



Universidad de Cienfuegos.  
Facultad de Ingeniería.  
Carrera de Ingeniería Mecánica.

**TRABAJO DE DIPLOMA**

**Para optar por el título de Ingeniero  
Mecánico.**

**Metodología para el Diseño y Evaluación de Tanques  
Atmosféricos para Almacenamiento de Hidrocarburos.**

**AUTOR:**

**Leonardo Sapalo Lucas.**

**TUTORES:**

**MSc. Pedro Torriente Quesada  
Dr. Pedro Fundora Beltrán**

**Cienfuegos, 2020**



# Pensamiento

***No se alabe el sábio en su sabedodía, ni en su valentia se alabe el valiente, ni el rico se alabe en sus riquezas. Mas alábese en esto el que se hubiere de alabar: en entenderme y conocerme, que yo soy Jehová, que hago misericória, juicio y justicia en la tierra; porque estas cosas quiero, dice Jehová.***

***Elohim “Libro de Jeremias”***

***Haciendo estar atento tu oído a sabedoria; si inclinares tu corazón a la prudencia, si clamares a la inteligencia, y a la prudencia dieres tu voz; si como a la plata la buscares, y la escudriñares como a tesoros, entonces entenderás el temor de Jehová, y hallarás el conocimiento de Dios.***

***Proverbios de Salomón***



# *Dedicatoria*

Dedico este trabajo al SEÑOR Dios Rey de Reyes. A mi padre Ventura Kutombola Lucas, a mi mamá Domingas Marcelino Laurindo, a mi hermana mayor Aurora Nassapalo Lucas e a todos mis hermanos por todo lo que han hecho por mi.

Dedico también este trabajo a mi novia Diana Rocío Ávila Gattorno, a mis amigos y a todos que me han apoyado directa o indirectamente.



# Agradecimientos

Mi primera gratitud va para mi Dios el SEÑOR. En el principio de la carrera yo estudiaba, sin embargo, yo guiaba mis estudios de una forma distorcida pues no sabia el enfoque de mis estudios en la realidad. Fue Dios que por Su Palabra y por médio de mis profesores, me ayudó a encontrar este enfoque, por eso le doy muchas gracias a ÉL, pues ÉL siempre ha sido mi mayor motivación, y por Su Gracia he podido aguantar los momentos difciles que viví mientras estudiaba en la República de Cuba.

Le agradezco a mi papá Ventura Kutombola Lucas, pués él siempre ha sido la persona que más me ha apoyado en los estudios, que siempre se preocupó por mi y siempre me educó a ser buen estudiante y una mejor persona.

Le agradezco a todos mis hermanos y hermanas, pues su afecto a sido de grande fuerza para mi en este camino. En especial a mi hermana mayor Aurora Nassapalo Marcelino Lucas por su grande amor por mi, y su cuidado hacia mi desde que soy niño, pues ella se sacrificó para que yo pudiese estudiar. Agradezco también a su esposo, mi cunhado Tomás Kokas Cassule por sus consejos y apoyo en mis estudios y en otras áreas de la vida y a mi hermano Manuel Satina.

Le agradezco también a mi querida tia Elinda Ngueve que siempre se ha preocupado por mi desde que soy niño y siempre me ha llamado desde mi país para darme motivación. No dejaria de agradecer a mi prometida Diana Rocío Ávila Gattorno por la atención y apoyo que me ha brindado en todos los sentidos desde que estoy en Cuba y su presencia constante en todos los momentos importantes. Agradezco a su familia, a mis suegros Jorge Henrique Ávila y Mariela Gattorno Lorenzo por su cariño.

En especial quiero agradecer a mi Tutor Pedro Torriente Quesada, digo que él es la persona que con su experiencia me introdujo en el mundo real de la Ingeniería. Me ha ayudado a aplicar mis conocimientos académicos en la



práctica ingenieril. Le doy muchas gracias a Dios por haber puesto a mi tutor Pedro Torriente en mi camino, pues aún sin él ser mi profesor oficial de la universidad me ha transmitido conocimientos y experiencias que son y siempre serán muy útiles en mi vida profesional, él es un gran modelo de enseñanza, dedicación y compromiso para mí. Gracias a él tuve el tema de la tesis y gracias a su dedicación y presencia constante pude realizar mi trabajo de diploma. Le agradezco también a mi tutor Pedro Fundora Beltrán, siempre he podido contar con él en los estudios y con sus consejos. Le doy gracias a Jesucristo por haber puesto en mi camino a Profesor Pello, pues ha sido una bendición ser su estudiante.

Le agradezco a todos los profesores que me han impartido clases en la universidad de Cienfuegos “UCF” he tenido la oportunidad de estar con profesores maravillosos que aman lo que hacen y que su mayor interés es que el estudiante.

Agradezco a todos mis hermanos en Cristo, agradezco a mi hermano Jaime, agradezco a todos mis compañeros angolanos del aula, por su acto de compañerismo. Le agradezco a mis amigos Isidro, Niclovanio, Fidimoni, Mawete, Oscar, Rosildo, Frederico y a todos los demás que no he citado agradezco por su apoyo directa o indirectamente.

## RESUMEN.

El presente trabajo describe, una Metodología para el Diseño y Evaluación de Tanques Cilíndricos Verticales para Almacenamiento de Hidrocarburos. Aplica para tanques de acero que descansan sobre una base de cimentación, además, de estar orientado a diseñadores, constructores y montadores para que se obtengan resultados satisfactorios dentro de las tolerancias permisibles que son indicada en el código API 650.

La metodología establece los requerimientos para la comprobación de la Sección 5 del código API 650, sobre el diseño de tanques de almacenamiento y la aplicación de los Softwares de diseño el Intergraph Tank 2016 para el diseño del tanque y el SAP 2000 V14, para el análisis estructural del tanque bajo carga hidrostática.

### **Palabras claves:**

Metodología.

Diseño.

Tanques de almacenamiento.

Código API 650.



## Abstract

The present work describes a Methodology for the Design and Evaluation of Vertical Cylindrical Tanks for Hydrocarbon Storage. It applies to steel tanks that rest on a foundation base, in addition, designers, builders and assemblers are oriented so that satisfactory results are obtained within the allowable tolerances that are indicated in the API 650 code.

The methodology establishes the requirements for the verification of Section 5 of the API 650 code on the design of storage tanks, applying the Software Intergraph Tank 2016. It allows the structural analysis of the tank under hydrostatic load, applying the SAP 2000 V14 Software.

### **Key words:**

Methodology.

Design.

Storage Tank.

API 650 code.



## ÍNDICE

<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>10</b>
<b>CAPÍTULO I.....</b>	<b>13</b>
<b>GENERALIDADES SOBRE LOS TANQUES DE ALMACENAMIENTO. ....</b>	<b>13</b>
1.1 Clasificación del tanque.....	13
1.2 Consideraciones de materiales.....	13
1.3 Techo del tanque de almacenamiento.....	16
1.4 Tipos de fondos de tanques.....	18
1.5 Uniones soldadas aplicadas a los tanques de almacenamiento.....	19
1.6 Boquillas en tanques de almacenamiento.....	26
1.7 Entradas de hombres en la envolvente.....	27
1.8 Entradas de hombres en el techo.....	28
1.9 Plataformas, pasarelas y escaleras.....	29
1.10 Normativa aplicada en el diseño de tanques de almacenamiento.....	31
1.10.1 Norma API-650.....	31
1.10.2 Norma API-620.....	31
1.11 Análisis hidrostático en el tanque de almacenamiento.....	32
1.12 Métodos de examen de uniones soldadas.....	35
<b>CAPÍTULO II.....</b>	<b>38</b>
<b>CONSIDERACIONES PARA EL DISEÑO DE UN TANQUE DE ALMACENAMIENTO. ....</b>	<b>38</b>
2.1 Nomenclatura.....	38
2.2 Diseño de la envolvente del tanque.....	41
2.2.1 Cálculo del espesor requerido de cada anillo de la envolvente.....	41
2.2.1.1 Método de 1-pie.....	41
2.2.1.2 Método del “punto de diseño variable”.....	42
2.3 Cálculo de las tensiones admisibles.....	42
2.4 Dimensionamiento de la envolvente en función del número de anillos y longitud de placas que conforman los anillos.....	43
2.5 Altura Transformada Equivalente.....	44
2.6 Aplicación del Anexo V.....	45
2.8 Aplicación del Anexo P.....	48



2.9 Pernos de anclaje.....	51
2.10 Diseño del fondo del tanque.....	54
2.10.5 Aplicación del anexo V.....	56
2.11 Diseño del techo del tanque.....	62
2.11.2 Diseño Simplificado del techo de acuerdo EN-1993-4-2.....	64
2.11.4 Tensión Admisible.....	67
2.11.7 Carga de diseño y cargas muertas.....	70
2.11.8 Combinaciones de cargas según API-650 y carga total.....	70
2.13 La presión de falla calculada.....	84
2.14 Soporte central del techo.....	84
2.15 Cálculo de viento.....	87
2.17 Cálculo del peso del tanque.....	95
2.17.3 Peso del líquido para la verificación del efecto del viento, según API 650.....	98
<b>CAPÍTULO III.....</b>	<b>101</b>
<b>EJEMPLO DE DISEÑO DEL TANQUE DE ALMACENAMIENTO DE CAPACIDAD 20 000 M<sup>3</sup>.....</b>	<b>101</b>
3.1 Cálculo hidrostático del tanque.....	103
3.2 Cálculo de la envolvente.....	105
3.3 Cálculo de los espesores de la envolvente por el método 1-pie.....	106
3.3.3 Condición de prueba hidrostática.....	113
3.4 Análisis económicos sobre la base del costo de la envolvente.....	117
3.6 Aplicación del Anexo V.....	119
3.8 Aplicación del Anexo P.....	120
3.10 Cálculo del techo del tanque.....	135
3.11 Dimensionamiento del anillo circunferenciales de la unión envolvente-techo.....	142
3.12 Verificación del efecto del viento.....	145
<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>150</b>
<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>151</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>152</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>154</b>



## INTRODUCCIÓN.

La Refinería Cienfuegos S.A. se construyó entre 1977 y 1990 para completar el esquema refinador del país conjuntamente con las refinerías de Santiago de Cuba y Ciudad de la Habana, con un desarrollo posterior de la industria petroquímica cubana. Fue diseñada para realizar una producción de 65 000 barriles de crudo por día. Los objetos fundamentales de la refinería son: muelle, área de tanques, área de procesos, tratamiento de residuales y facilidades auxiliares. Entre marzo de 1991 y enero de 1995 procesó 1,3 millones de toneladas de diferentes tipos de crudo, con el rendimiento esperado. A partir de 1990 se realiza el ajuste y puesta en marcha incorporando paulatinamente al funcionamiento las unidades de Destilación Atmosférica en 1991, de Fraccionamiento de Gases en 1992 y de Reformación Catalítica en 1993.

Los tanques de almacenamiento empleados en la industria petrolera están gobernados, desde su diseño, fabricación, montaje, pruebas y operación por el código API-650 que contiene todos los aspectos que deben cumplirse tanto por el diseñador como por los fabricantes, montadores y operadores. En el ámbito de la ingeniería, los tanques verticales cilíndricos son construidos con la finalidad de almacenar hidrocarburos, soportando la carga hidrostática del fluido almacenado. La densidad del producto influye directamente en el dimensionamiento de los espesores de los anillos de la envolvente que conforman el tanque y el fondo del mismo.

Para lograr lo anterior se requiere que el diseño y la evaluación de tanques de almacenamiento cumplan con todas las normativas y códigos aplicables, permitiendo la calidad requerida para asegurar la correcta geometría y funcionamiento del tanque durante su operación y vida útil.

Otros de los factores que influyen en la ingeniería de diseño de tanques de almacenamiento es el análisis estructural, donde el tanque debe soportar su propio peso y la presencia de fuerza sísmica como la de viento, donde no se puede perder las condiciones de funcionalidad para las que fue concebida.



El diseño de tanques atmosféricos es algo muy complejo, además, de que el estudio es demasiado amplio porque en este intervienen diferentes ramas de la ingeniería como, por ejemplo, la química, la instrumentación, el impacto ambiental etc., por citar algunas. Es muy importante que el diseño del tanque de almacenamiento se apegue a las normas, procedimientos y códigos de seguridad adecuadas que permitan llevar un control de calidad que asegure el correcto funcionamiento del tanque para evitar riesgos que pongan en peligro a la planta industrial y personas alrededor (Alberto, 2012).

En la actualidad, es muy frecuente el uso de softwares en las ingenierías, siendo así, la empresa petrolera no se excluye de este fenómeno. Pues debido al rigor que ofrece el sector petrolero surge la necesidad de usar suficientes herramientas para la elaboración eficiente de los equipos que en ella va a operar. Entretanto, en este trabajo se va usar el software Intergraph Tank, siendo este para el diseño del tanque; techo, envolvente y fondo y el software SAP 2000 V14 para el análisis estructural del tanque.

**Problema:** La Refinería Cienfuegos SA no cuenta con ningún documento escrito, que permite diseñar los tanques atmosféricos que pueden ser construidos para su explotación y la evaluación de estos cuando están en servicio.

**Hipótesis:** Es posible elaborar una Metodología para el Diseño y Evaluación de los Tanques Atmosféricos para su explotación de forma segura.

**Objetivo general:** Elaborar una metodología para el diseño y evaluación de tanques de acero de geometría cilíndrica vertical y fondo plano, que cumplan con los requisitos del código API 650 para almacenar hidrocarburos, y la evaluación de la metodología en tanques en servicio.

**Objetivos específicos:**

- 1) Búsqueda bibliográfica sobre diseño y evaluación de tanques atmosféricos para su construcción y explotación.
- 2) Aplicar las normas API 650/13, EN 14015/04, EN 1993-4-2/07 y EN 1993-1-1/05, para el diseño y evaluación de los componentes del tanque.
- 3) Utilizar el software Intergraph Tank 2016 para la comparación con los resultados del cálculo por el método analítico.
- 4) Utilizar el software SAP 2000 V14 para el análisis estructural del tanque.



## CAPÍTULO I.

### GENERALIDADES SOBRE LOS TANQUES DE ALMACENAMIENTO.

#### 1.1 Clasificación del tanque

Hay muchas formas de clasificar un tanque, pero no existe un método universal. Sin embargo, una clasificación comúnmente empleada por códigos, estándares y regulaciones se basa en la presión interna de un tanque. Este método es útil, porque depende de una propiedad física fundamental a la que todos los tanques están sometidos a presión interna o externa.

##### 1.1.1 Tanques atmosféricos.

Los tanques atmosféricos generalmente funcionan a presión interna ligeramente por encima de la presión atmosférica, tal vez hasta 12.7 mm y usualmente solo unos pocos milímetros por encima. Los códigos de incendio definen un tanque atmosférico como operando desde la atmosférica hasta 0.003 MPa por encima de la presión atmosférica.

##### 1.1.2 Tanques de baja presión.

Los tanques de baja presión están diseñados para trabajar a una presión más alta que la atmosférica entre un rango de presión desde 0.03 MPa hasta 0.103 MPa.

##### 1.1.3 Recipientes a presión.

Son considerados recipientes a presión los que operan por encima de 0.103 MPa. Debido a que los recipientes a presión se tratan de forma especializada, el código que aplica es ASME VIII Div. 1 y Div. 2 (Myers, 1997).

#### 1.2 Consideraciones de materiales.



### **1.2.1 Selección de materiales.**

Los aceros utilizados para el diseño de tanques atmosféricos de almacenamiento son los aceros al manganeso, que tienen un límite fluencia mínimo especificado de aproximadamente 205 a 415 MPa.

El código API 650 ha adoptado algunas normas de materiales que pueden ser utilizadas en la selección de material, tanto para el diseño como la construcción, siendo las siguientes:

#### **1) Especificaciones de ASTM.**

Las placas que conforman a las siguientes especificaciones ASTM son aceptable mientras que las placas están dentro de las limitaciones reguladas.

- a) ASTM A36M/A36, para placas hasta un espesor máximo de 40 mm;
- b) ASTM A516M Grades 380, 415, 450, 485, para placas hasta un máximo de espesor de 40 mm;
- c) ASTM A537M/A537, Clase 1 y Clase 2, para placas hasta un máximo de espesor de 45 mm;
- d) ASTM A573M Grades 400, 450, 485, para placas hasta un máximo de espesor de 40 mm;
- e) ASTM A633M/A633, Grades C and D, para placas hasta un máximo de espesor de 45 mm.

En el 2011 como adición, los aceros por la norma europea son aceptados por el código API 650, siendo los siguientes:

#### **2) Especificación EN.**

Las placas suministradas por la EN 10025/04 en grado S275 y S355 es aceptable dentro de las siguientes limitaciones:

- a) Grado S275 en calidades J0 and J2, para placas hasta un máximo de espesor de 40 mm;
- b) Grado S355 en calidades J0, J2 and K2, para placas hasta un máximo de espesor de 45 mm (Garner, 2003).



Los aceros en función de su calidad desde el punto de vista metalúrgico, se dividen en grupo como se muestra en la tabla 1-1.

Grupo I.	Grupo II.	Grupo IV	Grupo IV A	Grupo VI.
A36M	A36M <sup>(1)</sup>	A516M-485 S275 J0 S355 J0	A573M-485 S275 J2 S355 J2 S355 K2	A633M C A633M D A537M-Clase 2

**Tabla 1-1.** Grupo de materiales.

(1) Para espesores  $\leq 20$  mm tendrá un contenido de manganeso de 0.80 % a 1.2 % por análisis térmico.

### 1.2.2 Costos optimizados en la selección de materiales.

Existe una variedad de materiales aceptables en función de los requisitos generales del código API 650, donde se debe realizar una evaluación práctica de dichos materiales para su uso. La relación costo-beneficio entre el fabricante-proveedor, la disponibilidad de materiales son requerimientos esenciales para el diseño y fabricación de tanques de almacenamiento.

Para tanques de menos de 13 mm de espesor, el acero ASTM A36M, se usa ampliamente debido a su bajo costo, la soldabilidad y disponibilidad en forma de placa y estructura. Cuando la resistencia del acero A36M es insuficiente, este es modificado agregándole manganeso en el rango de 0.8 al 1.2 %.

Para tanques de más de 13 mm de espesor, el acero ASTM A573M-485 es una buena opción de uso debido a su perfil económico. Aunque, su costo está entre un 5 y 6 % más sobre el A36M, tiene una tensión permisible aproximadamente



un 20 por ciento más alto que A36M (193 frente a 160 MPa). El acero ASTM A516M-485 es usado donde se requiere una buena tenacidad.

Para tanques grandes diámetros, los aceros de mayor resistencia se usan debido a la economía que resulta de las tensiones más altas permitidas. Los aceros permitidos en API 650 se fabrican mediante prácticas que mejoran tanto la resistencia como la tenacidad al impacto. Dado que hay un límite máximo de espesor de 45 mm en las envolventes de los tanques de almacenamiento, esto a menudo limita la elección de aceros en tanques de gran capacidad. Los aceros comunes para el diseño de tanques de grandes diámetros son ASTM A537M Clase 2, A633M C y A633M D (API Standard, 2013).

### **1.3 Techo del tanque de almacenamiento.**

El techo es aquella parte de un tanque de almacenamiento capaz de soportar las cargas de diseño que se originan en el transcurso de la vida útil de este, teniendo como objetivo impedir la entrada de sustancias peligrosas que puedan ocasionar daños a la estructura del tanque y puedan contaminar al producto almacenado. Se encuentra en la parte superior del tanque conformado por placas estructuras rigidizadoras.

En ocasiones el techo es diseñado de diferentes formas y con pendientes que van desde 5 grados hasta 30 grados con respecto a la horizontal del tanque. Estas formas y pendientes dependen mucho del producto que contenga y de las presiones internas que se originen en el interior.

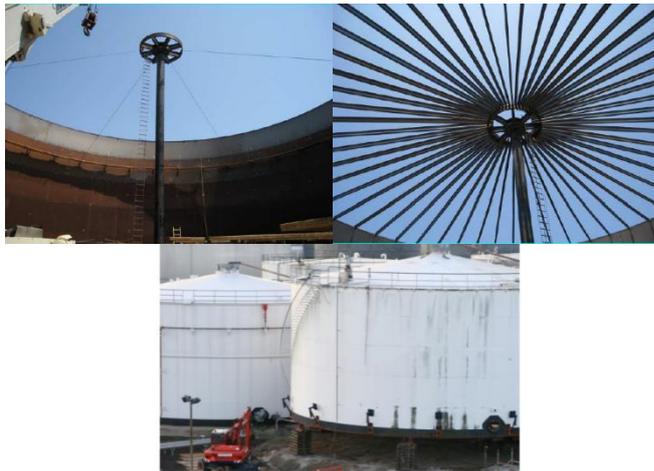
#### **1.3.1 Tipos de techo fijo para tanques de almacenamiento.**

##### **1.3.1.2 Techo cónico.**

Los tanques de techo cónico son tanques cilíndricos con un eje vertical de simetría. La parte inferior suele ser plana, y la parte superior está hecha en forma de cono poco profundo como se muestra la figura 1-1. Estos son los tanques más utilizados para el almacenamiento de productos, son muy económicos de



construir hasta un diámetro máximo de 22.8 m y se respaldan a varios contratistas capaces de construirlos. Se pueden fabricar en taller en tamaños pequeños, pero con mayor frecuencia se construyen en el campo. Los tanques de techo cónico generalmente tienen vigas de techo y columnas de soporte, excepto en tanques de diámetro muy pequeño.



**Figura 1-1.** Tanque de techo cónico.

### 1.3.1.3 Techo tipo sombrilla.

Estos son similares a los tanques de techo cónico, pero el techo parece una sombrilla, de ahí su nombre como se muestra en la figura 1-2. Por lo general, están contruidos con un diámetro que no supera los 18.2 m. Estos techos en el tanque pueden ser una estructura auto-soportada, lo que significa que no hay soportes de columna que se deben ejecutar hasta el fondo.



**Figura 1-2.** Tanques de techo sombrilla.



#### **1.3.1.4 Techo tipo domos.**

Estos techos son similares a los tanques de techo sombrilla, excepto que el techo se aproxima más a una superficie esférica, que las secciones segmentadas de un techo sombrilla como se muestra en la figura 1-3. Estos techos se diseñan para diámetros que no superan los 45 m.



**Figura 1-3.** Tanque de techo tipo domo.

#### **1.4 Tipos de fondos de tanques.**

Los fondos son diseñados para la eliminación de agua o material de sedimentos permitiendo la facilidad de limpieza del tanque.

