- Es importante hacer el diseño adecuado de equipos de gran importancia para el funcionamiento de las industrias, por lo que es necesario siempre respaldarse con manuales, códigos, normas y programas de diseño que tengan gran reconocimiento, confiabilidad para el propósito de tener seguridad en el funcionamiento adecuado de los equipos.
- 2.- En la primera parte de este trabajo se realizó basado en el código ASME sección VIII división 1, con lo que se obtuvieron los espesores de la envolvente de la esfera, y se determinó que eran adecuados para soportar la presión interior, presión exterior, la presión de prueba hidrostática, lo que nos da una seguridad al basarnos en un código de importancia y reconocimiento.
- 3.- De los resultados obtenidos gracias al código ASME sección VIII división 1, se realizó un análisis haciendo uso de los elementos finitos con ayuda del programa ANSYS ver. 11, y de los resultados obtenidos se determinó que los espesores obtenidos eran adecuados para que el equipo soportara los esfuerzos a los que estará sometido la sección de la esfera, por los efectos que pueden llegar a producirse por el fluido almacenado.
- 4.- De acuerdo a los análisis, mediante el método de los elementos finitos, de la estructura que soportará el equipo se determinó que necesitara más espesor en la sección superior de las piernas, en la unión de las piernas y la envolvente.
- 5.- Para todo equipo que sea de gran importancia se recomienda hacer análisis con programas de gran confiabilidad ya que es más rápido hacer un análisis con ayuda de los elementos finitos que hacer varias pruebas en campo y también es más económico, con el programa ANSYS ver. 11 que es reconocido y utilizado por compañías de gran importancia y crecimiento, por lo cual se concluye que el programa es adecuado, confiable y económico comparado con los análisis que se pueden llegar a hacer.

6.- El análisis de este equipo puede servir como una guía para posteriores análisis más completos o como un apoyo para análisis adecuados de recipientes a presión (esferas).

## BIBLIOGRAFÍA

**1. - Código ASME, Sección VIII, División 1.**

Edición 2007.

**2. - Fundamentos del Método del Elemento Finito.**

Ing. Carlos Cortés Salas.

IMP. México. 2007

**3. - Manual de Diseño de Obras Civiles, Diseño por Viento y Sismo.**

Comisión Federal de Electricidad.

México. 1993.

**4. - Manual Ansys V 11.**

Ansys Inc, USA.

**5. - Manual de Construcción en Acero**

Instituto Mexicano de la Construcción en Acero. A.C.

Limusa. México. 1987

**6. - Pressure Vessel Design Manual.**

Dennis R. Moss

Edition by golf Publishing Company Edition 1987.

**7. -Manual de formulas técnicas**

Geick

30° edición

**8. - El Método de los Elementos Finitos**

O.C. Zienkiewics.

Ed. Reverté, S.A. España. 1980

**9. - Código ASME, Sección II, Parte D Métrico.**

Edición 2007.

**10. – Diseño y calculo de recipientes a presión.**

Ing. Juan Manuel Estrada León

2001.