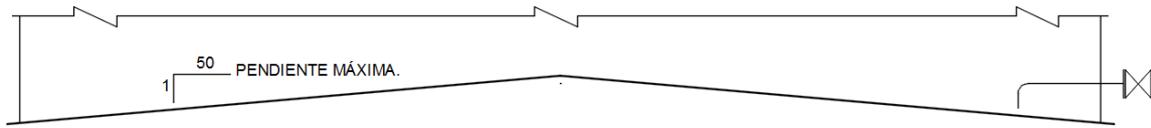
##### **1.4.1 Fondo plano.**

Para tanques de menos de 6.09 m a 9.14 m de diámetro, se usa el tanque de fondo plano. La inclusión de una pendiente pequeña no proporciona ningún beneficio sustancial, por lo que se fabricaron tan cerca del plano como sea práctico.

##### **1.4.2 Fondo de cono superior.**

Estos fondos están contruidos con un punto alto en el centro del tanque. Esto se logra coronando los cimientos y construyendo el tanque en la corona. La pendiente está limitada a aproximadamente 1 en 50 (2 %) como muestra la figura 1-4. Por lo tanto, el fondo puede parecer plano, pero el material pesado o el agua tenderán a drenarse hasta el borde de la pared del tanque.

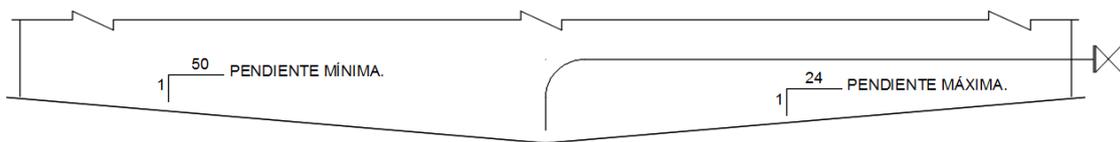




**Figura 1-4.** Fondo de cono superior.

### 1.4.3 Fondo de cono inferior.

Estos fondos están contruidos con el cono inclinado hacia el centro del tanque con una pendiente mínima de 1 en 50 (2 %) y una pendiente máxima 1 en 24 (4 %), mostrado en la figura 1-5. Por lo general, en estos fondos se le coloca sumidero de recolección en el centro (Myers, 1997).



**Figura 1-5.** Fondo de cono inferior.

## 1.5 Uniones soldadas aplicadas a los tanques de almacenamiento.

### 1.5.1 Electrodo de soldadura.

Para la soldadura de materiales con una resistencia a la tracción mínima inferior a 550 MPa, los electrodos de soldadura por arco manual deben cumplir con las series de clasificación E60 y E70 (adecuadas para las características de corriente eléctrica, la posición de la soldadura y otras condiciones de uso previsto) en AWS A5.1.

Para la soldadura de materiales con una resistencia a la tracción mínima de 550 MPa a 585 MPa, los electrodos de soldadura por arco manual deben cumplir con la serie de clasificación E80XX-CX en AWS A5.5.



### 1.5.2 Símbolos de soldadura.

Los símbolos de soldadura utilizados en los dibujos serán los símbolos de la American Welding Society (AWS).

Los distintos tipos de soldaduras que pueden ser empleados en este tipo de tanques se representan en la tabla 1-2.

Tipo de soldadura								Soldadura de campo	Soldadura todo alrededor	Enrasado
Cordón	Filete	Ranura de las piezas								
		Rectangular	V	Bisel	U	J	Tapón			
										

**Tabla 1-2.** Símbolos de uniones soldadas.

### 1.5.3 Uniones Verticales en la envolvente.

- Las uniones verticales en la envolvente serían unión a tope con fusión y penetración completa alcanzada por doble soldadura u otro medio que se obtendría la misma calidad del metal de soldadura depositado sobre la superficie de soldadura interior y exterior.
- Las uniones verticales de los anillos adyacentes no deben ser colineales, estando separadas por una distancia mínima de  $5 * t$ , siendo  $t$  el espesor de la placa de más espesor en el punto de desfase.

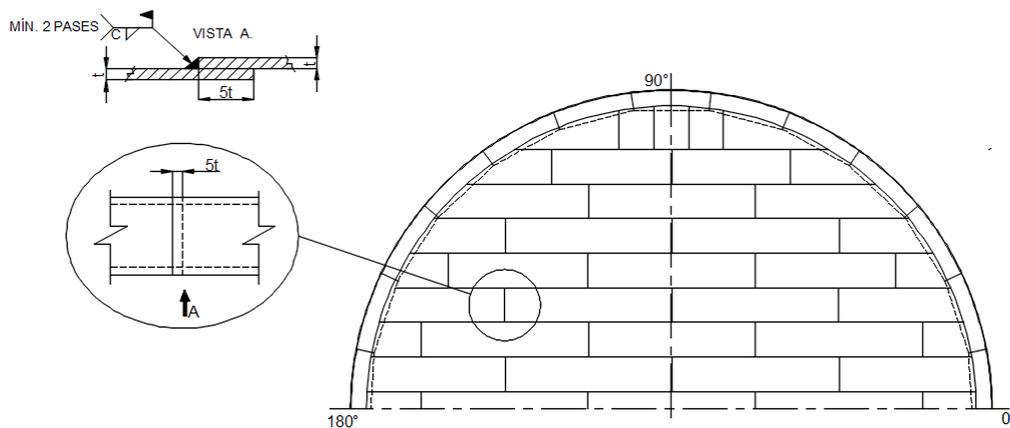
### 1.5.4 Uniones Horizontales entre los anillos de la envolvente.

- Las uniones horizontales de la envolvente serían uniones de fusión y penetración completa, además, el ángulo de tope podrá ser unido a la envolvente por una unión a solape de doble soldadura.
- Al menos otra cosa sea especificada, los bordes de las placas de la envolvente tendrían una línea vertical común (BS., 1989).



### 1.5.5 Uniones a solapes entre las placas del fondo del tanque.

Las placas del fondo serán rectangulares, con longitudes y anchos comerciales, bordes rectangulares y estas se colocarán solapadas permitiendo la soldadura de filete representado en la figura 1-6, para evitar las deformaciones que se pueda generar por la presión de la columna de líquido en el fondo.

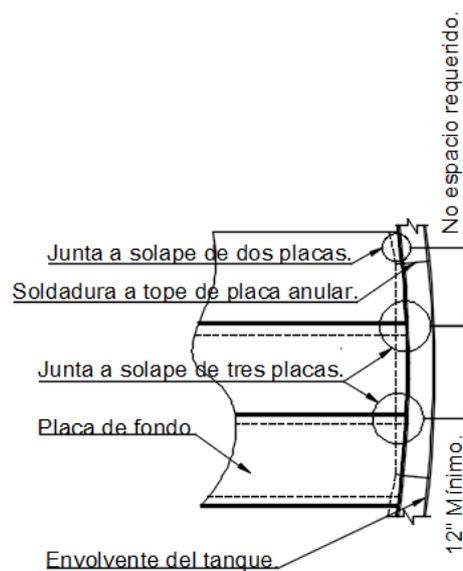


**Figura 1-6.** Esquema de la soldadura de filete en el fondo.

### 1.5.6 Uniones de tres placas a solape en el fondo.

Los solapes de tres placas en el fondo del tanque deben estar al menos a 300 mm una de la otra, desde la envolvente del tanque, y de juntas entre placas anulares y el fondo. Se crea un solape de tres placas donde tres placas se unen y todas las placas están unidas entre sí mediante soldaduras de solape. Una ubicación donde un par de placas inferiores están soldadas entre sí y se traslapan sobre una placa anular constituye un solape de tres placas, pero se traslapa una sola placa inferior sobre una soldadura a tope de la placa anular no constituye una soldadura de solape de tres placas, ya que las dos placas anulares no están unidas juntos por una soldadura a solape. Estas conexiones de unión de solape a la placa anular de soldadura a tope se ilustran en la figura 1-7.



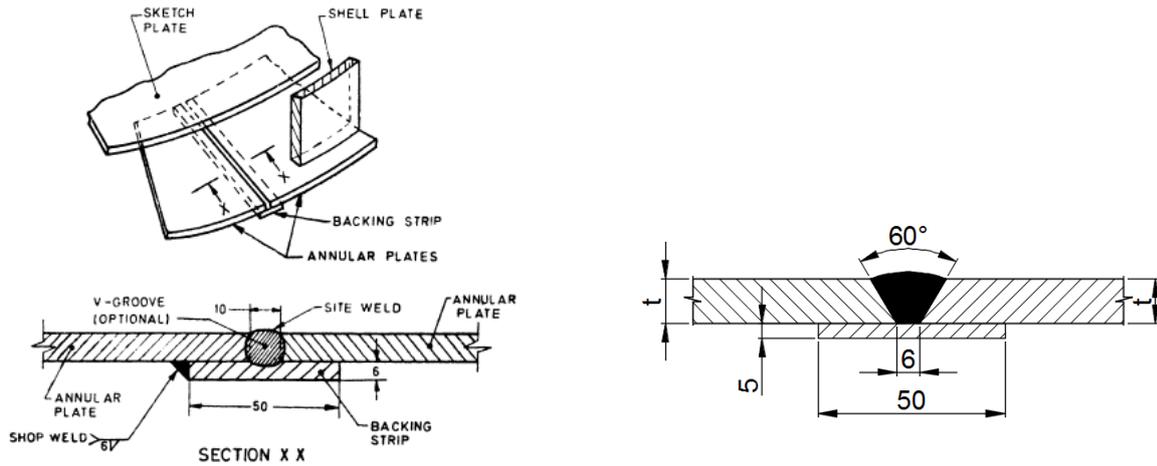


**Figura 1-7.** Espacio de soldadura de tres placas en los anillos anular.

### 1.5.7 Uniones de las placas anulares.

Las placas de fondo soldadas a tope deben tener sus bordes paralelos preparados para la soldadura a tope con ranuras cuadradas o en V. Las soldaduras a tope se realizarán utilizando una configuración de unión de soldadura adecuada que produzca una soldadura de penetración completa. Las soldaduras a tope de fondo admisibles típicas sin una tira de refuerzo son las mismas que las que se muestran en la figura 1-8a. El uso de una tira de refuerzo de al menos 3 mm de espesor, soldada a la parte inferior de la placa es permitido. Las soldaduras a tope con una tira de refuerzo se muestran en la figura 1-8b. Si se emplean ranuras, las aberturas de la raíz no deben ser inferiores a 6 mm. Se usará un espaciador de metal para mantener la apertura de la raíz entre los bordes de la placa contigua a menos que el fabricante presente otro método de soldadura a tope en el fondo con la aprobación del comprador. Las juntas de tres placas en el fondo del tanque deben estar al menos a 300 mm una de la otra y de la envoltorio del tanque.





a) Ranura cuadrada.

b) Ranura en V.

**Figura 1-8.** Representación de la soldadura a tope en las uniones de las placas anulares.

**1.5.8 Unión de la envolvente al fondo del tanque.**

a) Para fondo con placa anular con espesores nominales de 13 mm o menores, la unión entre el borde del primer anillo y la placa del fondo será una soldadura de filete de manera continua colocado en ambos lados de la placa de la envolvente. El tamaño de la soldadura no será más que 13 mm y no será menor que el espesor nominal del espesor más delgado de las dos placas unidas (es decir, la placa de la envolvente o la placa del fondo inmediatamente bajo la envolvente) o menor que los siguientes valores como se muestra en la tabla 1-3.

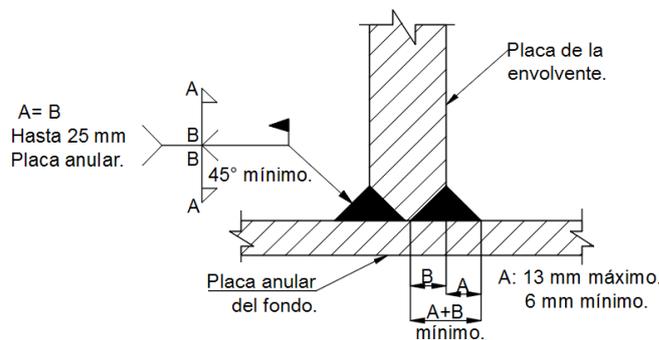
Espesor nominal de la placa de la envolvente, mm.	Tamaño mínimo de la soldadura de filete, mm.
5	5
> 5 a 20	6
> 20 a 32	8



> 32 a 45	10
-----------	----

**Tabla 1-3.** Mínimo tamaño del filete de soldadura de la unión fondo primer anillo.

Para placas anulares con un espesor nominal mayor de 13 mm, la unión de la soldadura sería dimensionada luego que ambos pies de la soldadura de filete o la profundidad más pie del filete para una soldadura combinada es de un tamaño igual al espesor de la placa anular como muestra la figura 1-9, pero no excederá el espesor de la placa de la envolvente.



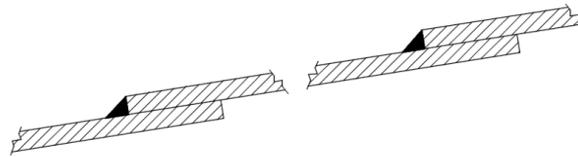
**Figura 1-9.** Detalle de la soldadura de ranura de doble filete para placas de fondo anular con espesores nominales mayores de 13 mm.

### 1.5.9 Unión del techo y el ángulo de tope.

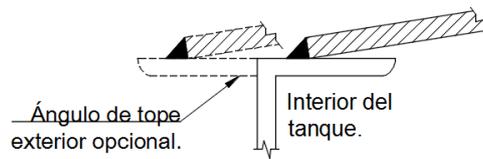
Estas uniones dependen de los siguientes requisitos:

- Las placas de techo, como mínimo, deben soldarse a solape en el lado superior con una soldadura continua de filete completa en todas las costuras como muestra la figura 1-10. Las soldaduras a tope también están permitidas.
- Para techos frágiles, las placas del techo serán soldadas al ángulo de tope del tanque con una soldadura de filete continuo, sólo, por un lado, como se muestra en la figura 1-11.
- La sección del ángulo de tope, el anillo de tensión, y anillo de compresión serán unidos por soldadura a tope teniendo una fusión y penetración completa.



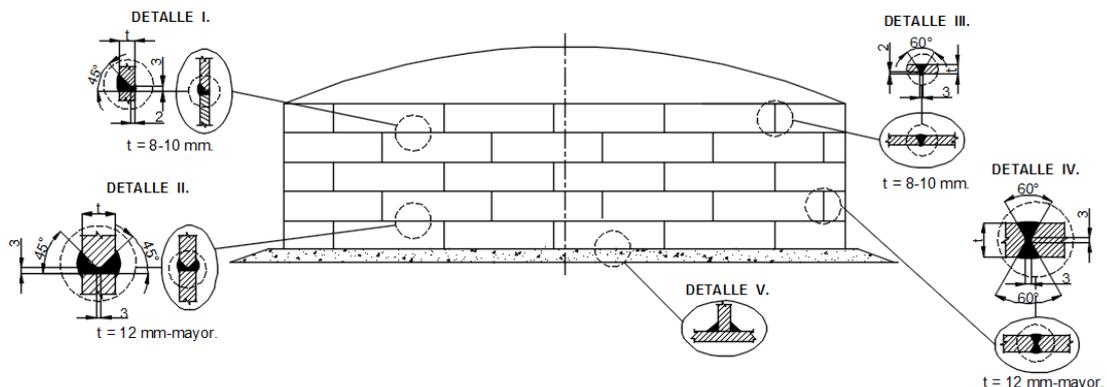


**Figura 1-10.** Unión de las placas del techo.



**Figura 1-11.** Unión del techo con el ángulo de tope.

En la figura 1-12 se muestra los detalles de la soldadura en las diferentes partes del tanque. La unión soldada entre anillos horizontales del mismo espesor se representa en el detalle I; la unión soldada de las verticales de los anillos del mismo espesor se muestra en el detalle III. La unión soldada entre anillos horizontales de diferente espesor se representa en el detalle II; la unión soldada de las verticales de los anillos de diferente espesor se muestra en el detalle IV y la soldadura de la unión soldada entre el fondo y el primer anillo se muestra en el detalle V.



**Figura 1-12.** Detalles de la unión soldada en el tanque.



## **1.6 Boquillas en tanques de almacenamiento.**

Las boquillas son aberturas que se realizan al cuerpo del tanque de almacenamiento, con la finalidad de que este pueda tener llegada de líneas de tuberías para la succión o descarga del producto a almacenar y también para conectar instrumentos capaces de monitorear el tanque desde un cuarto de control y este pueda tener un funcionamiento idóneo.

Dentro de las partes principales de una boquilla, encontramos las tuberías de acero al carbón de Schedule 80 aproximadamente, placas roladas al cuerpo y bridas, que sirven de acoplamiento para una tubería existente o para un instrumento de control del tanque.

Las principales boquillas que debe de tener un tanque:

- 1) Entrada (s) de producto (s).
- 2) Salida (s) de producto (s).
- 3) Drene (con o sin sumidero).
- 4) Registro de entrada hombre.
- 5) Muestreo (s).
- 6) Venteo.
- 7) Drenaje del tanque.
- 8) Cámara de espuma.
- 9) Indicador de nivel.
- 10) Entrada de vapor.

### **1.6.1 Boquillas en las paredes del tanque.**

Las boquillas bridadas y/o roscadas, podrán ser del tipo SLIP ON, WELDING NECK, LAP JOINT, cuando el usuario así lo solicite.

Todas las boquillas de 76 mm de diámetro y mayores deberán contar con una placa de refuerzo (cuyas dimensiones están especificadas en el Standard API 650) con el fin de absorber la concentración de esfuerzos debidos a la



perforación hecha al cilindro, el refuerzo además contará con un agujero de 6.3 mm de diámetro roscado con cuerda NPT, con la finalidad de que por ellos salga la acumulación de gases al realizar la soldadura y para que, posteriormente, se realice una prueba de hermeticidad.

En el caso de que sean boquillas de 76 mm de diámetro, o menores, que tengan un servicio exclusivo de instrumentación o que no presenten carga debida a la línea, podrán colocarse en un ángulo no mayor de 15° con respecto al plano vertical y no llevarán una placa de refuerzo.

### **Boquillas en el techo.**

Las boquillas del techo pueden ser del tipo SLIP-ON Y WELDING NECK, las cuales están de acuerdo con los requerimientos de la clase 10.5 Kg/cm.<sup>2</sup> (150) para bridas forjadas de acero al carbón de cara realzada en ANSI B16.5. Las bridas tipo anillo serán conforme a todas las dimensiones de las bridas SLIP-ON, excepto en la extensión del HUB, que puede ser omitido.

Las boquillas bridadas o roscadas con diámetro de 150 mm y menores no requieren placa de refuerzo, a menos que así lo solicite el cliente. Se recomienda que todas las boquillas no sean mayores de 300 mm de diámetro, excepto las entradas hombre.

### **1.7 Entradas de hombres en la envolvente.**

Los tanques de almacenamiento contarán como mínimo con dos entradas hombre en la envolvente con la finalidad de poder realizar limpieza, revisiones o reparaciones en el interior del tanque. En la tabla 1-4 se muestra los diámetros y cantidad de entrada de hombres en la envolvente del tanque en función del diámetro.

Las entradas hombres contarán con una placa de refuerzo, la cual tendrá un agujero de 6.3 mm. de diámetro con rosca NPT para prueba neumática,



quedando estos sobre las líneas de centro verticales u horizontales y abiertos a la atmósfera.

Diámetro nominal del tanque, (m).	Entrada de hombres.	
	Números.	Diámetro mm.
> 27- 60	2	600
	1	900

**Tabla 1-4.** Número de entradas de hombre en la envolvente en función del diámetro del tanque.

### 1.8 Entradas de hombres en el techo.

Los tanques de almacenamiento contarán como mínimo con dos entradas de hombre en el techo, con la finalidad de poder obtener buena iluminación en el interior del tanque durante su inspección o reparación. En la tabla 1-5 se muestra los diámetros y cantidad de entrada de hombres en el tanque, en función del diámetro.

Diámetro nominal del tanque, (m).	Entrada de hombre en el techo.	
	Números.	Diámetro mm.
> 27- 60	2	600

**Tabla 1-5.** Número de entradas de hombre en el techo en función del diámetro del tanque.



### **1.9 Plataformas, pasarelas y escaleras.**

- a) Las plataformas, pasarelas y escaleras deben estar de acuerdo con la norma de seguridad nacional equivalente y los requisitos en este documento, excepto como se indica aquí
- b) Para ver ejemplos de detalles aceptables, consulte los detalles estándar de Prácticas de Industria de Proceso PIP STF05501, PIP STF05520, and PIP STF05521.

#### **1.9.1 Requisitos para plataformas y pasarelas.**

- 1) Todas las partes serán de metal.
- 2) El ancho mínimo de la pasarela será de 610 mm, después de realizar ajustes en todas las proyecciones.
- 3) El piso debe estar hecho de material de rejilla o antideslizante.
- 4) La altura de la barandilla superior sobre el piso debe ser de 1070 mm.
- 5) La altura mínima del tablero debe ser de 75 mm.
- 6) El espacio máximo entre la parte superior del piso y la parte inferior del tablero debe ser de 6 mm.
- 7) La altura de la baranda media debe ser aproximadamente la mitad de la distancia desde la parte superior de la pasarela hasta la parte superior de la baranda.
- 8) La distancia máxima entre los postes de la barandilla será de 2400 mm.
- 9) La estructura completa debe ser capaz de soportar una carga concentrada móvil de 4450 N, y la estructura del pasamanos debe ser capaz de soportar una carga de 900 N aplicada en cualquier dirección en cualquier punto en el riel superior.
- 10) Los pasamanos deberán estar a ambos lados de la plataforma, pero deberán interrumpirse cuando sea necesario para acceder.
- 11) En las aberturas de los pasamanos, cualquier espacio más ancho que 150.0 mm entre el tanque y la plataforma debe tener pisos.
- 12) Una pista de tanque que se extienda desde una parte de un tanque a cualquier parte de un tanque adyacente, al suelo u otra estructura deberán



estar apoyadas de manera que se permita el libre movimiento relativo de las estructuras unidas por la pista. Esto se puede lograr mediante la fijación firme de la pista a un tanque y el uso de una junta deslizante en el punto de contacto entre la pista y el otro tanque. (Este método permite que el tanque se asiente o sea interrumpido por una explosión sin que el otro tanque esté en peligro.

### **1.9.2 Requisitos para escaleras.**

- 1) Todas las partes serán de metal.
- 2) El ancho mínimo de las escaleras debe ser de 710 mm.
- 3) El ángulo máximo de la escalera con una línea horizontal será de 50 grados.
- 4) El ancho mínimo de los peldaños de la escalera debe ser de 200 mm. La suma del doble de la elevación de los peldaños de la escalera más la carrera definida como la distancia horizontal entre las narices de las piezas sucesivas de la banda de rodadura, no debe ser inferior a 610 mm o más de 660 mm. Las subidas serán uniformes en toda la altura de la escalera.
- 5) Las huellas deben estar hechas de material de rejilla o antideslizante.
- 6) La barandilla superior se unirá a los pasamanos de la plataforma sin desplazamiento, y la altura medida verticalmente desde el nivel de la banda de rodadura en la punta de la banda de rodadura será de 760 mm a 860 mm.
- 7) La distancia máxima entre los postes de la barandilla, medida a lo largo de la pendiente de la barandilla, será de 2400 mm.
- 8) La estructura completa debe ser capaz de soportar una carga concentrada móvil de 4450 N, y la estructura del pasamanos debe ser capaz de soportar una carga de 900 N aplicada en cualquier dirección en cualquier punto en el riel superior.
- 9) Los pasamanos deberán estar a ambos lados de las escaleras rectas; los pasamanos también deberán estar a ambos lados de las escaleras



circulares cuando el espacio libre entre la envolvente del tanque y el larguero de la escalera exceda los 200 mm.

- 10) Las escaleras circunferenciales deben estar completamente apoyadas en la envolvente del tanque, y los extremos de los largueros deben estar libres del suelo. Las escaleras se extenderán desde el fondo del tanque hasta el aterrizaje del borde del techo o la plataforma del medidor.

### **1.10 Normativa aplicada en el diseño de tanques de almacenamiento.**

Dada la necesidad que se ha manifestado en la industria del petróleo de reunir en un único documento los criterios de diseño fabricación, montaje, inspección y reparación de tanques, el Instituto Americano del Petróleo (API) ha hecho una recopilación de toda la información de la experiencia de compradores y fabricantes. Como consecuencia, se elaboró una estandarización que permitiese cumplir con normativa de seguridad, además de otras como aspectos ambientales o de higiene.

Los códigos API-650, API-620 son empleados para la construcción y diseño en relación a los tanques.

#### **1.10.1 Norma API-650.**

El cálculo de las características de diseño del tanque en cuestión se ha realizado tomando como referencia la norma Standard API-650.

Esta norma establece los requisitos necesarios para diseñar tanques de almacenamiento de fluidos (no necesariamente petróleo o derivados) cilíndricos, de fondo uniforme, de cualquier tamaño, con presiones internas cercanas a la atmosférica, con una temperatura máxima de diseño de 93°C generalmente (ampliable según anexos) y que no tengan un uso de servicios de refrigeración (API Standard, 2013).

#### **1.10.2 Norma API-620.**

Esta norma regula la fabricación de tanques de almacenamiento que contienen un producto a baja presión. Además, los tanques que siguen esta norma pueden almacenar productos a temperaturas inferiores que los que permite API-650.



## 1.11 Análisis hidrostático en el tanque de almacenamiento.

### 1.11.1 Presión.

Para los tanques se utilizan comúnmente pulgadas de columna de agua para expresar el valor de la presión o el vacío en el espacio de vapor de un tanque, porque la presión suele ser muy baja en relación con la presión atmosférica. En la tabla 1-6 se muestra la relación de la presión y columna de agua (Aldaz, 20014).

Presión, psi.	Pulgadas de columna de agua.
1	27.68068

**Tabla 1-6.** Relación entre la presión y la columna de agua.

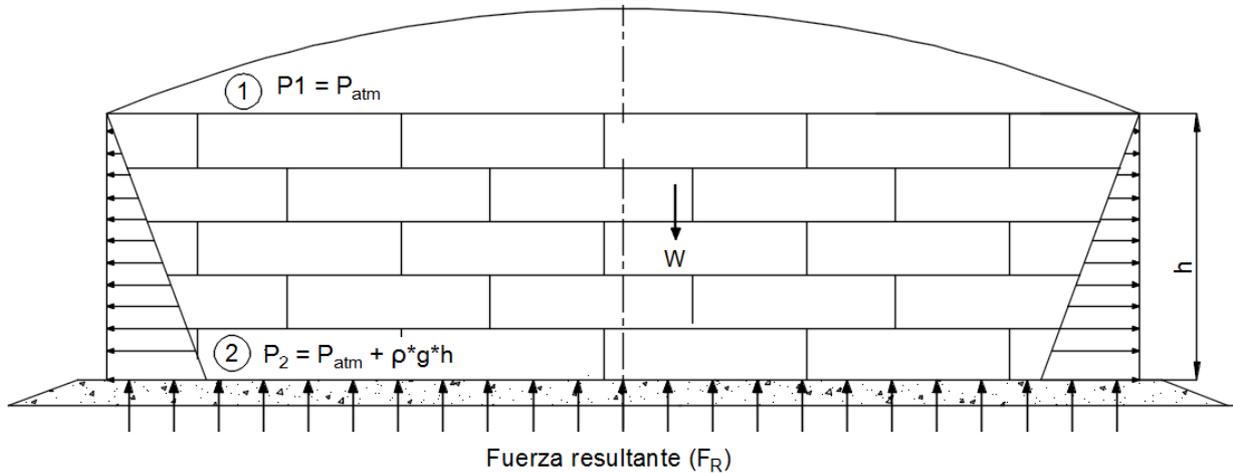
Aunque tanto las formas cilíndricas como las envolventes esféricas tienen teorías simples para determinar esfuerzo y, por lo tanto, el espesor de los tanques, la región del tanque que es más compleja de diseñar es la unión de techo a la envolvente. Esto se debe al hecho de que cuando hay una presión interna que excede el peso de las placas del techo y la estructura del techo, esta unión quiere separarse de la envolvente. Cuando los tanques se someten a una presión suficiente para dañarlos, la unión techo a la envolvente suele ser la primera área que muestra daños.

### 1.11.2 Variación de presión con la profundidad.

La presión en un fluido en reposo no cambia en la dirección horizontal. Esto se puede mostrar fácilmente considerando una delgada capa horizontal de fluido y haciendo un equilibrio de fuerza en cualquier dirección horizontal. Sin embargo, este no es el caso en la dirección vertical en un campo de gravedad. La presión en un fluido aumenta con la profundidad debido a más resto de fluido sobre la capa más profunda y el efecto de este “extra peso” sobre una capa más profunda



es equilibrada por un incremento en la presión como se muestra en la figura 1-13.



**Figura 1-13.** Presión del fluido debido al peso en el plano vertical.

**1.11.3 Se establecen los cálculos que relaciona el volumen, la presión y el peso del fluido y su influencia en la superficie plana del fondo.**

**1.11.3.1 Cálculo del volumen de la columna de fluido.**

$$V = \frac{\pi * (D)^2}{4} * h \tag{1-1}$$

**1.11.3.2 Cálculo de la presión de la columna de fluido a una profundidad (h).**

$$P = \rho * g * h \tag{1-2}$$

**1.11.3.3 Cálculo de la masa de fluido.**



$$m = \rho * V \quad (1-3)$$

**1.11.3.4 Cálculo del peso de la columna de fluido, que es obtenido por la multiplicación de la constante gravitacional.**

$$W = m * g \quad (1-4)$$

**1.11.3.5 La presión sobre el fondo es el peso por unidad de área.**

$$P = \frac{W}{A} \quad (1-5)$$

**1.11.4 Cálculo de la fuerza hidrostática resultante sobre una superficie plana.**

Cuando una superficie se sumerge en un fluido, se desarrollan fuerzas sobre la superficie. Superficie debido al fluido. La determinación de estas fuerzas es importante en el diseño de tanques de almacenamiento, barcos, represas y otras estructuras hidráulicas. Para fluidos en reposo nosotros conocemos debido a que la fuerza debe ser perpendicular a la superficie ya que no hay esfuerzos de cizallamiento presentes. La presión varía linealmente con la profundidad si el fluido no es comprimible. Para una superficie horizontal, como en la parte inferior de un tanque lleno de líquido figura 1-13, la magnitud de la fuerza resultante es (Cengel, 2004):

$$F_R = P * A \quad (1-6)$$



## **1.12 Métodos de examen de uniones soldadas.**

### **1.12.1 Método radiográfico.**

Las placas se considerarán del mismo espesor cuando la diferencia en su espesor especificado o de diseño no exceda los 3 mm.

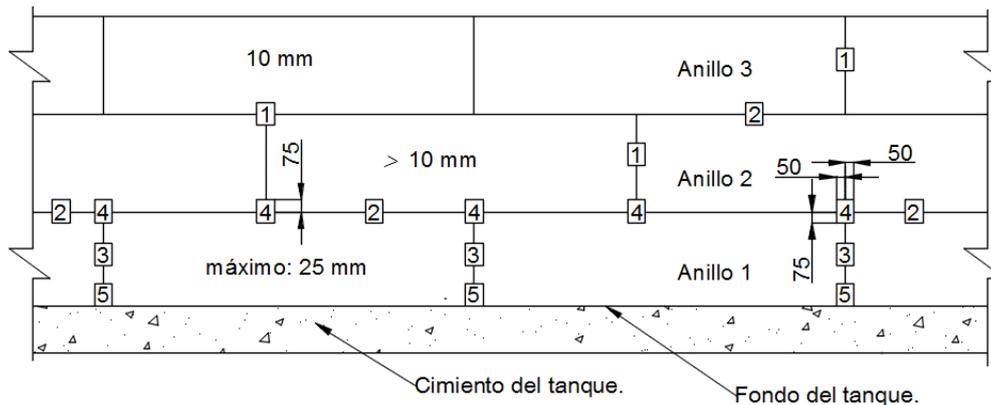
#### **1.12.1.1 Aplicación.**

Se requiere un examen radiográfico para soldaduras a tope en la envolvente, en las soldaduras a tope de placa anular y conexiones de tipo empotrado con soldaduras a tope. No se requiere examen radiográfico para lo siguiente: soldaduras de placa de techo, soldaduras de placa de fondo, soldaduras que unen el ángulo de tope con el techo o la envolvente, unión de soldaduras la placa de la envolvente a la placa del fondo, las soldaduras en la boquilla y los cuellos de entrada hechos en la placa, o las soldaduras de accesorios al tanque.

#### **1.12.1.2 Requisitos que aplican a las juntas verticales.**

Para juntas soldadas a tope en las que la placa de la envolvente más delgada es mayor de 10 mm, pero menor o igual que 25 mm de espesor. Además, todas las uniones verticales y las juntas horizontales en las placas en este rango de espesor se le hará ensayo radiográfico. Cada placa radiográfica debe mostrar claramente no menos de 75 mm de soldadura vertical y 50 mm de longitud de soldadura a cada lado de la intersección vertical. En el anillo más bajo, se tomarán dos radiografías puntuales en cada junta vertical: una de las radiografías estará lo más cerca posible hacia abajo como sea posible, y la otra se tomará al azar, como es mostrado en la figura 1-14.





10 mm < espesor de placa ≤ 25 mm.

**Figura 1-14-** Requerimientos radiográficos para la envolvente.

### 1.13 Ensayo de vacío para el techo y el fondo.

La prueba de vacío se realiza utilizando una caja de prueba de aproximadamente 150 mm de ancho por 750 mm de longitud con una ventana transparente en la parte superior, que proporciona una visibilidad adecuada para ver el área bajo examen. Durante la prueba, la iluminación debe ser adecuada para la evaluación e interpretación adecuadas de la prueba. El fondo abierto se sellará contra la superficie del tanque con una junta adecuada. Se deben proporcionar conexiones, válvulas, iluminación y medidores, según sea necesario. Se utilizará una solución de película de jabón o solución comercial de detección de fugas, aplicable a las condiciones.

La prueba de vacío se realizará de acuerdo con un procedimiento escrito preparado por el fabricante del tanque, requiriendo:

- a) realizar un examen visual del fondo y las soldaduras antes de realizar la prueba de la caja de vacío;
- b) verificar el estado de la caja de vacío y sus juntas de estanqueidad;
- c) verificar que no hay una burbuja rápida o una respuesta de escupir a fugas grandes;



d) aplicar la solución de película a un área seca, de modo que el área se humedezca completamente y se produzca una generación mínima de burbujas de aplicación (API Standard, 2013).

- **Conclusiones Parciales.**

- 1) Se establecieron las clasificaciones de los tanques en función de la presión interna, los tipos de techos y los fondos para el diseño.
- 2) Todos los requisitos sobre las uniones soldadas, los ensayos no destructivos que son aplicados para la fabricación del tanque. El análisis hidrostático en la envoltura del tanque cuando actúa la carga hidrostática del fluido.



## CAPÍTULO II.

### CONSIDERACIONES PARA EL DISEÑO DE UN TANQUE DE ALMACENAMIENTO.

En este capítulo se establece la metodología para el diseño del tanque atmosférico, utilizando las normas API 650/13, EN 14015/04, EN 1993-4-2/07 y EN 1993-1-1/05.

A continuación, se muestra la nomenclatura de las fórmulas que se usarán para los cálculos.

#### 2.1 Nomenclatura.

CA: Espesor de corrosión permisible de anillo [mm];

D: Diámetro del tanque [m];

$\rho$ : Densidad del producto [ $\text{kg/m}^3$ ];

$\sigma_u$ : Esfuerzo de tensión mínimo [MPa];

$\sigma_y$ : Esfuerzo de fluencia mínimo [MPa];

G: Gravedad específica de diseño del líquido [-];

H: Altura del tanque [m];

$N_{\text{anillos}}$ : Número de anillos que componen el envolvente del tanque [-];

$S_d$ : Tensión de diseño del producto [MPa];

S: Tensión de prueba hidrostática [MPa];

$t_d$ : Espesor de condición de diseño [mm];

$t_t$ : Espesor de prueba hidrostática [mm];

E: Módulo de elasticidad [MPa];

$F_y$ : Esfuerzo de fluencia del compoente a la máxima temperatura de operación [MPa];

$H_1$ : Altura máxima sin rigidizar [m];

$h_{1, 2, n}$ : Altura de cada anillo [m];

$N_{\text{placas en el anillo}}$ : Número de placas que conforman en el anillo [-];

$P_e$ : Presión de diseño externa especificada [kPa];



$P_S$ : Presión total de diseño para la envolvente [kPa];

$t_{\text{última}}$ : Espesor del anillo más delgado situado en la parte superior de la envolvente [mm];

$V$ : Velocidad de diseño del viento [km/h];

$W$ : Presión máxima del viento [kPa];

$W_{tr}$ : Altura transformada equivalente [m];

$\psi$ : Factor de estabilidad [-];

$t_{\text{min}}$ : Espesor nominal del anillo más delgado [mm];

$H_{TS}$ : Altura transformada de la envolvente [m];

$g$ : Aceleración debido a la gravedad [ $m/s^2$ ];

$F_{y, d}$ : Esfuerzo de fluencia de diseño [MPa];

$P_{Ed}$ : Es el valor de diseño de la presión interna sobre el líquido multiplicado por un factor parcial ( $\gamma_F$ );

$r$ : Radio del tanque [m];

$t$ : Espesor de los anillos [mm];

$H_j$ : La distancia vertical desde el fondo de la junta del anillo al nivel de líquido [m];

$a$ : Es el radio exterior de la conexión de abertura, en mm;

$F_R$ : Es el empuje radial aplicado a la superficie media de la envolvente del tanque a la conexión de abertura, en N;

$F_P$ : Es la carga final de presión sobre la abertura para la presión resultante desde la carga hidrostática de producto de diseño a la elevación de la línea central de la abertura,  $\pi a^2 P$ , en N;

$K_C$ : Es el coeficiente de rigidez para el momento circunferencial, en N-mm;

$K_L$ : Es el coeficiente de rigidez para el momento longitudinal, en N-mm;

$K_R$ : Es el coeficiente de rigidez para la carga de empuje radial, en N/mm;

$L$ : Es la distancia vertical desde el eje central de abertura al fondo del tanque, en mm;

$M_C$ : Es el momento circunferencial aplicado a la superficie media de la envolvente del tanque, en N-mm;

$M_L$ : Es el momento longitudinal aplicado a la superficie media de la envolvente del tanque, en N-mm;



R: Es el radio nominal del tanque, en mm;

t: Es el espesor de la envolvente en la abertura de conexión, en mm;

$\Delta T$ : Es la temperatura de diseño normal menos la temperatura de la instalación, en °C;

W: Es el crecimiento radial no restringido de la envolvente, en mm;

$W_R$ : Es la desviación radial resultante en la conexión de abertura, en mm;

$X_A$ : Es la  $L + a$ , en mm;

$X_B$ : Es la  $L - a$ , en mm;

$X_C$ : Es la L, en mm;

$Y_C$ : Es el coeficiente determinado desde la figura P.4b;

$Y_F, Y_L$ : Son los coeficientes determinados desde la figura P.4a;

$\alpha$ : Es el coeficiente de expansión térmica del material de la envolvente, en mm/[mm-°C];

$\beta$ : Es el parámetro característico,  $1.285/(Rt)^{0.5}$  (1/mm);

$\lambda$ : Igual a  $a/(Rt)^{0.5}$ ;

$\theta$ : Es la resultante de la rotación de la Envolvente no restringida desde la carga hidrostática del producto, en radianes;

$\theta_C$ : Es la rotación de la Envolvente en el plano horizontal en la conexión de abertura resultante desde el momento circunferencial, en radianes;

$\theta_L$ : Es la rotación de la Envolvente en el plano vertical en la abertura de conexión resultante desde el momento longitudinal, en radianes.

Para el diseño y cálculo de tanques de almacenamiento, se deberá conocer la información mínima como el volumen de almacenamiento, la temperatura, la gravedad específica del líquido almacenar, corrosión permisible. El sobre espesor por corrosión que sea especificado, será incluido en el cálculo de la envolvente, fondo, techo y su estructura del tanque.

## 2.2 Diseño de la envolvente del tanque.

### 2.2.1 Cálculo del espesor requerido de cada anillo de la envolvente.

#### 2.2.1.1 Método de 1-pie.

El método de 1-Pie es utilizado para el cálculo del espesor requerido, donde se debe tener en cuenta en el punto de diseño 0.3 m por encima del fondo de cada anillo que conforma el tanque, tomando como referencia las juntas horizontales. En esta distancia, se localiza la máxima tensión que origina la columna de líquido en la pared del tanque. Este método de cálculo no debe ser usado en tanque cuyo diámetro no exceda los 61.0 m (Pazmiño, 2009).

Existen dos métodos para calcular el espesor de los anillos que componen la envolvente de un tanque, los cuales son definidos a continuación:

- a) por condición de diseño ( $t_d$ ) en base al nivel del líquido, tomando la densidad relativa del producto a almacenar;
- b) por condiciones de prueba hidrostática ( $t_t$ ) considerando el mismo nivel de diseño, pero utilizando la densidad relativa del agua.

#### a) Condición de diseño:

$$t_d = \frac{4.9 * D(H - 0.3) * G}{S_d} + CA \quad (2-1)$$

#### b) Prueba hidrostática:

$$t_t = \frac{4.9 * D(H - 0.3)}{S_t} \quad (2-2)$$



### 2.2.1.2 Método del “punto de diseño variable”.

La aplicación de este método de cálculo suministra una reducción en el espesor de los anillos de la envolvente y el peso del tanque. Este método permite construir tanques de diámetros mayores de 61 m.

### 2.3 Cálculo de las tensiones admisibles.

La tensión calculada en cada anillo no será mayor que la tensión del límite elástico del material usado para su construcción. Cuando la tensión admisible de un anillo sea menor que la tensión admisible del anillo inferior, el espesor del anillo inferior no será menor que el espesor requerido para el anillo superior, según cargas del producto y de prueba hidrostática respectivamente.

La tensión básica de diseño, ( $S_d$ ), será la menor entre 2/3 de la tensión del límite elástico ( $\sigma_y$ ) o 2/5 de la resistencia a tracción ( $\sigma_u$ ).

La tensión básica de prueba hidrostática, ( $S_t$ ), será la menor entre 3/4 la tensión del límite elástico ( $\sigma_y$ ) o 3/7 de la resistencia a tracción ( $\sigma_u$ ).

$$S_d = \text{mín} \left( \frac{2}{3} * \sigma_y; \frac{2}{5} * \sigma_u \right) \quad (2-3)$$

$$S_t = \text{mín} \left( \frac{3}{4} * \sigma_y; \frac{3}{7} * \sigma_u \right) \quad (2-4)$$

En el cálculo del espesor mínimo requerido, será tomado el mayor de los valores calculado.

En la tabla 2-1 se muestra los valores de espesores mínimos requeridos en la envolvente de tanque, en función del diámetro del tanque. Estos valores son



usados para normalizar el espesor calculado en los anillos y este de por debajo del valor tabulado.

<b>Diámetro nominal del tanque.</b>	<b>Espesor de la placa nominal.</b>
<b>m.</b>	<b>mm.</b>
< 15	5
15 a < 36	6
36 a 60	8
> 60	10

**Tabla 2-1.** Relación de espesores en función del diámetro del tanque.

## 2.4 Dimensionamiento de la envolvente en función del número de anillos y longitud de placas que conforman los anillos.

### 2.4.1 Cálculo del número de anillos de la envolvente del tanque.

$$N_{\text{anillos}} = \frac{H}{A} \tag{2-5}$$

### 2.4.2 Cálculo del número de placas en cada anillo.

$$N_{\text{placas en el anillo}} = \frac{2 * \pi * r}{L_p} \tag{2-6}$$

### 2.4.3 Viga de viento superior.



**2.4.3.1 El módulo de sección mínimo requerido del anillo de rigidez se determinará mediante la siguiente ecuación:**

$$Z = \frac{D^2 * H_2}{17} * \left(\frac{V}{190}\right)^2 \tag{2-7}$$

**2.4.4 Viga de viento intermedia.**

**2.4.4.1 La altura máxima de la envolvente sin refuerzo se calculará como sigue:**

$$H_1 = 9.47 * t * \sqrt{\left(\frac{t}{D}\right)^3 * \left(\frac{190}{V}\right)^2} \tag{2-8}$$

**2.5 Altura Transformada Equivalente.**

Después de determinar la altura máxima de la envolvente no rígida, H<sub>1</sub>, la altura de la transformación de la envolvente se calculará de la siguiente manera:

a) Con la siguiente ecuación, cambia el ancho real de cada anillo, por un ancho transpuesto de cada anillo. Por supuesto que tiene el espesor superior de la envolvente.

$$W_{tr} = \sum_1^{n_{anillos}} h_{(i)} * \sqrt{\left(\frac{t_{\text{último anillo}}}{t_{\text{actual}(i)}}\right)^5} \tag{2-9}$$

b) Agregue los anchos transpuestos de los anillos. La suma de los anchos transpuestos de los anillos dará la altura de la envolvente transformada.



**2.5.1 Cálculo del módulo de sección mínima requerida de una viga de viento intermedia se determinará por lo siguiente ecuación:**

$$Z = \frac{D^2 * h_1}{17} * \left( \frac{V}{190} \right)^2 \quad (2-10)$$

## **2.6 Aplicación del Anexo V.**

### **2.6.1 Envoltente sin rigidizar.**

El procedimiento utiliza el espesor nominal más delgado del anillo y el método de la envoltente transformada para establecer el número y las ubicaciones de los rigidizadores intermedios. Las ecuaciones ( $P_e$ ) y ( $t_{smin}$ ) contienen variables para un factor de estabilidad ( $\psi$ ) que depende de la magnitud de la presión externa de diseño. Las ecuaciones también incluyen un factor de "derribo" de 0,8 para imperfecciones en la geometría de la envoltente cilíndrica.

La envoltente será verificada por dos condiciones:

- 1) El viento combinado más la presión externa de diseño.
- 2) Sólo para diseño de presión externa.

Cada condición se verificará utilizando el factor de estabilidad apropiado, ( $\psi$ ), como sigue.

#### **Condición 1: (Viento + Presión externa de diseño)**

- 1)  $\psi = 1$  para viento más presión externa de diseño (cuando la presión externa de diseño ( $P_e$ ) es menor o igual que 0.25 kPa). Para este caso el Anexo V no es mandatorio.



- 2)  $\Psi = (Pe+0.70) / 0.95$  para viento más presión externa de diseño (cuando la presión externa de diseño ( $Pe$ ) es mayor que 0.25 kPa, pero menor o igual que 0.70 kPa).
- 3)  $\Psi = (Pe/0.48)$  para viento más presión externa de diseño (cuando la presión externa de diseño ( $Pe$ ) es mayor que 0.70 kPa; sin embargo, ( $\psi$ ) no necesita ser superior a 2.5).

**Condición 2:** Sólo para presión externa de diseño especificada.

$$\Psi = 3.0$$

### 2.6.2 Criterio de Pandeo.

Para una envolvente en el tanque no rigidizada sometida a suficiente presión externa para causar pandeo, éste ocurrirá elásticamente si se cumple el siguiente criterio.

Este criterio generalmente se cumplirá, excepto para tanques muy pequeños y excepcionalmente gruesos. Si no se cumple este criterio, los efectos de la presión externa deben evaluarse de acuerdo con los requisitos del Código ASME Sección VIII, Div 1.

$$\left(\frac{D}{t_{\text{smín}}}\right)^{0.75} * \left[\left(\frac{H_{TS}}{D}\right) * \left(\frac{F_y}{E}\right)^{0.5}\right] \geq 0.00675 \tag{2-11}$$

La presión externa de diseño total para la envolvente ( $P_s$ , usando el  $\psi$  apropiado y la presión externa de diseño especificada ( $P_e$ , usando  $\psi = 3.0$ ) no debe exceder para un tanque sin rigidización:

$$P_s \text{ o } P_e \leq \frac{E}{15203 * \psi * \left(\frac{H_{TS}}{D}\right) * \left(\frac{D}{t_{\text{smín}}}\right)^{2.5}}$$



La ecuación (Pe) se puede reescribir para calcular el espesor nominal del anillo más delgado requerido para una presión externa de diseño especificada como:

$$t_{smín} \geq \frac{47.07 * (\psi * H_{TS} * P_s)^{0.4} * D^{0.6}}{(E)^{0.4}} \quad (2-13)$$

Para tanques con anillos de espesores variables, la altura de la envolvente transformada, ( $H_{TS}$ ), para la envolvente del tanque es determinado de acuerdo con el siguiente procedimiento:

- a) La altura transformada de la envolvente es calculada como la suma de los anchos transformados de los anillos individuales como se describe en el ítem b.
- b) El ancho transformado de cada anillo individual es calculado por la multiplicación de la altura de la envolvente actual por la relación  $\left(\frac{t_{s1}}{t_{act}}\right)^{2.5}$ .

Notar que  $t_{s1} = t_{act}$  para el anillo superior.

La altura de la envolvente transformada se determina a partir de la siguiente ecuación:

$$H_{TS} = h_1 * \left(\frac{t_{s1}}{t_{s1}}\right)^{2.5} + h_2 * \left(\frac{t_{s1}}{t_{s2}}\right)^{2.5} + \dots + h_n * \left(\frac{t_{s1}}{t_{sn}}\right)^{2.5} \quad (2-14)$$

La altura de la envolvente transformada es un modelo analítico del tanque real. La envolvente transformada tiene un espesor uniforme igual al espesor superior de la envolvente y una altura igual a la altura transformada. Este modelo analítico



del tanque real tendrá esencialmente una resistencia equivalente al pandeo por presión externa como el tanque real.

## 2.7 Cálculo de la tensión normal circunferencial debido a la carga de líquido y presión interna.

Deberá ser verificada en cada anillo, usando la expresión siguiente:

$$\sigma_{NC} = [\gamma_F * \rho * g * H_{red} + P_{Ed}] * \left(\frac{r}{t}\right) \leq f_{y,d} \quad (2-15)$$

## 2.8 Aplicación del Anexo P.

Esto aplica para tanques mayores de 36 m de diámetro. Existen dos procedimientos diferentes para determinar la carga externa sobre la envolvente del tanque P.2 que establece cargas límite y P.3 sobre las tensiones permisibles. Para el cálculo será aplicada la variante de cargas límite.

### 2.8.1 Cargas límite.

#### 2.8.1.1 Coeficientes de rigidez para aberturas de conexiones.

Los coeficientes de rigidez  $K_R$ ,  $K_L$  y  $K_C$  correspondiente a la carga de la tubería,  $F_R$ ,  $M_L$  y  $M_C$  en una abertura de conexión, como es mostrado en la figura P.1.

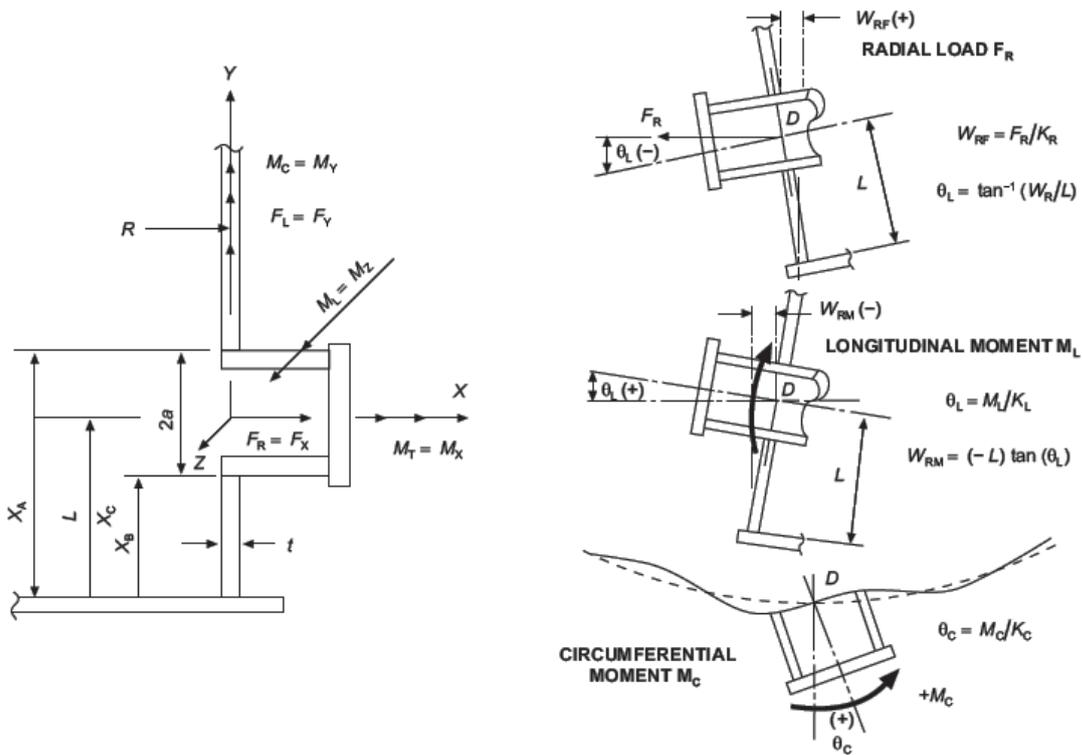
#### 2.8.1.2 Desviación y rotación de la envolvente.

- Crecimiento radial en la envolvente.

El crecimiento radial exterior libre de la envolvente en el centro de la abertura de conexión resultado desde la carga hidrostática del producto y/o la expansión térmica será determinado como sigue:



$$W = \frac{9.8 * 10^{-6} * G * H * R^2}{E * t} * \left[ 1 - e^{-\beta L} * \cos(\beta L) - \frac{L}{H} \right] + \alpha * R * \Delta T \quad (2-16)$$



**Figura 2.1.** Nomenclatura para cargas de tuberías y deformación.

### 2.8.1.3 Rotación de la envolvente.

La rotación libre de la envolvente en el centro de la conexión boquilla-envolvente resultado desde la carga hidrostática del producto será determinado como sigue:

$$\theta = \frac{9.8 * 10^{-6} * G * H * R^2}{E * t} * \left\{ \frac{1}{H} - \beta * e^{-\beta L} * [\cos(\beta L) + \sin(\beta L)] \right\} \quad (2-17)$$



#### 2.8.1.4 Determinación de cargas en la abertura de conexión.

La relación entre la deformación elástica de la abertura de conexión y la carga externa de la tubería es expresada como sigue:

$$W_R = \frac{F_R}{K_R} - L * \tan^{-1} \left( \frac{M_L}{K_L} \right) + W \quad (2-18)$$

$$\theta_L = \frac{M_L}{K_L} - \tan^{-1} \left( \frac{F_R}{L * K_R} \right) + \theta \quad (2-19)$$

$$\theta_C = \frac{M_C}{K_C} \quad (2-20)$$

#### 2.8.1.5 Determinación de las cargas permisibles para la abertura de la envolvente.

- Construcción de nomogramas.

Determinar las cantidades no dimensionales  $\left( \frac{X_A}{(R*t)^{0.5}} \right)$ ,  $\left( \frac{X_B}{(R*t)^{0.5}} \right)$ ,  $\left( \frac{X_C}{(R*t)^{0.5}} \right)$  para la configuración de la abertura bajo consideración.

#### 2.8.1.6 Determinación de las cargas permisibles.

Uses los valores  $F_R$ ,  $M_L$ ,  $M_C$  obtenido desde los análisis de tuberías para determinar las cantidades  $\left( \frac{\lambda}{2*Y_F} \right) \left( \frac{F_R}{F_P} \right)$ ,  $\left( \frac{\lambda}{a*Y_L} \right) \left( \frac{M_L}{F_P} \right)$ ,  $\left( \frac{\lambda}{a*Y_C} \right) \left( \frac{M_C}{F_P} \right)$ .

Trazar el punto  $\left( \frac{\lambda}{2*Y_F} \right) \left( \frac{F_R}{F_P} \right)$ ,  $\left( \frac{\lambda}{a*Y_L} \right) \left( \frac{M_L}{F_P} \right)$  en el nomograma construido como es mostrado en la figura P.5a.



Trazar el punto  $\left(\frac{\lambda}{2 \cdot Y_F}\right) \left(\frac{F_R}{F_P}\right), \left(\frac{\lambda}{a \cdot Y_C}\right) \left(\frac{M_C}{F_P}\right)$  en el nomograma construido como es mostrado en la figura P.5b.

Las cargas externas de la tubería  $F_R$ ,  $M_L$  y  $M_C$  de ser impuesta en la abertura de la envolvente son aceptables si ambos puntos determinados desde P.2.7.2.2 y P.2.7.2.3 se extiende dentro de los límites del nomograma construido en la particular configuración de abertura-tanque.

En la figura P.2a se establece el coeficiente de rigidez para la carga radial, calculándose de la siguiente manera:

$$\frac{K_R}{E * (2 * a)} \tag{2-21}$$

En la figura P.2b se establece el coeficiente de rigidez para el momento longitudinal, calculándose de la siguiente manera:

$$\frac{K_L}{E * (2 * a)^3} \tag{2-22}$$

En la figura P.2c se establece el coeficiente de rigidez para el momento longitudinal, calculándose de la siguiente manera:

$$\frac{K_C}{E * (2 * a)^3} \tag{2-23}$$

En la figura P.4a se obtienen los coeficientes  $Y_F$  y  $Y_L$ .

En la figura P.4a se obtienen el coeficiente  $Y_C$ .

### 2.9 Pernos de anclaje.

El espacio de centro a centro medido en los pernos a lo largo de la circunferencia del tanque en el diámetro exterior de la envolvente, no excederá 3 m.



### 2.9.1 Cálculo de las cargas de los pernos.

a) Cálculo de los pesos ( $W_1$ ,  $W_2$  y  $W_3$ )

$$W_1 = (\text{Peso de la envolvente corroída} + \text{Peso de los accesorios} + \text{Peso del techo corroído} + \text{insulación}) * \%$$

$$W_2 = (\text{Peso de la envolvente corroída} + \text{Peso de la insulación}) + \text{Peso de los accesorios} + (\text{Peso del techo} + \text{Peso de las estructura} + \text{insulación}) * \%$$

$$W_3 = \text{Peso nominal de la envolvente} + \text{Peso de los accesorios} + (\text{Peso nominal del techo} + \text{Peso de la insulación}) * \%$$

b) Cálculo de la carga de levantamiento (U) de acuerdo a la presión de diseño, presión de prueba, presión de viento y presión de diseño + viento.

$$\text{Presión de Diseño} = (\pi * D^2 * 785) - W_1 \tag{2-24}$$

$$\text{Presión de Prueba} = (p_t * D^2 * 785) - W_3 \tag{2-25}$$

$$\text{Presión de Viento} = P_{WR} * D^2 * 785 * \left[ 4 * \frac{M_{WS}}{D} \right] - W_2 \tag{2-26}$$

$$\text{Presión de Diseño} + \text{Viento} = [F_p * (\pi + P_{WR}) * D^2 * 785] + \left[ 4 * \frac{M_{WS}}{D} \right] - W_1 \tag{2-27}$$

La carga de los pernos será:



$$t_b = \frac{U}{N} \tag{2-28}$$

**2.9.2 Cálculo de la silla de anclaje.**

**2.9.2.1 Cálculo del espesor requerido de la placa de la tapa superior de la silla.**

$$T_c = \frac{P}{((S_b * e) * (0.375 * g - 0.22 * d))^{0.5}} + c \tag{2-29}$$

**2.9.2.2 Tensión en la placa superior en un espesor dado.**

$$S_{tpl} = \frac{P * (0.375 * b - 0.22 * d)}{\frac{e}{(c - C_a)^2}} \tag{2-30}$$

**2.9.2.3 Espesor de la placa de refuerzo intermedia requerido.**

El espesor de la placa de refuerzo intermedia es el mayor de (0.5", 0.04(hg)) + C<sub>a</sub>.

Para placas de refuerzo, lo siguiente también debe ser cierto

[English Units]:

$$\text{Espesor de la silla} * \text{Ancho de la silla promedio} \geq (P/1000) / 25$$

**2.9.2.4 Tensión local en la placa superior, incluyendo tensión axial.**



$$S = P * \frac{e}{t^2} * \left[ \frac{1.32 * Z}{\frac{1.43 * a * h^2}{R * t}} \right] + (4 * a * h^2)^{0.333} + \frac{0.031}{(R * t)^{0.5}}$$

(2-31)

**2.9.2.5 Valor intermedio (Z).**

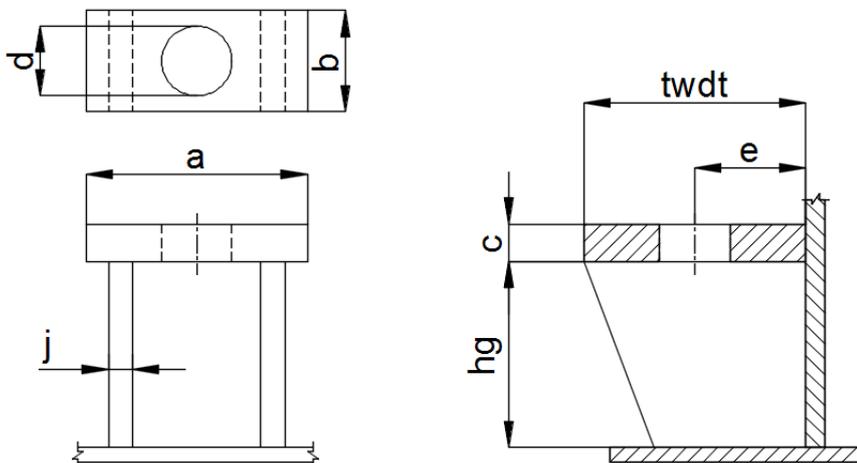
$$Z = \frac{1}{\frac{0.177 * a * m}{(R * t)^{0.5}}} * \left( \frac{m}{t} \right)^2 + 1$$

(2-32)

**2.9.2.6 Distancia radial.**

$$e = \frac{D_c - D_s}{2}$$

(2-33)



**Figura 2.2-** Silla de anclaje.

**2.10 Diseño del fondo del tanque.**

**2.10.1 Nomenclatura.**

Ar: Área del fondo del tanque, en m<sup>2</sup>;



$A_p$ : Área de las placas del fondo,  $m^2$ ;  
 $b$ : Ancho de las placas del fondo,  $m$ ;  
 $C_A$ : Espesor de corrosión permisible de anillo [mm];  
 $C_{Af}$  Espesor de corrosión permisible de la placa del fondo [mm];  
 $D$ : Diámetro del tanque [m];  
 $CA$ : Corrosión permisible [mm];  
 $G$ : Gravedad específica de diseño del líquido;  
 $h$ : Longitud de las placas del fondo,  $m$ ;  
 $H$ : Altura del nivel de líquido dentro del tanque [m];  
 $P_e$ : Presión de diseño externa [kPa];  
 $S_d$ : Tensión de diseño del producto [MPa];  
 $S_t$ : Tensión de prueba hidrostática [MPa];  
 $t_{adoptado}$ : Espesor adoptado en la placa de fondo [mm];  
 $t_{mín}$ : Espesor mínimo de la placa del fondo [mm];  
 $L$ : Ancho radial de la placa anular [mm];  
 $P_f$ : Presión del peso de la placa del fondo por unidad de área [kPa];  
 $P_p$ : Presión del mínimo producto por unidad de área [kPa];  
 $P_{tot}$ : Presión total en el fondo por unidad de área [kPa];  
 $\sigma_d$ : Tensión de diseño [MPa];  
 $\sigma_t$ : Tensión de prueba [MPa];  
 $A_f$ : Área del fondo del tanque [mm];  
 $A_p$ : Área de la placa del fondo del tanque [mm];  
 $b$ : Longitud de la placa del fondo [mm];  
 $h$ : Ancho de la placa del fondo [mm];  
 $N_{OPL}$ : Número de placas del fondo;  
 $t_b$ : Espesor de la placa del fondo [mm];  
 $F_y$ : Esfuerzo mínimo de fluencia de la placa del fondo [MPa];

### 2.10.2 Placas del fondo.

Las placas de fondo del tanque son fabricadas normalmente de acero estructural con un espesor menor al utilizado para la envolvente. Esto es posible debido a



que el fondo se encuentra soportado por una base de hormigón que soporta el peso de la columna de líquido. La función principal del fondo es de lograr la hermeticidad que impide la fuga del producto hacia el substrato de la base del tanque.

Los requisitos de los que depende el diseño del fondo son los siguientes:

- La cimentación sobre la que apoya el tanque.
- Las características del producto almacenar.
- La corrosión en el fondo y los métodos de protección catódica a emplear.
- El tamaño del tanque.

### **2.10.3 Espesor de la placa del fondo del tanque.**

Todas las placas de fondo tendrán un espesor corroído no menor de 6 mm. A menos que se especifique lo contrario por parte del cliente, todas las placas rectangulares sobre la que descansa la envolvente, tendrán un ancho nominal no menor de 1800 mm.

### **2.10.4 Espesor adoptado por diseño.**

El espesor adoptado incluye el sobre espesor de corrosión definido para la placa del fondo y el espesor mínimo, siendo de la siguiente manera.

$$t_{\text{adoptado}} = t_{\text{mín}} + CA \quad (2-34)$$

### **2.10.5 Aplicación del anexo V.**

La base del tanque será evaluada para una presión externa si es aplicable alguna de las siguientes condiciones.

Estas condiciones no necesitan ser consideradas de forma simultánea, a menos que se especifique por parte del cliente:

- 1) Si la presión externa de diseño total sobre el fondo excede de la suma de los pesos de la placa de fondo más el peso de cualquier producto



almacenado requerido por el cliente cuando la presión externa actúa, los esfuerzos de membrana en el fondo serán evaluados.

- 2) Si el área alrededor del tanque está sujeto a inundación debido al líquido, las disposiciones serán incluidas en el diseño del tanque y sus procedimientos operativos para garantizar que el tanque contiene líquido suficiente para contrarrestar la elevación inferior resultante de las condiciones de inundación externa. Si el tanque no puede ser rellenado con suficiente profundidad del líquido para contrarrestar el levantamiento debido a la presión inferior del tanque, las tensiones de membrana en el fondo deberán ser evaluadas.

En ambos casos definidos anteriormente, el fondo podrá ser evaluado como una membrana sujeta a cargas uniformes y restringidas por el anillo de compresión característico de la unión envolvente-fondo.

La condición que hay que cumplir para evitar el levantamiento del fondo del tanque es (Arce, 2015):

$$P_{\text{tot}} = P_f + P_p \geq |P_e| \tag{2-35}$$

$$P_f = \rho_{\text{acero}} * t_f * g \tag{2-36}$$

$$P_p = \rho_{\text{producto}} * H_{\text{cl}} * g \tag{2-37}$$



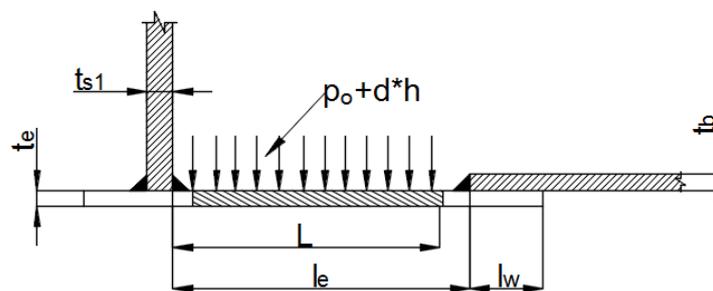
### 2.10.5.1 Placa anular de fondo.

Cuando el anillo del fondo esté diseñado usando el criterio de límite elástico para materiales pertenecientes al grupo IV, IVA, V o VI descritos en la norma, se dispondrá de una placa anular soldada a tope. Cuando el material del anillo de fondo pertenece al grupo IV, IVA, V o VI y la tensión del producto máximo para el primer anillo es menor o igual de 160 MPa o la tensión máxima de prueba hidrostática para dicho anillo es menor o igual a 171 MPa, se puede utilizar una placa de fondo solapada en lugar de una placa anular soldada a tope (Burckhardt, 2011).

### 2.10.5.2 Ancho de la placa anular.

La placa anular del fondo tendrá un ancho radial (L) como es mostrado en la figura 2-1, que proporcione un mínimo de 600 mm entre la parte interna de la envolvente y cualquier junta de solape del resto del fondo. La proyección de dicha placa anular hacia el exterior de la envolvente del tanque tendrá una longitud mínima de 50 mm según los requisitos definidos anteriormente. El ancho radial del anillo anular se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$L = 2 * t_b \sqrt{\frac{F_y}{2 * \gamma * G * H}} \geq 600 \text{ mm.} \tag{2-38}$$



**Figura 2-1.** Ancho radial (L) de la placa anular del fondo.



### 2.10.5.3 Espesor de la placa anular.

El espesor de la placa anular no será menor que el espesor mayor determinado en la tabla 2-1 para una tensión de diseño del producto (más cualquier sobre espesor de corrosión indicado) o para una tensión de diseño de prueba hidrostática. Dichas tablas son aplicables para alturas efectivas del producto  $H * G \leq 23$  m y depende del espesor del anillo más baja de la envolvente. Más allá de esta altura se requiere un análisis elástico para determinar el espesor de la placa anular.

Espesor de placa <sup>a</sup> del primer anillo, mm	Tensión <sup>b</sup> en el primer anillo, MPa			
	≤ 190	≤ 210	≤ 220	≤ 250
$t \leq 19$	6	6	7	9
$19 \leq t \leq 25$	6	7	10	11
$25 \leq t \leq 32$	6	9	12	14
$32 \leq t \leq 40$	8	11	14	17
$40 \leq t \leq 45$	9	13	16	19

**Tabla 2-1.** Espesor del anillo anular en función del espesor y esfuerzo del primer anillo.

<sup>a</sup> El espesor de la placa se refiere al espesor de la placa de la envolvente corroída para el diseño del producto y el espesor nominal para la prueba hidrostática diseño.

<sup>b</sup> La tensión a utilizar es la tensión máxima en el primer anillo de la envolvente (mayor que la tensión del producto o tensión de prueba hidrostática). La tensión se puede determinar utilizando el espesor requerido dividido por el espesor de "a" y luego multiplicado por la correspondiente tensión permitida:



$$\sigma_d = \frac{4.9 * D * (H - 0.3) * G}{t_{dn} \left(1 - \frac{CA}{t_d}\right)} \quad (2-39)$$

$$\sigma_t = \frac{4.9 * D * (H - 0.3)}{t_{dn}} \quad (2-40)$$

Los espesores indicados en la tabla, así como el ancho especificado anteriormente, se basan en la cimentación proporcionando un soporte uniforme bajo el ancho de la placa anular. A menos que la cimentación esté débilmente compactada, particularmente en el interior del anillo de hormigón, el asentamiento producirá tensiones adicionales en la placa anular.

#### 2.10.5.4 Criterio del espesor de la placa anular por la norma EN-14015/04.

Los fondos de los tanques mayores de 12.5 m de diámetros, tendrán un anillo de placa anular, teniendo un espesor mínimo nominal ( $e_a$ ), excluido de la corrosión permisible.

$$e_a = 3.0 + \frac{e_1}{3} \quad (2-41)$$

En el diseño y construcción del fondo es conveniente utilizar las placas con unos rangos comerciales de dimensiones en ancho 1800 ó 2400 mm y longitudes de 6000 ó 9000 mm, resultando ser las más económico por el ahorro en el tiempo durante el montaje y en las uniones soldadas. Una distribución simétrica de las placas del fondo desde eje central del tanque como es mostrado en la figura, el número de placas a emplear será mucho menor que usando una distribución asimétrica (EN N., 2004).

#### 2.10.6 Cálculo del número de placas aproximada a utilizar en el montaje del fondo (Jiménez, 2012).



**2.10.6.1 Área del fondo del tanque.**

$$A_f = \frac{\pi * D^2}{4}$$

(2-42)

**2.10.6.2 Área de las placas que conforman el fondo.**

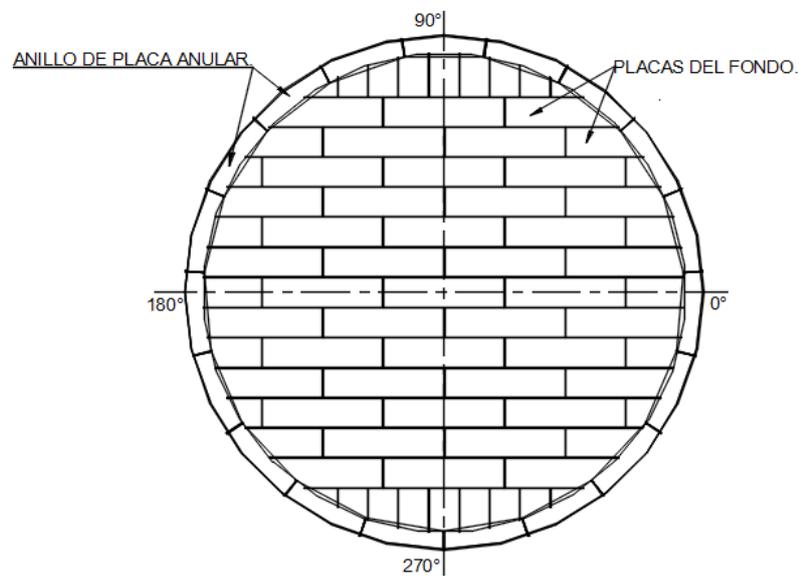
$$A_p = b * h$$

(2-43)

**2.10.6.3 Número de placas del fondo.**

$$NO_{PL} = \frac{A_{fondo}}{A_{PL}}$$

(2-44)



**Figura 2-2.** Distribución simétrica de las placas en el fondo



## 2.11 Diseño del techo del tanque.

En este capítulo se desarrollan los pasos a seguir para el diseño del techo tipo domo auto-soportado con estructura rigidizadora.

### 2.11.1 Nomenclatura.

A: Área del perfil IPE adoptado [ $\text{mm}^2$ ];

$A_{arr}$ : Área necesaria del perfil de arriostamiento de techo [ $\text{mm}^2$ ];

$C_{Acasq}$ : Área del casquete esférico del techo [ $\text{m}^2$ ];

$A_{ef}$ : Área efectiva del perfil IPE adoptado [cm];

$A_{eff,an}$ : Área efectiva del anillo circunferencial de compresión;

$A_h$ : Área en proyección horizontal del techo [ $\text{m}^2$ ];

$A_{nec}$ : Área efectiva necesaria en el anillo de compresión [ $\text{mm}^2$ ];

$A_{p,1}$ : Área de participación del techo [ $\text{mm}^2$ ];

$A_{p,2}$ : Área de participación del último anillo [ $\text{mm}^2$ ];

$A_{p,3}$ : Área del perfil adoptado en el anillo de compresión [ $\text{mm}^2$ ];

b: Ancho del perfil IPE adoptado [cm];

$b_k$ : Ancho del perfil del soporte central [cm];

CA: Espesor de corrosión permisible de anillo [mm];

CAr: Espesor de corrosión permisible de la placa de techo [mm];

$C_{my}$ : Coeficiente de momento equivalente;

D: Diámetro del taque [m];

$D_L$ : Peso efectivo del tanque [kg];

E: Módulo de Young del acero [MPa];

$e_o$ : Excentricidad del soporte central [m];

$e_{o,arr}$ : Excentricidad del sistema de arriostamiento de techo [m];

$F_{ur}$ : Resistencia mínima de agotamiento a tracción del acero de techo [MPa];

$F_y$ : Límite elástico del acero de la envolvente [MPa];

$F_{yd}$ : Valor del límite elástico del acero, incluyendo el coeficiente de minoración [MPa];

$F_{yr}$ : Límite elástico del acero de techo [MPa];

g: Aceleración de la gravedad [ $\text{m/s}^2$ ];

$g_H$ : Presión del peso muerto de la placa de techo [ $\text{kN/m}^2$ ];



- $g_R$ : Presión del peso muerto de la estructura de techo [kN/m<sup>2</sup>];
- $G_{vigas}$ : Peso por unidad de longitud del perfil del rigidizador de techo [kg/m];
- $h_k$ : Altura del soporte central medido entre ejes de las alas [cm];
- $h_{rig}$ : Altura total del rigidizador de techo [cm];
- $H_{roof}$ : Altura del techo esférico [m];
- $i_k$ : Radio de giro del perfil de arriostramiento de techo [mm];
- $I_{y,min,rig}$ : Inercia mínima requerida, según [2] [cm<sup>4</sup>];
- $I_{y,rig}$ : Momento de inercia del rigidizador de techo [cm<sup>4</sup>];
- $j$ : Coeficiente de eficiencia;
- $K_m$ : Coeficiente reductor del número de elementos estabilizados en techo;
- $K_{yy}$ : Coeficiente de interacción en el eje y;
- $K_{zy}$ : Coeficiente de interacción en el eje z;
- $L_{arr}$ : Longitud del arriostramiento de techo [mm];
- $L_{e,e}$ : Longitud del elemento estabilizado por el sistema de arriostramiento [m];
- $L_R$ : Carga viva mínima de techo en proyección horizontal [kPa];
- $L_{vigas}$ : Longitud del rigidizador de techo en verdadera magnitud [m];
- $L_y$ : Longitud de pandeo alrededor del eje y [m];
- $L_z$ : Longitud de pandeo alrededor del eje z [m];
- $M_{F,Ed}$ : Momento de flexión en la mitad de los rigidizadores [mN];
- $M_{Ed}$ : Momento de diseño máximo en el extremo del rigidizador [mkN];
- $M_{max}$ : Momento máximo flector en el rigidizador de techo, según [2] [mkN];
- $M_s$ : Momento de diseño mínimo en el rigidizador [mkN];
- $M_{r,Ed}$ : Valor de diseño del momento flector en el extremo inferior del rigidizador [mkN];
- $M_{s,Ed}$ : Momento de flexión en la conexión anillo circunferencial-rigidizador [mN];
- $M_{y,rk}$ : Momento de cálculo de la sección del perfil IPE adoptado [mkN];
- $N_{2,Ed}$ : Valor de diseño de la fuerza en el cordón inferior del soporte central [kN];
- $N_{anillos}$ : Número de anillos de arriostramiento entre rigidizadores;
- $N_{Ed}$ : Carga total axil en el rigidizador de techo, según [2] [kN];
- $N_{Ed,arr}$ : Esfuerzo de compresión al que está sometido el arriostramiento de techo [N];
- $N_{Ed,c}$ : Fuerza anular [kN];



- $N_{Ed,sop}$ : Valor de diseño total del axial en el rigidizador de techo [kN];
- $N_{rig,max}$ : Número máximo de rigidizadores de techo;
- $N_{rk}$ : Resistencia de cálculo a pandeo por flexión del perfil IPE adoptado [kN];
- $n_{vigas}$ : Número de rigidizadores de la estructura de techo;
- $n_{vir}$ : Número de anillos que componen el envolvente del tanque;
- $p$ : Presión según la combinación más desfavorable [kN/m<sup>2</sup>];
- $p_1, p_2$ : Presiones según combinaciones de carga de [1] [kN/m<sup>2</sup>];
- $P_B$ : Presión de pandeo de la lámina de techo [kPa];
- $P_e$ : Presión de diseño externa en vacío [kPa];
- $P_{Ed}$ : Carga concentrada sobre el rigidizador de techo, según [2] [kN];
- $p_{i,ed}$ : Presión normal de techo distribuida uniformemente hacia el interior [kPa];
- $p_{o,Ed}$ : Presión normal de techo distribuida uniformemente hacia el exterior [kPa];
- $p_{tot}$ : Presión total del techo en proyección vertical [kPa];
- $p_{v,Ed}$ : Presión total de la techo [kN/m<sup>2</sup>];
- $q$ : Fuerza equivalente por efecto de imperfecciones por unidad de longitud [N/m];
- $Q_c$ : Peso total de la estructura de techo [kN];
- $R_c$ : Radio de curvatura del techo esférico;

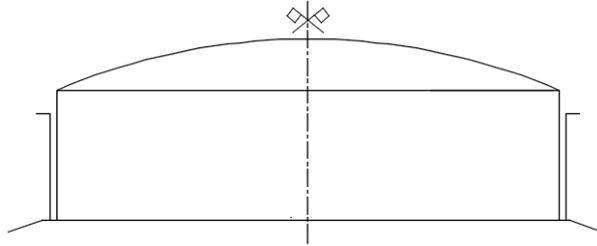
Para el diseño del techo se debe tener en cuenta los tipos de techos especificados de la siguiente manera:

- a) Techos auto-soportados cónicos o de tipo domo con o sin estructura del techo.
- b) Techos soportados por columnas.

### 2.11.2 Diseño Simplificado del techo de acuerdo EN-1993-4-2.

- 1) El análisis simplificado de esta sección puede aplicarse cuando todas las siguientes condiciones son satisfechas:
  - la estructura del tanque es de la forma que se muestra en la figura;





**Figura 2-3.** Estructura del tanque.

- las únicas acciones internas son la presión del líquido y la presión del gas sobre la superficie del líquido;
- nivel máximo de líquido de diseño no superior a la parte superior de la envolvente cilíndrica;
- las siguientes cargas pueden ser descuidadas: cargas inducidas térmicamente, cargas sísmicas, cargas resultantes de asentamientos desiguales o conexiones y cargas de emergencia;
- ningún anillo se construye con un espesor menor que el del anillo por encima de él, excepto la zona adyacente al anillo del alero;
- El valor de diseño del esfuerzo circunferencial en la carcasa del tanque es inferior a 435 MPa;
- para un techo esférico, el radio de curvatura es entre 0,8 y 1,5 veces el diámetro del tanque;
- el gradiente de diseño del fondo del tanque no es mayor que 1:100;
- la presión interna característica no es inferior a -8,5 mbar ni superior a 60 mbar;
- el número de ciclos de carga es tal que no hay riesgo de falla por fatiga.

2) La tensión de diseño debe tomarse como:

$$F_{yd} = \frac{F_y}{\gamma * M_0}$$

(2-45)



De acuerdo a la norma EN 14015-2004 define dos procedimientos para diseñar el techo del tanque:

- 1) Las placas del techo con estructura soportada.
- 2) Las placas del techo sin estructura soportada (Techos membrana).

Para el procedimiento se tomará el procedimiento (1)

El diseño y cálculo de la estructura tiene en cuenta los esfuerzos de flexión y corte, producidos por una carga uniformemente repartida ocasionada por el peso de las placas de techo, estructura rigidizadores y anillos circunferenciales, debido a lo cual las placas de techo se consideran vigas articuladas.

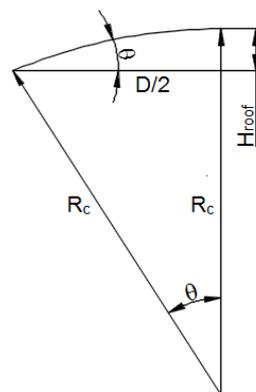
### 2.11.3 Geometría del Techo del Tanque.

Se tomará como radio de curvatura del techo esférico un valor de 1.2 veces el diámetro del tanque.

$$R_c = 1.2 * D$$

(2-46)

El ángulo que forma dicho techo esférico con la horizontal y la altura de la misma se calcula según las siguientes expresiones:



**Figura 2-4.** Geometría del techo esférico.



$$\theta = \arcsen\left(\frac{R}{R_c}\right) \tag{2-47}$$

$$H_{\text{roof}} = R_c * (1 - \cos(\theta)) \tag{2-48}$$

#### 2.11.4 Tensión Admisible.

La tensión básica de diseño, ( $S_{dr}$ ), será la menor entre 2/3 de la tensión del límite elástico ( $F_{yr}$ ) o 2/5 de la resistencia a tracción ( $F_{ur}$ ).

La tensión básica de prueba hidrostática, ( $S_{tr}$ ), será la menor entre 3/4 la tensión del límite elástico ( $F_{yr}$ ) o 3/7 de la resistencia a tracción ( $F_{ur}$ ).

$$S_{dr} = \text{mín}\left(\frac{2}{3} * F_{yr}, \frac{2}{5} * F_{ur}\right) \tag{2-49}$$

$$S_{tr} = \text{mín}\left(\frac{3}{4} * F_{yr}, \frac{3}{7} * F_{ur}\right) \tag{2-50}$$

#### 2.11.5 Estructura del techo.

La placa de techo tendrá una geometría igual al casquete esférico de una esfera. Por ello se calcula el área de dicho casquete, el cual se empleará para calcular la presión ejercida por el peso muerto de la placa (Pasos, 2014).

$$A_{\text{casq}} = 2 * \pi * R_c * H_{\text{roof}} \tag{2-51}$$

La proyección horizontal de la placa de techo es:

$$A_h = \frac{\pi * D^2}{4} \tag{2-52}$$



Las placas del techo se dispondrán sobre una serie de vigas con forma de arco adaptada a la curvatura de la placa, que sirven de estructura rigidizadora del techo y se encargan de transmitir los esfuerzos a la envolvente del tanque.

La longitud de estas vigas en verdadera magnitud será:

$$L_{\text{vigas}} = \frac{2 * \pi * (\theta - \theta_2) * R_c}{360} \quad (2-53)$$

#### 2.11.6 Optimización del perfil del techo y el número de vigas.

Las condiciones impuestas para la elección del perfil son las siguientes:

- El momento de inercia del perfil IPE debe ser mayor o igual al momento de inercia mínimo requerido según el EN 1993 Part 4-2.

$$I_{y,\text{mín},\text{rig}} \leq I_{y,\text{rig}} \quad (2-54)$$

- La tensión máxima a la que está sometida la viga debe ser inferior a la tensión admisible del límite elástico mínimo, según el criterio de límite elástico.

$$\sigma_{\text{máx}} \leq \sigma_{\text{adm}} \quad (2-55)$$

- El número de vigas de techo debe ser menor o igual al número máximo de rigidizadores. Para calcular el número máximo de rigidizadores de techo se ha impuesto como criterio constructivo que el soporte central sobre el que se disponen las vigas, tendrá un diámetro de 0.1 veces el diámetro del tanque, con una separación entre rigidizadores en el apoyo de al menos el ancho del perfil elegido.

$$N_{\text{rig,máx}} = \frac{\pi * (0.1 * D)}{2 * \frac{b}{100}} \quad (2-56)$$

$$n_{\text{vigas}} \leq N_{\text{rig,máx}} \quad (2-57)$$

- Se limita la separación entre rigidizadores en el punto de conexión con la pared del tanque a 3.25 m para reducir la esbeltez mecánica de los elementos secundarios de arriostramiento y evitar tener en cuenta los momentos de flexión en el anillo de borde alrededor de su eje vertical definido

$$\text{Separación} = \frac{2 * \pi * \left(\frac{D}{2}\right)}{n_{\text{vigas}}} \leq 3.25 \quad (2-58)$$

- El perfil del rigidizador tiene que cumplir el criterio de pandeo para piezas sometidas a flexocompresión. Se estudia el pandeo de la pieza en ambos ejes para cargas uniformes aplicadas sobre el eje fuerte del perfil. Se omite el posible pandeo lateral mediante la colocación de anillos de arriostramiento entre rigidizadores exigidos por la norma, así como por la placa del techo.

$$\frac{N_{Ed}}{X_y * \frac{A * F_y}{\gamma_{M1}}} + k_{yy} * \frac{M_{Ed}}{\frac{W_y * F_y}{\gamma_{M1}}} \leq 1 \quad (2-59)$$

$$\frac{N_{Ed}}{X_z * \frac{A * F_y}{\gamma_{M1}}} + k_{zy} * \frac{M_{Ed}}{\frac{W_y * F_y}{\gamma_{M1}}} \leq 1 \quad (2-60)$$

### 2.11.7 Carga de diseño y cargas muertas.

A continuación, se definen las expresiones para calcular las presiones ejercidas por los elementos del techo.

Para el cálculo del peso total de la estructura rigidizadora del techo hay que tener en cuenta el número de vigas que se dispondrán, el peso lineal de las mismas y la longitud calculada en el apartado anterior en verdadera magnitud.

$$Q_c = n_{vigas} * G_{vigas} * L_{vigas} * g \tag{2-61}$$

Como se trata de un peso, la presión que ejerce el mismo tendrá una dirección vertical. Esta presión se halla dividiendo el peso total de la estructura rigidizadora entre el área en proyección horizontal del techo.

$$gR = \frac{Q_c}{\frac{\pi * D^2}{4}} \tag{2-62}$$

Para calcular la presión que ejerce la placa de techo se multiplica la densidad del acero por el espesor adoptado para la placa y por la relación entre el área del casquete esférico y el área en proyección horizontal del techo.

$$gH = \rho_{acero} * t_{r,adoptado} * \frac{A_{casq}}{A_h} * g \tag{2-63}$$

### 2.11.8 Combinaciones de cargas según API-650 y carga total.

La carga viva mínima del techo en proyección horizontal tendrá un valor de 1 kPa, según la nomenclatura de la norma en su anexo V.3.

$$L_r = 1 \text{ kPa}$$



Según epígrafe 5.2.2 de la norma API 65013, las combinaciones de carga para el diseño del techo para el caso de cargas gravitatorias son:

$$\begin{aligned} p_1 &= gH + \text{máx}(L_r, \text{snow}) + 0.4 * (P_e) \\ p_2 &= gH + (P_e) + 0.4 * \text{máx}(L_r, \text{snow}) \\ p &= \text{máx}(p_1, p_2) \end{aligned} \tag{2-64}$$

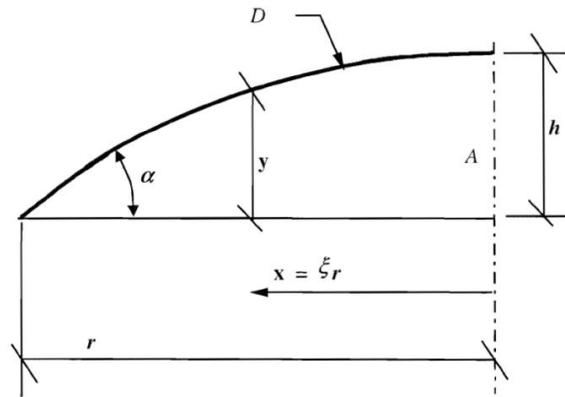
La presión total ejercida por el techo es la suma de la presión debida a la combinación de carga de la placa de techo, la presión de diseño externa en vacío y la carga de nieve, más la presión ejercida por la estructura rigidizadora de techo.

$$p_{\text{tot}} = P + gR \tag{2-65}$$

### 2.11.9 Cálculo de la estructura del techo según en EN 1993-4-2.

Los requisitos impuestos por la norma son:

- La estructura del techo debe ser reforzada o conectada estructuralmente a la placa de techo.
- La placa de techo será diseñada empleando la teoría de grandes desplazamientos. En este caso se utilizará el espesor mínimo requerido.
- La estructura soporte del techo será diseñada satisfaciendo los requisitos de la norma EN 1993 Part 1-1.
- Siempre que el diámetro del tanque sea inferior a 60 m y las cargas distribuidas no se desvíen fuertemente de la simetría con respecto al eje del tanque, el procedimiento utilizado para techos esféricas es el descrito a continuación.



**Figura 2-5.** Coordenadas del techo domo esférico.

El procedimiento de diseño descrito para techos esféricos es:

- 1) Para techos esféricos bajo la acción de cargas distribuidas derivadas de carga impuesta, carga de nieve, carga de viento, carga permanente o presión, se tomará  $(P_{v,Ed})$  como el valor de la componente vertical máxima de la carga de diseño distribuida incluyendo el peso muerto de la estructura rigidizadora:

$$P_{v,Ed} = p_{tot}$$

La fuerza vertical total de diseño sobre cada viga se calcula como:

$$P_{Ed} = \beta * \left(\frac{D}{2}\right)^2 * P_{v,Ed} \tag{2-66}$$

$$\beta = \frac{\pi}{n_{vigas}} \tag{2-67}$$

- 2) La fuerza normal y el momento de flexión en cada viga para el diseño según EN 1993 Part 1-1 se obtiene según las siguientes expresiones:



$$N_{Ed} = 0.375 * \frac{D}{2 * H_{roof}} * P_{Ed} \quad (2-68)$$

El momento máximo sobre la viga se obtiene iterando para cada valor de la coordenada X desde 0 hasta el radio del tanque:

$$M_{m\acute{a}x} = \frac{1}{3} * \left\{ 1 - \left( \frac{x}{\frac{D}{2}} \right)^3 - 1.10 * \left( \frac{\sqrt{R_c^2 - x^2} - (R_c - H_{roof})}{H_{roof}} \right) \right\} * \frac{D}{2} * P_{Ed} \quad (2-69)$$

El momento de inercia mínimo requerido por el perfil depende del axil al que está sometida la viga, el radio del tanque y el módulo de elasticidad del acero. Si ( $I_y$ ) varía a lo largo de la longitud de la viga debido al ancho efectivo variable de la placa de techo cuando está conectada a la viga, se emplea dicho valor de ( $I_y$ ) a una distancia de 0.5 veces el radio del tanque medido desde el eje de simetría del mismo:

$$I_{y,m\acute{i}n,rig} = \frac{N_{Ed} * \left( \frac{D}{2} \right)^2}{\pi^2 * E} \quad (2-70)$$

El momento de flexión de diseño se calcula amplificando el momento máximo mediante el factor épsilon, que representa los efectos de 2º orden y que depende del valor ( $I_y$ ) calculado anteriormente:

$$M_{Ed} = \frac{M_{m\acute{a}x}}{1 - \epsilon} \quad (2-71)$$

$$\epsilon = N_{Ed} * \frac{\left( 0.6 * \left( \frac{D}{2} \right)^2 \right)}{\pi^2 * E * I_{y,rig}} \quad (2-72)$$



La tensión máxima es debido al acoplamiento entre el esfuerzo axial y el momento flector al que se somete la viga (EN N., 2007):

$$\sigma_{\text{máx}} = \frac{N_{\text{Ed}}}{A_{\text{ef}}} + \frac{M_{\text{Ed}}}{W_{\text{elast},y}} \quad (2-73)$$

### 2.11.10 Criterio de pandeo para piezas sometidas a flexocompresión según EN 1993-1-1

Para realizar la comprobación de pandeo hay que tener en cuenta el posible pandeo en ambos ejes. En el eje fuerte se considera la longitud de pandeo igual a la longitud total del rigidizador. La comprobación para este eje se realiza sin considerar el pandeo impedido debido a la placa del techo:

$$L_y = \frac{D}{2} - 0.1 * \frac{D}{2} \quad (2-74)$$

Para el caso de pandeo sobre el eje débil, la longitud de pandeo está definida por la distancia entre anillos rigidizadores:

$$L_z = \frac{L_y}{N_{\text{anillos}} + 1} \quad (2-75)$$

Las ecuaciones empleadas para el cálculo de los coeficientes de pandeo en ambos ejes para un coeficiente  $\beta$  igual a 1 (empotrado con desplazamiento) son las siguientes:

$$\lambda_k = \frac{\beta * L_k}{i_k} \quad (2-76)$$

$$\lambda_{\text{red},k} = \frac{\lambda_k}{\lambda_{\text{ref}}}$$



(2-77)

$$\lambda_{\text{ref}} = \pi * \sqrt{\frac{E}{F_y}}$$

(2-78)

$$\phi_k = 0.5 * (1 + 0.21 * (\lambda_{\text{red},k} - 0.2) + \lambda_{\text{red},k}^2)$$

(2-79)

$$\chi_k = \frac{1}{\phi_k + \sqrt{\phi_k^2 - \lambda_{\text{red},k}^2}}$$

(2-80)

Para calcular los coeficientes de interacción hay que tener en cuenta la clase de sección del perfil adoptado. Una vez clasificada la sección se aplican las siguientes ecuaciones para obtener dichos coeficientes:

$$\alpha_s = \frac{-M_s}{M_{Ed}}$$

(2-81)

Para un valor de  $\alpha_s$  entre -1 y 0 según la distribución de momentos en el rigidizador, y un valor del coeficiente  $\psi$  igual a 0, el coeficiente de momento equivalente será  $C_{my}$ .

$$C_{my} = 0.1 - 0.8 * \alpha_s \geq 0.4$$

(2-82)

La resistencia de cálculo a pandeo por flexión en el plano de pandeo considerado y el momento de cálculo dependen del área y el módulo resistente de la sección, en función de la clase de sección del perfil.

$$N_{rk} = A * F_y$$

(2-83)

$$M_{y,rk} = W * F_y$$

(2-84)



Clase.	1	2	3	4
A	A	A	A	A <sub>ef</sub>
W	W <sub>plast,y</sub>	W <sub>plast,y</sub>	W <sub>elast,y</sub>	W <sub>elast,y</sub>

**Tabla-** Área y módulo resistente en función de la clase de sección del perfil.

Los coeficientes de interacción dependen también de la clase de sección del perfil. Para secciones de clase 1 y 2 los valores que adoptan dichos coeficientes son:

$$k_{yy} = C_{my} * \left( 1 + (\lambda_{red,y} - 0.2) * \frac{N_{Ed}}{\chi_y * \frac{N_{rk}}{\gamma_{M1}}} \right) \leq C_{my} * \left( 1 + 0.8 * \frac{N_{Ed}}{\chi_y * \frac{N_{rk}}{\gamma_{M1}}} \right) \quad (2-85)$$

Para secciones de clase 3 y 4 los valores adoptados son:

$$k_{yy} = C_{my} * \left( 1 + 0.6 * \lambda_{red,y} * \frac{N_{Ed}}{\chi_y * \frac{N_{rk}}{\gamma_{M1}}} \right) \leq C_{my} * \left( 1 + 0.6 * \frac{N_{Ed}}{\chi_y * \frac{N_{rk}}{\gamma_{M1}}} \right) \quad (2-86)$$

$$k_{zy} = 0.8 * k_{yy} \quad (2-87)$$

Las comprobaciones de pandeo a realizar son las indicadas en las ecuaciones 5-22 y 5-23.

### 2.11.11 Anillos circunferenciales de arriostramiento de vigas.

La disposición de anillos de arriostramiento en techo se rige por los siguientes requisitos:



- Para techos que exceden un diámetro de 15 m, al menos se proporcionarán dos arriostramientos entre vigas rigidizadoras de techo. El conjunto de arriostramientos deberán distanciarse igualmente alrededor de la circunferencia del tanque.
- Para techos arriostradas con diámetro entre 15 y 20 m, se dispondrá de un anillo circunferencial adicional.
- Para techos arriostradas con diámetro superior a 25 m, se dispondrán de dos anillos circunferenciales adicionales.

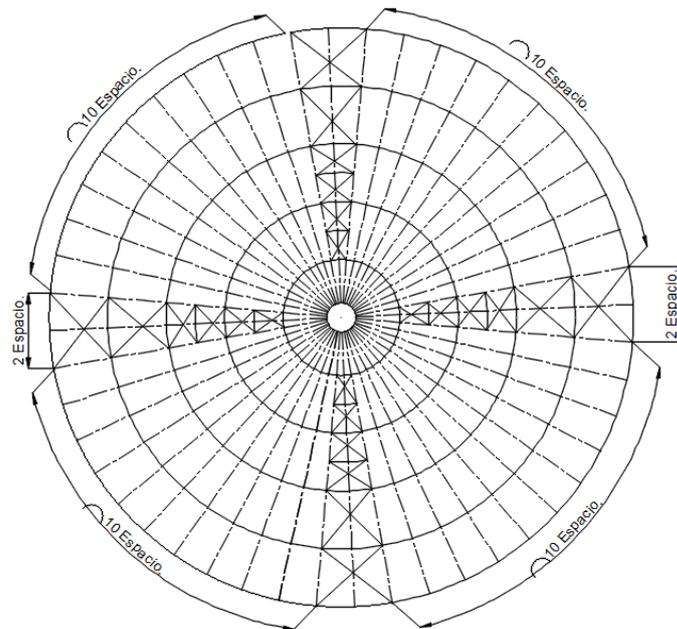
El arriostramiento se diseñará para una fuerza estabilizadora igual al 1% de la suma de fuerzas normales en las partes estabilizadas. También hay que tener en cuenta los efectos de las imperfecciones geométricas equivalentes en el análisis de los sistemas de arriostramiento utilizados para asegurar la estabilidad lateral de elementos flectados o comprimidos, así como el criterio de pandeo elástico al tratarse de un elemento que trabaja a compresión.

$$e_{o,arr} = K_m * \frac{L_{e,e}}{500} \tag{2-88}$$

$$K_m = \sqrt{0.5 * \left(1 + \frac{1}{m}\right)} \tag{2-89}$$

Se dispondrán de 4 conjuntos de cruces de San Andrés en el techo para rigidizar la estructura, según la siguiente figura:





**Figura 2-6.** Distribución de Cruces de San Andrés en el techo del tanque.

Hay que considerar que en el último anillo no se colocarán dichas cruces, debido a que no se dispone de espacio suficiente para ser soldadas a los perfiles de los rigidizadores y dificultaría el proceso constructivo.

Esto no resulta un inconveniente en la rigidización, ya que dicho anillo dispone de gran rigidez.

$$q = \sum_{i=1}^{m = \frac{n_{\text{vigas}}}{4}} N_{Ed} * 8 * \frac{e_o + \delta_q}{L_{e,e}^2} \tag{2-90}$$

Las comprobaciones a realizar son las siguientes:

$$\frac{F_1}{A_{arr}} \leq \sigma_{adm} \tag{2-91}$$

$$\frac{F_2}{A_{arr}} \leq \sigma_{adm}$$



(2-92)

$$F_2 = K_m * \frac{\sum N_{Ed}}{100}$$

(2-93)

Para dimensionar el elemento de arriostramiento mediante el criterio de pandeo se considera un coeficiente  $\beta$  igual a 1 para elementos biarticulados.

La esbeltez mecánica para unas condiciones de contorno biarticulada es:

$$\lambda_k = \frac{\beta_k * L_{arr}}{i_k}$$

(2-94)

Las ecuaciones empleadas para la comprobación de pandeo elástico son las siguientes:

$$\lambda_{red} = \frac{\lambda_k}{\lambda_{ref}}$$

(2-95)

$$\lambda_{ref} = \pi * \sqrt{\frac{E}{F_y}}$$

(2-96)

$$\phi = 0.5 * (1 + 0.21 * (\lambda_{red} - 0.2) + \lambda_{red}^2)$$

(2-97)

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \lambda_k^2}}$$

(2-98)

$$N_{Ed,arr} = \chi * A_{rr} * \frac{F_y}{\gamma_{Mo}}$$

(2-99)



## 2.12 Anillos circunferenciales de compresión en la unión envolvente-techo.

La fuerza en el anillo circunferencial final de compresión (área donde el techo está conectado al anillo) debería verificar:

$$\frac{N_{Ed,c}}{A_{eff,a}} \leq f_{yd} \quad (2-100)$$

donde:

$$N_{Ed,c} = \frac{p_{v,Ed} * \left(\frac{D}{2}\right)^2}{2 * \tan(\theta - \theta_2)} \quad (2-101)$$

- Cuando la separación entre las vigas adyacentes en sus puntos de conexión con el borde no exceda de 3.25 m, la estabilidad del anillo de borde no necesita ser verificada.
- Cuando la carga distribuida de diseño, ( $p_{v,Ed}$ ), actúa hacia arriba, los momentos de flexión en el anillo de borde pueden ser ignorados.
- Cuando la separación entre las vigas adyacentes en sus puntos de conexión con el borde no exceda de 3.25 m, y la carga distribuida de diseño, ( $p_{v,Ed}$ ), actúa hacia arriba, los momentos de flexión en el anillo de borde pueden ser ignorados.
- Cuando la separación entre las vigas adyacentes en sus puntos de conexión con el borde exceda de 3.25 m, los momentos de flexión en el anillo de borde alrededor de su eje vertical deben tenerse en cuenta, además de la fuerza normal, ( $N_{Ed}$ ), en el anillo. Los momentos de flexión en el anillo (valores positivos que inducen tensiones de tracción en el interior del anillo) deberán evaluarse usando las siguientes expresiones:

En el punto de conexión de las vigas:



$$M_{s,Ed} = - \left( \frac{p_{v,Ed} * \left(\frac{D}{2}\right)^3}{2 * \tan(\theta - \theta_2)} \right) * \left( 1 - \frac{\beta}{\tan \beta} \right)$$

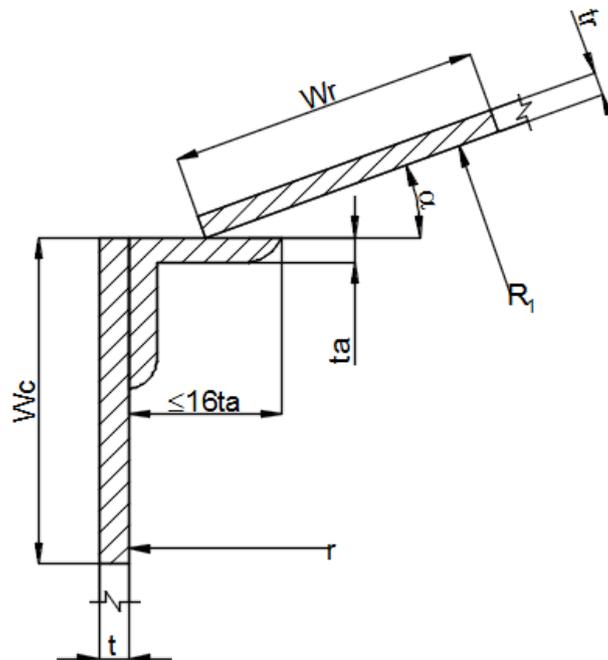
(2-102)

A media luz entre las vigas:

$$M_{s,Ed} = - \left( \frac{p_{v,Ed} * \left(\frac{D}{2}\right)^3}{2 * \tan(\theta - \theta_2)} \right) * \left( \frac{\beta}{\tan \beta} - 1 \right)$$

(2-103)

**Nota:** La carga distribuida de diseño, ( $p_{v,Ed}$ ), actúa en dirección hacia arriba, y se toma como valor negativo, causando un cambio de signo en las fuerzas normales y momentos flectores.



**Figura 2-7.** Anillo de borde en la unión de la envolvente al techo



La longitud del techo considerada que está dentro de la región del anillo superior de compresión se determina mediante la siguiente ecuación:

$$W_r = 0.6 * \sqrt{R_1 * t_r} \quad (2-104)$$

La longitud de la envolvente del tanque que está dentro de la región del anillo superior de compresión se determina mediante la siguiente ecuación:

$$W_c = 0.6 * \sqrt{r * t} \quad (2-105)$$

Las áreas de participación, tanto del techo como de la envolvente respectivamente, dentro de la región del anillo de compresión son:

$$A_{p,1} = W_r * t_r \quad (2-106)$$

$$A_{p,2} = W_c * t \quad (2-107)$$

El área de sección transversal necesaria del anillo de refuerzo superior es:

$$A_{nec} = \frac{N_{Ed,c}}{\frac{2}{3} * \frac{F_{yr}}{\gamma_{Mo}}} \quad (2-108)$$

Por tanto, el área final requerida se determina como:

$$F_{req} = A_{nec} - A_{p,1} - A_{p,2} \quad (2-109)$$



La tensión real máxima a la que está sometido el anillo de compresión es:

$$\sigma_{\text{máx,c}} = \frac{N_{\text{Ed,c}}}{(A_{\text{p,1}} + A_{\text{p,2}} + A_{\text{p,3}})} \quad (2-110)$$

La condición que ha de cumplirse es (1993-1-1, 2005):

$$\sigma_{\text{máx,c}} \leq \frac{2}{3} * F_{\text{Yr}} \quad (2-111)$$

### 2.12.1 Cálculo de la máxima presión de diseño y el área de compresión requerida de la unión techo a la envolvente, de acuerdo al Anexo F.

La máxima presión de diseño (P), para un tanque que ha sido construido o que ha tenido sus detalles de diseño establecido podría ser calculado desde la siguiente ecuación:

$$P = \frac{A * F_y * \tan \theta}{200 * D^2} + \frac{0.00127 * D_{\text{LR}}}{D^2} \quad (2-112)$$

La presión máxima de diseño que ya ha sido establecida, el total de área de compresión requerida en la unión del techo con la envolvente, será calculado desde la siguiente ecuación:

$$A = \frac{200 * D^2 * \left( \frac{0.00127 * D_{\text{LR}}}{D^2} \right)}{F_y * \tan \theta} \quad (2-113)$$

Todos los miembros en la región de la unión techo a la envolvente, incluyendo anillo de insulación, son considerado como contribuir al área de la sección



transversal (A) y esta área es menor que el límite mostrado debajo. El área estará basada en el espesor nominal de elementos de participación:

$$A = \frac{D_{LS}}{2 * \pi * F_y * \tan(\theta)}$$

(2-114)

### 2.13 La presión de falla calculada.

La falla de la unión techo a la envolvente puede ser esperada cuando la tensión en el área del anillo de compresión alcance el punto de fluencia. Sobre la base, una fórmula aproximada para la presión en el cual la falla en el anillo de compresión en la parte superior es esperada para ocurrir. Esta puede ser expresada en términos de la presión de diseño permitida, calculándose de la siguiente manera:

$$P_f = 1.6 * P - \frac{0.000746 * D_{LR}}{D^2}$$

(2-115)

### 2.14 Soporte central del techo.

El perfil del soporte central deberá reunir las siguientes condiciones:

$$b_k \geq 2 * h_k$$

(2-116)

$$A_1 \geq A_2$$

(2-117)

$$I_{y,rig} \geq I_{y,nín,rig} = \frac{N_{Ed} * \left(\frac{D}{2}\right)^2}{\pi^2 * E}$$

(2-118)



$$h_k^2 * \left( \frac{A_1 * A_2}{A_1 + A_2} \right) \geq \frac{I_{y,rig}}{2 * \beta} \quad (2-119)$$

Donde:

$$\beta = \frac{\pi}{n_{vigas}} \quad (2-120)$$

Para el diseño del tanque se tomarán las siguientes hipótesis para hallar el espesor de las alas del perfil del soporte central:

$$b_k = 2 * h_k \quad (2-121)$$

$$t_{sop} = t_1 = t_2 \quad (2-122)$$

$$A_1 = t_1 * b_k = A_2 = t_2 * b_k \quad (2-123)$$

$$h_k = h_{rig} + t_{sop} \quad (2-124)$$

$$(h_{rig} + t_{sop})^3 * t_{sop} - \frac{I_{y,rig}}{2 * \beta} = 0 \quad (2-125)$$

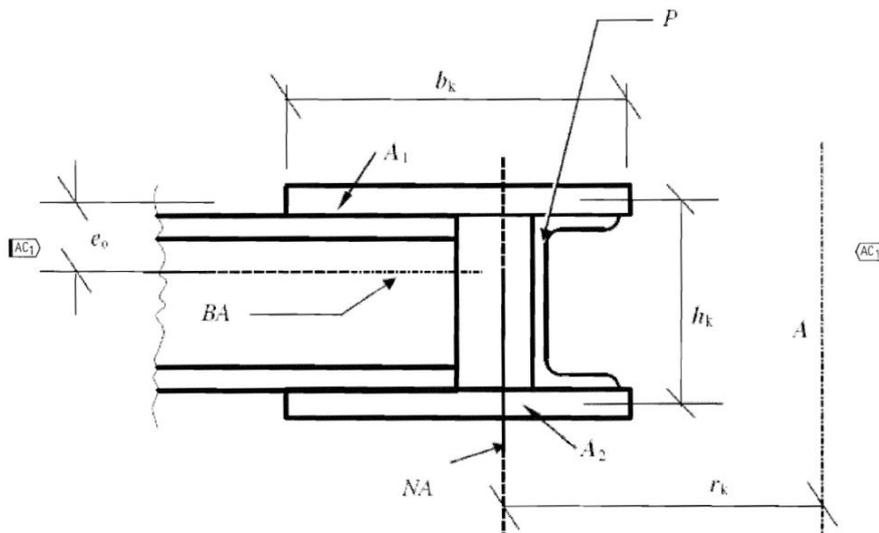
La excentricidad vertical del soporte central desde el eje del ala superior hasta el eje central de la viga se calcula según la siguiente expresión:

$$e_0 = \frac{h_k}{2} \quad (2-126)$$



El radio desde el eje de simetría del tanque hasta el eje central del soporte central se determina como el 10% del radio del tanque.

$$r_k = 0.10 * \frac{D}{2} \tag{2-127}$$



**Figura 2-8.** Anillo central del techo.

Siempre que las condiciones expuestas anteriormente sean satisfechas, el diseño del soporte central puede ser realizado mediante la comprobación del ala inferior únicamente, según las siguientes ecuaciones. Siempre que haya al menos 10 vigas uniformemente separadas, el valor de diseño de la fuerza, ( $N_{r,Ed}$ ), y el momento de flexión, ( $M_{r,Ed}$ ), para el soporte central será calculado como:

$$N_{Ed,sop} = \frac{N_{2,Ed}}{2 * \beta} \tag{2-128}$$

$$M_{r,Ed} = \frac{\beta}{2 * (3 + \beta^2)} * r_k * N_{2,Ed} \tag{2-129}$$



$$N_{2,Ed} = \frac{N_{Ed} * e_o}{h_k} + \frac{M_{Ed}}{h_k} \quad (2-130)$$

La tensión real máxima en el soporte central se determina mediante la siguiente expresión:

$$\sigma_{m\acute{a}x,sop} = \frac{N_{Ed,sop}}{A_2} + \frac{M_{r,Ed}}{W_{elast,y,sop}} \leq \sigma_{adm} \quad (2-131)$$

Donde:

$$W_{elast,y,sop} = \frac{t_{sop} * b_k^2}{6} \quad (2-132)$$

## 2.15 Cálculo de viento.

### 2.15.1 Cálculo de la carga de viento.

- Factor de velocidad de viento:

$$V_{fact} = \left( \frac{\text{Velocidad de viento}}{120} \right)^2 \quad (2-133)$$

- Área de viento proyectada en la vertical del tanque.

$$V_{\text{Área}} = \text{Altura del tanque} * \text{diámetro del tanque}$$

- Presión por velocidad:

$$p = 0.00256 * k_z * k_{zt} * V^2 * I * G + 5.0 \quad (2-134)$$



- Momento de viento en la envolvente:

$$M = \text{presión de viento} * \text{por área de viento} * \frac{\text{Altura del tanque}}{2} \quad (2-135)$$

- Ángulo del vértice superior medio entre el tanque y los radios del vértice superior:

$$\sin^{-1} \left( \frac{D}{2 * \left( \frac{1}{2} * \text{ángulo del vértice superior.} \right)} \right) \quad (2-136)$$

- Área del sector:

$$A_s = \frac{2 * \text{ángulo medio}}{2 * \pi * \left( \pi * \frac{1}{2} * \text{Ángulo del vértice superior} \right)^2} \quad (2-137)$$

- Altura desde el vértice superior a la cuerda:

$$H = \frac{1}{2} * \text{Ángulo del vértice superior} * \cos(\text{ángulo medio}) \quad (2-137)$$

- Área del triángulo debajo de la línea de la cuerda:

$$A_t = \text{Altura del vértice superior} * \frac{D}{2} \quad (2-138)$$

- Área del techo domo:



$A_{td} = \text{Área del sector} - \text{Área del triángulo.}$

(2-139)

- Área expuesta a viento:

$A_{ev} = \text{Área de viento del tanque} + \text{Área de viento del techo.}$

(2-140)

- Momento de viento en la base incluyendo el techo domo

$M_T = \text{Momento} + (p * \text{Área del techo}) * \left( \text{Altura del tanque} + \frac{\text{Altura del domo}}{3} \right)$

(2-141)

- Fuerza cortante de viento actuando en el tanque:

$F_c = \text{Presión de viento} * (\text{Área del tanque} + \text{Área del techo})$

(2-142)

- Momento en la unión envolvente al fondo:

$MDL = (\text{Peso de la envolvente} + \text{Peso de accesorios} + \text{Peso de la estructura} * \%)$   
 $* \frac{D}{2}$

(2-143)

- Peso de Resistencia del fluido:

$W_L = \text{mín} \left( 5.6 * T_b * \sqrt{F_{by} * H * \text{mín}(0.7, G)} \right), (0.45 * H * D)$

(2-144)



- Momento desde el peso del fluido:

$$M_F = W_L * (\pi * D) * \left(\frac{D}{2}\right) \tag{2-145}$$

- Momento desde la presión interna de diseño:

$$M_{PI} = \text{Presión de diseño} * \pi * \left(\frac{D}{2}\right)^2 * \left(\frac{D}{2}\right) \tag{2-146}$$

- Presión de diseño:

$$P = \frac{(0.962) * (A * F_y) * \tan(\theta)}{D^2} + \frac{0.245 * D_{LR}}{D^2} \tag{2-147}$$

- Momento sobre la unión de la envolvente al fondo:

$$M_{WS} = P_{WS} * D * \frac{H^2}{2} \tag{2-148}$$

- Momento sobre la unión de la envolvente al fondo:

$$M_W = M_{WS} + \text{Levantamiento de viento} * V_{\text{área}} * \frac{D}{2} \tag{2-149}$$

- Momento sobre la unión de la envolvente al fondo:

$$M_{DLR} = (\text{Peso del techo}) * \frac{D}{2} \tag{2-150}$$



## 2.16 Verificación del efecto del viento.

### Nomenclatura

$A_w$ : Área del techo para viento [ $m^2$ ];

$D$ : Diámetro del tanque [ $m$ ];

$G$ : Aceleración de la gravedad [ $m/s^2$ ];

$H$ : Altura total del tanque [ $m$ ];

$K_v$ : Factor de corrección del viento;

$M_{dl}$ : Momento de vuelco en la unión envolvente-fondo debido a la altura del líquido [ $mN$ ];

$M_{DLR}$ : Momento unión envolvente-fondo debido al peso nominal de la placa del techo [ $mN$ ];

$M_f$ : Momento en la unión envolvente-fondo debido a la altura del líquido [ $mN$ ];

$M_{pi}$ : Momento en la unión envolvente-fondo debido a la presión interna de diseño [ $mN$ ];

$M_v$ : Momento de vuelco del techo [ $mN$ ];

$M_v$ : Momento de vuelco del cuerpo [ $mN$ ];

$M_w$ : Momento de vuelco en la unión envolvente-fondo [ $mN$ ];

$P_{di}$ : Presión de diseño interna [ $kPa$ ];

$p_{din}$ : Presión dinámica del techo [ $kPa$ ];

$p_{din}$ : Presión dinámica del cuerpo [ $kPa$ ];

$v$ : Velocidad de diseño del viento [ $km/h$ ];

$W_4$ : Peso de la placa del techo [ $kg$ ];

$W_{s_r}$ : Peso del cuerpo del tanque más la estructura soporte del techo [ $kg$ ];

$w_w$ : Peso del líquido;

En este epígrafe se obtienen los momentos de vuelco a los que se ve sometido el tanque debido al efecto del viento. Con ello se define si es necesario realizar el anclaje mecánico del tanque, y así asegurar la estabilidad del tanque contra el máximo momento de volteo que se pueda presentar.



### 2.16.1 Carga de viento sobre el tanque (Estabilidad frente al vuelco).

Las presiones dinámicas debidas al efecto del viento sobre el tanque se determinan según el apartado 5.2.1 de la norma.

La presión dinámica de diseño del viento sobre el envolvente del tanque será determinada según la siguiente expresión, sobre el área proyectada verticalmente de la superficie de la envolvente del tanque:

$$p_{\text{din,cuerpo}} = 0.86 * \left(\frac{v}{190}\right)^2 \quad (2-151)$$

$$A_{w,\text{cuerpo}} = D * H \quad (2-152)$$

La presión dinámica de levantamiento sobre el techo será determinada según la siguiente expresión, sobre el área proyectada horizontalmente de la superficie del techo:

$$p_{\text{din,techo}} = 1.44 * \left(\frac{v}{190}\right)^2 \quad (2-153)$$

$$A_{w,\text{techo}} = \frac{\pi * D^2}{4} \quad (2-154)$$

Estas presiones están basadas en una velocidad de viento de 190 km/h. En caso de que la velocidad de la zona supere los 190 km/h, las presiones son ajustadas en función de la siguiente expresión:

$$K_v = \left(\frac{v}{190}\right)^2 \quad (2-155)$$



El momento de vuelco alrededor de la unión envolvente-fondo debido a la presión del viento se calcula como la suma de momentos debido a la presión dinámica del viento de la envolvente (verticalmente) y el techo (horizontalmente) del tanque:

$$M_{v, cuerpo} = p_{din, cuerpo} * A_{w, cuerpo} * \frac{H}{2} \tag{2-156}$$

$$M_{v, techo} = p_{din, techo} * A_{w, techo} * \frac{D}{2} \tag{2-157}$$

$$M_w = M_{v, cuerpo} + M_{v, techo} \tag{2-158}$$

El momento alrededor de la unión envolvente-fondo debido a la presión de diseño interna es:

$$M_{pi} = p_{din} * \frac{D}{2} * \frac{\pi * D^2}{4} \tag{2-159}$$

El momento alrededor de la unión envolvente-fondo debido al peso nominal de la envolvente y la estructura soporte del techo soportada por el envolvente que no está unida a la placa de techo es:

$$M_{DL} = W_{s,r} * g * \frac{D}{2} \tag{2-200}$$

El momento alrededor de la unión envolvente-fondo debido al peso del líquido es:

$$M_F = W_w * \frac{D}{2} \tag{2-201}$$

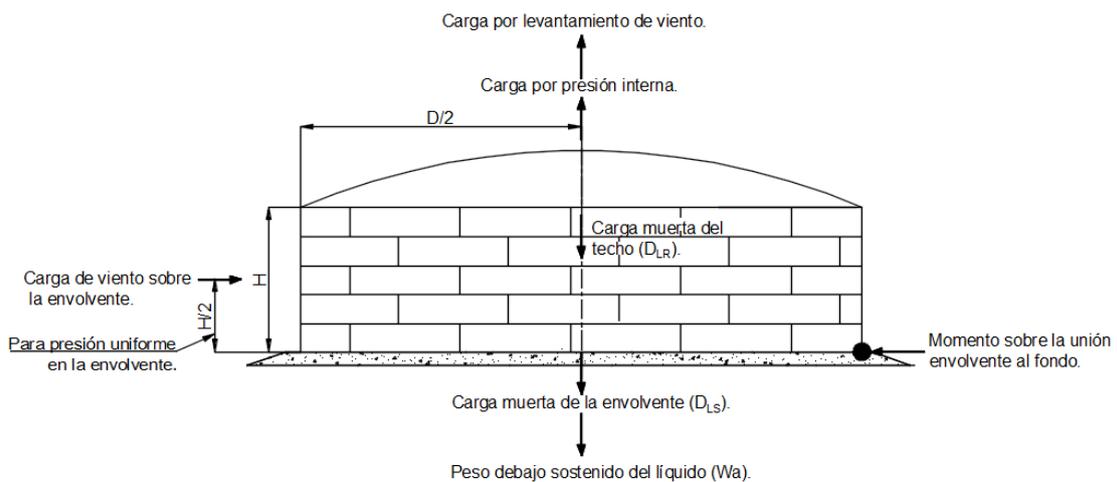


El momento alrededor de la unión envolvente-fondo debido al peso de la placa del techo es:

$$M_{DLR} = W_4 * g * \frac{D}{2} \tag{2-202}$$

Momento de vuelco sobre la unión fondo a la envolvente desde la presión de viento horizontal:

$$M_{ws} = P_{ws} * D * \frac{H^2}{2} \tag{2-203}$$



**Figura 2-9** Momentos de vuelco sobre la unión envolvente-fondo del tanque.

Los tanques sin anclar deben satisfacer ambos criterios de levantamientos descritos a continuación:

$$0.6 * M_w + M_{pi} < \frac{M_{DL}}{1.5} + M_{DLR} \tag{2-204}$$



$$M_w + F_P(M_{pi}) \leq \frac{(M_{DL} + M_F)}{2} + M_{DLR} \quad (2-205)$$

$$M_{ws} + F_p(M_{pi}) \leq \frac{M_{DL}}{1.5} + M_{DLR} \quad (2-206)$$

## 2.17 Cálculo del peso del tanque.

### Nomenclatura

$A_2$ : Área de las alas del perfil armado del soporte central [cm];

$A_{casq}$ : Área del casquete esférico del techo [m<sup>2</sup>];

$A_h$ : Área en proyección horizontal del techo [m<sup>2</sup>];

$D$ : Diámetro del tanque [m];

$D_L$ : Peso efectivo del tanque [kg];

$\rho$ : Densidad del producto [kg/m<sup>3</sup>];

$F_{yb}$ : Límite elástico mínimo del acero de la placa del fondo [MPa];

$g$ : Aceleración de la gravedad [m/s<sup>2</sup>];

$G_{anillo}$ : Peso por unidad de longitud del perfil del anillo circunferencial del techo [kg/m];

$G_{arr}$ : Peso por unidad de longitud del perfil de los anillos de arriostramiento del techo [kg/m];

$G_{vigas}$ : Peso por unidad de longitud del perfil del rigidizador del techo [kg/m];

$H$ : Altura total del tanque [m];

$h_i$ : Altura de cada anillo [m];

$h_{rig}$ : Altura total del rigidizador del techo [cm];

$L_{arr}$ : Longitud del arriostramiento del techo [mm];

$L_{vigas}$ : Longitud del rigidizador del techo en verdadera magnitud [m];

$N_{arr}$ : Número de anillos circunferenciales de arriostramiento del techo;

$n_{vigas}$ : Número de rigidizadores de la estructura del techo;



$P_{di}$ : Presión de diseño interna [kPa];

$t_{actua}$ : Espesor del anillo [mm];

$t_{beff}$ : Espesor adoptado en la placa anular [mm];

$t_{f,adopt}$ : Espesor adoptado en el fondo del tanque [mm];

$t_{r,adopt}$ : Espesor adoptado de la placa del techo [mm];

$t_{sop}$ : Espesor adoptado en las alas del perfil armado del soporte central [cm];

$W_1$ : Peso de los anillos que componen el cuerpo del tanque [kg];

$W_2$ : Peso de la placa del fondo del tanque [kg];

$W_3$ : Peso del anillo anular de cimentación [kg];

$W_4$ : Peso de la placa del techo [kg];

$W_5$ : Peso de la estructura rigidizadora del techo [kg];

$W_{acc}$ : Peso de los accesorios del techo [kg];

$W_{anillo}$ : Peso de los anillos circunferenciales del techo [kg];

$W_{arr}$ : Peso de los anillos circunferenciales de arriostamiento del techo [kg];

$w_{chapa}$ : Ancho adoptado en la placa anular [mm];

$W_L$ : Peso del líquido por unidad de longitud circunferencial, [N/m];

$W_s$ : Peso total del cuerpo del tanque y accesorios [N];

$W_{s_r}$ : Peso del cuerpo del tanque más la estructura soporte del techo [kg];

$W_{sc}$ : Peso del soporte central del techo [kg];

$W_w$ : Peso del líquido, [N];

$\rho_{acero}$ : Densidad del acero [ $kg/m^3$ ];

Se define las distintas partes en que se divide el tanque.

- 1) Envoltente principal del tanque compuesto por anillos.
- 2) Rigidizadores intermedios de la envoltente frente al efecto del viento.
- 3) Placa del fondo del tanque.
- 4) Anillo anular de fondo bajo el envoltente del tanque.
- 5) Placa de techo.
- 6) Estructura rigidizadora que soporta la placa de techo.
- 7) Anillo circunferencial de compresión en la unión envoltente-techo.
- 8) Anillos circunferenciales de arriostamiento entre rigidizadores de techo.



- 9) Soporte central de techo.
- 10) Líquido almacenado en el tanque.

A continuación, se expresan las ecuaciones que permiten el cálculo de los diferentes pesos empleados en los distintos capítulos que componen la memoria del proyecto:

### 2.17.1 Peso efectivo del tanque (DL).

Para el cálculo del peso efectivo del tanque hay que determinar el peso de cada parte del tanque definida anteriormente, excepto el peso del líquido almacenado (Sánchez, 2015).

### 2.17.2 Peso de los anillos que componen el envoltorio del tanque.

$$W_1 = \rho_{acero} * \pi * D * \sum_{i=1}^{n_{anillo}} t_{actual} * h_{anillo,i} \tag{2-207}$$

### Peso de la placa de fondo del tanque.

$$W_2 = \rho_{acero} * A_h * t_{f,adoptado} \tag{2-208}$$

### Peso del anillo anular del fondo.

$$W_3 = \rho_{acero} * \pi * D * W_{placa} * t_{beff} \tag{2-209}$$

### Peso de la placa del techo.

$$W_4 = \rho_{acero} * A_c * t_{r,adoptado} \tag{2-210}$$

### Peso de la estructura rigidizadora del techo.



$$W_5 = n_{vigas} * G_{vigas} * L_{vigas}$$

(2-211)

**Peso del anillo circunferencial de compresión de la unión envolvente-techo.**

$$W_{anillo} = \pi * D * G_{anillo}$$

(2-212)

**Peso del soporte central del techo.**

$$W_{sc} = \rho_{acero} * [(2 * A_2) + (h_{rig} * t_{sop})] * 0.1 * \pi * D$$

(2-213)

**Peso de los anillos circunferenciales de arriostamiento entre rigidizadores del techo.**

$$W_{arr} = L_{arr} * G_{arr} * N_{arr}$$

(2-214)

El peso efectivo del tanque es:

$$D_L = W_1 + W_2 + W_3 + W_4 + W_5 + W_{anillo} + W_{arr} + W_{sc}$$

(2-215)

### **2.17.3 Peso del líquido para la verificación del efecto del viento, según API 650.**

El peso del líquido,  $w_L$ , es el peso de una banda de líquido sobre el envolvente usando una gravedad específica de 0.7 y una altura de 1/2 la altura del nivel de diseño del líquido,  $H$ .  $w_L$  será menor de  $140.8 * H * D$  para el SI de unidades o según la siguiente ecuación:

$$w_L = 70 * t_b * \sqrt{F_{by} * G * H}$$

(2-216)



$$W_w = w_L * \pi * D$$

(2-217)

El espesor corroído requerido para la placa del fondo del tanque,  $t_b$ , situado bajo el envolvente del mismo, tendrá las siguientes restricciones:

- 1) El espesor corroído requerido,  $t_b$ , usado para calcular  $w_L$  no excederá el espesor corroído del primer anillo menos cualquier sobre espesor de corrosión.
- 2) Cuando la placa del fondo situada bajo el envolvente es de mayor grosor debido al momento de vuelco del viento que el resto del fondo del tanque, la proyección mínima del anillo anular más grueso suministrado dentro de la pared del tanque,  $L$ , será el mayor entre 450 mm o  $L_b$ ; sin embargo, no tiene que ser mayor de  $0.035 * D$ .

$$L_b = 0.024 * t_b * \sqrt{\frac{F_{by}}{G * H}} \leq 0.035 * D$$

(2-218)

**Peso total de la envolvente del tanque más accesorios.**

$$W_s = W_1$$

(2-220)

**Peso total de techo fijo, accesorios.**

$$W_{acc} = A_{anillo} + W_{sc}$$

(2-221)

$$W_r = W_4 + W_5 + W_{acc}$$

(2-222)



**Peso total del fondo.**

$$W_f = W_2 + W_3$$

(2-223)

**Peso efectivo de los contenidos del tanque con densidad del producto.**

$$W_p = d_w * H_w * \pi * \left(\frac{D}{2}\right)^2$$

(2-224)

**Peso de la envolvente del tanque más la estructura rigidizadora de techo que absorbe el envolvente del tanque.**

$$W_{s,r} = W_1 + W_5 + W_{acc}$$

(2-225)

- **Conclusiones parciales.**

- 1) Se estableció el sistema de cálculo para los componentes del tanque el fondo, la envolvente y el techo aplicando las normas API 650, EN 1993-1-1/05 y EN 1993-4-2/07. Además, del cálculo del efecto de viento y el peso del tanque.

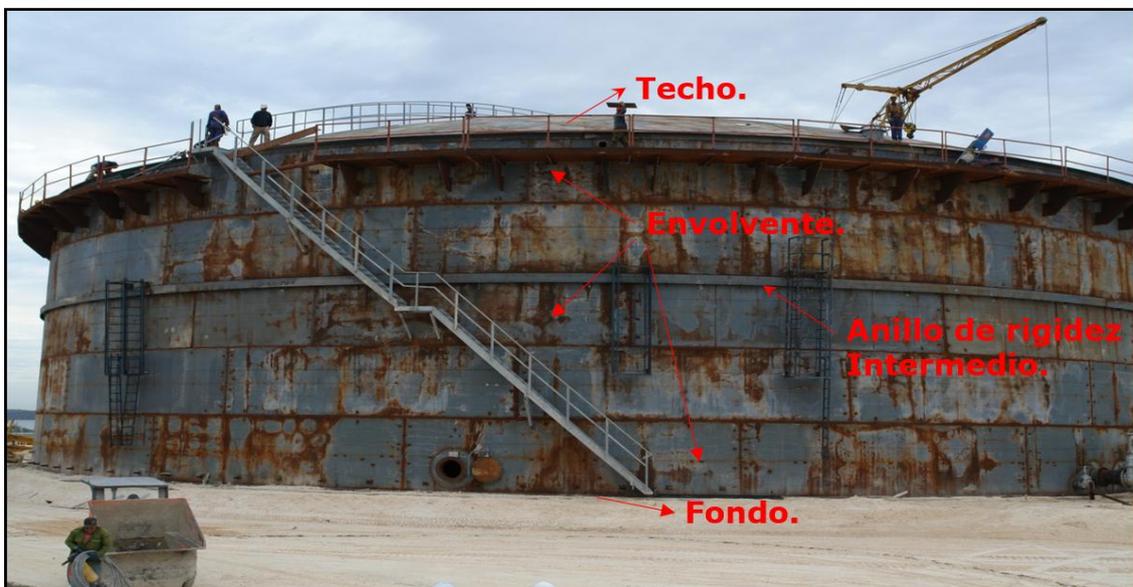


## CAPÍTULO III.

### EJEMPLO DE DISEÑO DEL TANQUE DE ALMACENAMIENTO DE CAPACIDAD 20 000 M<sup>3</sup>.

Este capítulo está conformado por todo lo que se habló en el capítulo anterior aplicando el mismo en un ejemplo de cálculo del tanque.

Se hallan y se evalúan los resultados que posteriormente serán comparados con valores hallados en los softwares.



**Figura 3-1.** Tanque 20 000 m<sup>3</sup>

#### Datos de diseño.

Código de diseño: API 650 12th;

Diámetro: 46.0 m;

Altura de diseño: 12.0 m;

Altura máxima de llenado: 11.285 m;

Tipo de Techo: Auto-soportado tipo Domo;



1:120 Fondo:  


Gravedad específica: 0.87;  
Producto almacenar: Diesel;  
Presión de diseño: 18.6 mbar;  
Presión de operación: 0;  
Presión de vacío: 5 mbar;  
Temperatura máxima de diseño: 50 °C;  
Temperatura mínima de diseño: 10 °C;  
Temperatura de operación: 25 °C;  
Carga de viento: 250 Km/h;

Placas de la envolvente:

Material: S355 J0

Dimensiones de las placas: 10.0 m x 2.4 m;

Placas del techo:

Material: S275 J0

Dimensiones de las placas: 10.0 m x 2.4 m x 5.0 mm;

Placas del fondo:

Material: S275 J0

Dimensiones de las placas: 12.0 m x 2.4 m x 8.0 mm.

Momento del vuelco.

Masa efectiva del contenido del tanque:

Relación D/H

$46.0/12.0 = 3.833$

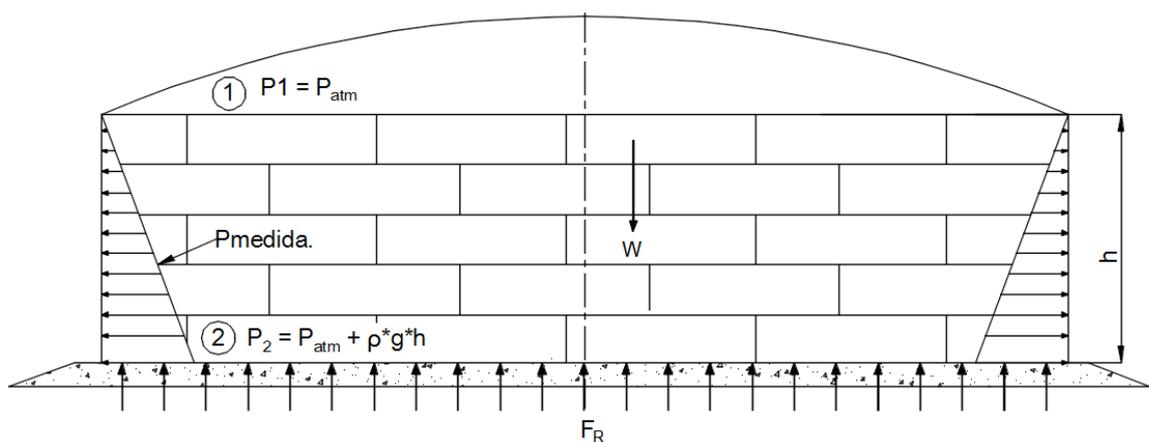
Las características del producto para almacenar:



Índices de calidad.	U/M.	Diesel ESPECIAL.
Densidad a 15.0 °C.	g/cm <sup>3</sup>	0.815-0.865
Viscosidad a 40 °C.	mm <sup>2</sup> /s	1.6-5.3
Temperatura de inflamación.	°C	45 mín.
Azufre total.	% m/m	0.5 máx.
Índice de cetano	---	43 mín.
No. de neutralización.	Mg KOH/g	0.5 máx.
Color ASTM	---	3.5 máx.
Corrosión Al Cu, 3 h a 50 °C	---	1 máx.
Cenizas	% m/m	0.01 máx.
Carbón Conradson/Micro.	% m/m	0.1 máx.
Agua y Sedimentos.	% v/v	0.05 máx.

**Tabla 3-1.** Características del producto a almacenar.

### 3.1 Cálculo hidrostático del tanque.



**Figura 3-2.** Distribución de presión en el Tanque



### 3.1.1 Cálculo del volumen de la columna de líquido.

$$V = \frac{\pi * (D)^2}{4} * h$$

$$V = \frac{\pi * (46.0)^2}{4} * 11.28 = 18736.75 \text{ m}^3$$

### 3.1.2 Cálculo de la presión de la columna de líquido a una profundidad (h).

$$P = \rho * g * h$$

$$P = 870 * 9.81 * 11.285 = 96314.089 \text{ N/m}^2$$

En la tabla se muestra la presión de la columna de líquido a diferentes alturas en el tanque.

Altura de fluido, (m).	Presión, (psi).	Presión, (N/m <sup>2</sup> ).	Presión, (kPa).
1	1.42	9790.55	9.79
3	4.26	29371.67	29.37
6	8.53	58812.30	58.81
8	11.38	78462.36	78.46
10	14.23	98112.43	98.11

**Tabla 3-2** Comparación entre las mediciones de columna de agua.

### 3.1.3 Cálculo de la masa de líquido.

$$m = \rho * V$$

$$m = 870 * 18736.75 = 16300972.5 \text{ Kg.}$$

### 3.1.4 Cálculo del peso de la columna de líquido.

es obtenido por la multiplicación de la constante gravitacional.



$$W = m * g$$

$$W = 16300972.5 * 9.81 = 159912540.2 \text{ N.}$$

### 3.1.5 Cálculo de la presión sobre el fondo.

$$P = \frac{W}{A}$$

$$P = \frac{159912540.2}{1661.06} = 96271.38 \text{ N/m}^2$$

### 3.1.6 Cálculo de la fuerza hidrostática resultante sobre una superficie plana.

$$F_R = P * A$$

$$F_R = 96271.41 * 1661.06 = 159912588.3 \text{ N.}$$

## 3.2 Cálculo de la envolvente.

### 3.2.1 Cálculo de la capacidad del tanque

$$C = 0.785 * D^2 * H$$

$$C = 0.785 * (46.0)^2 * 12.0$$

$$C = 19932.70 \text{ m}^3$$

### 3.2.2 Determinación del número de anillos que van a conformar la envolvente del tanque.

$$N_{\text{anillos}} = \frac{H}{A}$$

$$N_{\text{anillos}} = \frac{12.0}{2.4} = 5$$

### 3.2.3 Cálculo para establecer el número de placas en cada anillo y la longitud de la placa del anillo, calculándose de la siguiente manera:

a) número de placas en cada anillo.

$$N_{\text{placas en el anillo}} = \frac{2 * \pi * r}{\text{Longitud de la placa del anillo.}}$$

Se tomará una longitud de 10 m de las placas para el cálculo.

$$N_{\text{placas en el anillo}} = \frac{2 * 3.14 * 23.0}{10} = 14.4$$

Ajustando cada anillo tendrá en su conformación **15 placas**.

b) longitud de la placa del anillo.

$$\text{Longitud de la placa del anillo} = \frac{2 * \pi * r}{N_{\text{placas en el anillo.}}}$$

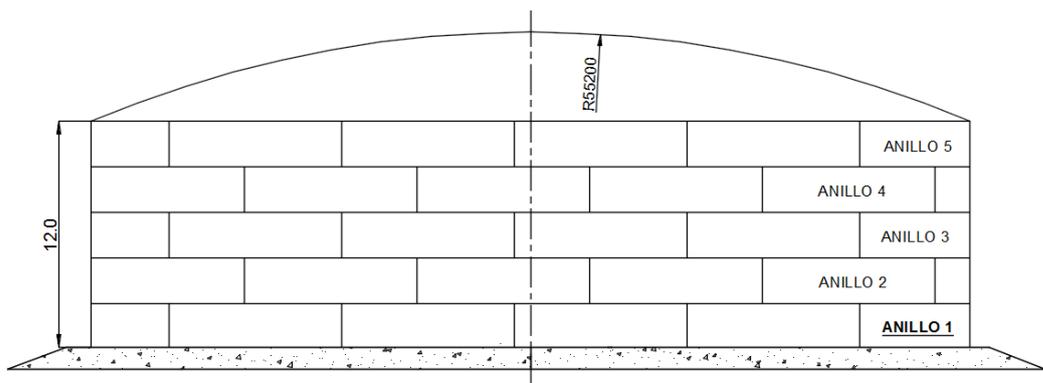
$$\text{Longitud de la placa del anillo} = \frac{2 * 3.14 * 23.0}{15} = 9.629 \text{ m.}$$

Se establece que la longitud de la placa es **9.629 m**.

### 3.3 Cálculo de los espesores de la envolvente por el método 1-pie.

líneas discontinuas representada en cada figura, representa que al anillo se le ha calculado el espesor de diseño requerido.

**Primer Anillo:**



**Figura 3-3.** El valor de (H) = 12.0 m.

El valor de (H) es tomado desde el fondo hasta la altura del nivel de líquido para el cálculo del espesor del primer anillo.

$$t_d = \frac{4.9 * 46.0 * (12.0 - 0.3) * 0.87}{188} + 3.0$$

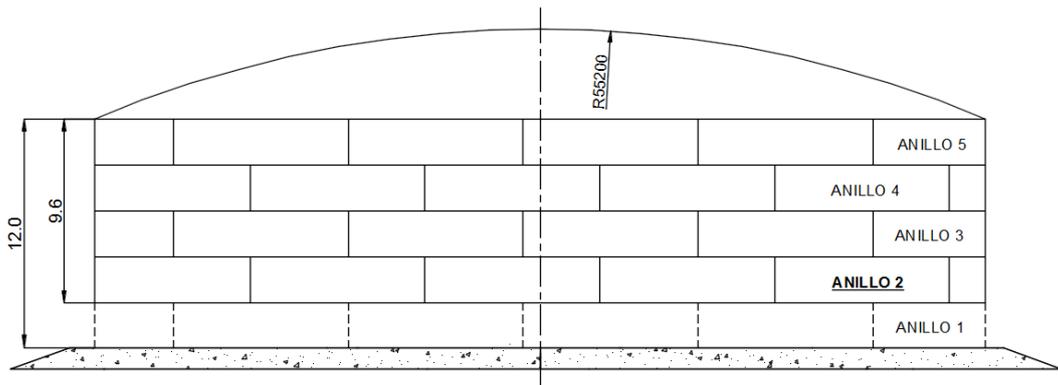
$$t_d = 15.20 \text{ mm.}$$

$$t_t = \frac{4.9 * 46.0 * (12.0 - 0.3)}{201}$$

$$t_t = 13.12 \text{ mm.}$$

Se toma el valor de espesor 15.20 mm. Espesor normalizado **17.00 mm**

### Segundo Anillo:



**Figura 3-4.** El valor de (H) = 9.6 m.

Para el cálculo del segundo anillo el valor de (**H**) es la diferencia 12.0 m utilizado en cálculo anterior menos el ancho del anillo representado con líneas discontinua, siendo 2.4 m.

Sería: 12.0 - 2.4 = 9.6 m.



$$t_d = \frac{4.9 * 46.0 * (9.6 - 0.3) * 0.87}{188} + 3.0$$

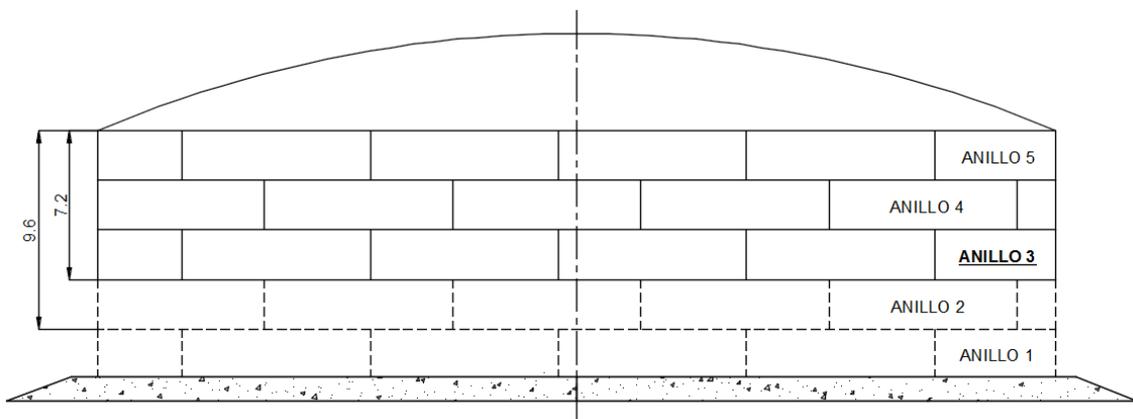
$$t_d = 12.70 \text{ mm.}$$

$$t_t = \frac{4.9 * 46.0 * (9.6 - 0.3)}{201}$$

$$t_t = 10.42 \text{ mm.}$$

Se toma el valor de espesor 12.70 mm. Espesor normalizado **14.00 mm**

### Tercer Anillo:



**Figura 3-5.** El valor de (H) = 7.2 m.

Para el cálculo del segundo anillo el valor de **(H)** es la diferencia 9.6 m utilizado en cálculo anterior menos el ancho del anillo representado con líneas discontinua, siendo 2.4 m.

Sería:  $9.6 - 2.4 = 7.2 \text{ m.}$

$$t_d = \frac{4.9 * 46.0 * (7.2 - 0.3) * 0.87}{188} + 3.0$$

$$t_d = 10.19 \text{ mm.}$$

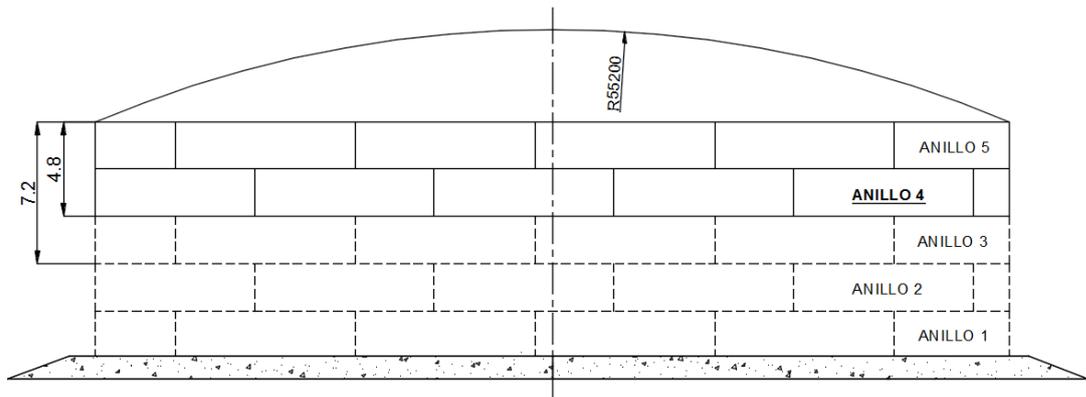
$$t_t = \frac{4.9 * 46.0 * (7.2 - 0.3)}{201}$$



$$t_t = 7.73 \text{ mm.}$$

Se toma el valor de espesor 10.19 mm. Espesor normalizado **10.00 mm**

**Cuarto Anillo:**



**Figura 3-6.** El valor de (H) = 4.8 m.

Para el cálculo del segundo anillo el valor de (H) es la diferencia 7.2 m utilizado en cálculo anterior menos el ancho del anillo representado con líneas discontinua, siendo 2.4 m.

Sería:  $7.2 - 2.4 = 4.8 \text{ m.}$

$$t_d = \frac{4.9 * 46.0 * (4.8 - 0.3) * 0.87}{188} + 3.0$$

$$t_d = 7.69 \text{ mm.}$$

$$t_t = \frac{4.9 * 46.0 * (4.8 - 0.3)}{201}$$

$$t_t = 5.04 \text{ mm.}$$

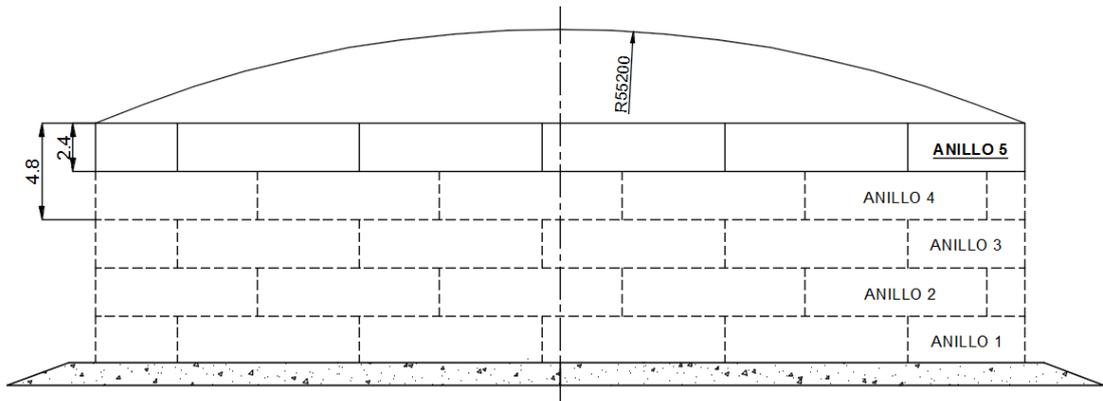
Para establecer el espesor de diseño del **Anillo 4**, hay que hacer uso de la tabla del **tópico 5.6.1.1** de la norma API 650/13, donde establece que el espesor



nominal para un rango de diámetro de tanques en este caso de **(36 a 60 m)**, el espesor nominal es igual **8 mm**.

Como el espesor del quinto anillo es  $t_d = 7.69 \text{ mm}$ , siendo menor que 8 mm. Por la regla de diseño el valor de espesor de ( $t_d$ ) para el quinto anillo será **8 mm**.

**Quinto Anillo:**



**Figura 3-7.** El valor de (H) = 2.4 m.

Para el cálculo del segundo anillo el valor de **(H)** es la diferencia 4.8 m utilizado en cálculo anterior menos el ancho del anillo representado con líneas discontinua, siendo 2.4 m.

Sería:  $4.8 - 2.4 = 2.4 \text{ m}$ .

$$t_d = \frac{4.9 * 46.0 * (2.4 - 0.3) * 0.87}{188} + 3.0$$

$$t_d = 5.19 \text{ mm.}$$

$$t_t = \frac{4.9 * 46.0 * (2.4 - 0.3)}{201}$$

$$t_t = 2.35 \text{ mm.}$$



Para establecer el espesor de diseño del **Anillo 5**, hay que hacer uso de la tabla del **tópico 5.6.1.1** de la norma API 650/13, donde establece que el espesor nominal para un rango de diámetro de tanques en este caso de **(36 a 60 m)**, el espesor nominal es igual **8 mm**.

Como el espesor del quinto anillo es  $t_d = 5.19 \text{ mm}$ , siendo menor que 8 mm. Por la regla de diseño el valor de espesor de ( $t_d$ ) para el quinto anillo será **8 mm**.

### **3.3.2 Determinación del espesor requerido de los anillos de la envolvente bajo presión interna, aplicando el método 1-pie.**

De acuerdo al diámetro del tanque, el espesor nominal de las placas de la envolvente es 8.0 mm, de acuerdo al epígrafe 5.6.1.1 de la API 650/13.

#### **3.3.2.1 Espesor requerido para el Primer Anillo.**

- **Condición de operación normal.**

$$t_d = \frac{4.9 * 46.0 * (11.2 - 0.3) * 0.87}{188}$$

$$t_d = 11.36 \text{ mm.}$$

- **Condición de prueba hidrostática.**

$$t_t = \frac{4.9 * 46.0 * (11.2 - 0.3)}{201}$$

$$t_t = 12.22 \text{ mm.}$$

El espesor final seleccionado incluyendo el espesor de corrosión y otros permisibles = 15.20 mm.

#### **3.3.2.2 Espesor requerido para el Segundo Anillo.**

- **Condición de operación normal.**



$$t_d = \frac{4.9 * 46.0 * (8.8 - 0.3) * 0.87}{188}$$

$$t_d = 8.86 \text{ mm.}$$

- **Condición de prueba hidrostática.**

$$t_t = \frac{4.9 * 46.0 * (8.8 - 0.3)}{201}$$

$$t_t = 9.53 \text{ mm.}$$

El espesor final seleccionado incluyendo el espesor de corrosión y otros permisibles = 12.70 mm.

### 3.3.2.3 Espesor requerido para el Tercer Anillo.

- **Condición de operación normal.**

$$t_d = \frac{4.9 * 46.0 * (6.4 - 0.3) * 0.87}{188}$$

$$t_d = 6.36 \text{ mm.}$$

- **Condición de prueba hidrostática.**

$$t_t = \frac{4.9 * 46.0 * (6.4 - 0.3)}{201}$$

$$t_t = 6.84 \text{ mm.}$$

El espesor final seleccionado incluyendo el espesor de corrosión y otros permisibles = 10.19 mm.

### 3.3.2.4 Espesor requerido para el Cuarto Anillo.

- **Condición de operación normal.**



$$t_d = \frac{4.9 * 46.0 * (4.0 - 0.3) * 0.87}{188}$$

$$t_d = 3.85 \text{ mm.}$$

- **Condición de prueba hidrostática.**

$$t_t = \frac{4.9 * 46.0 * (4.0 - 0.3)}{201}$$

$$t_t = 4.14 \text{ mm.}$$

El espesor final seleccionado incluyendo el espesor de corrosión y otros permisibles = 8.00 mm.

### 3.3.2.5 Espesor requerido para el Quinto Anillo.

- **Condición de operación normal.**

$$t_d = \frac{4.9 * 46.0 * (1.6 - 0.3) * 0.87}{188}$$

$$t_d = 1.35 \text{ mm.}$$

### 3.3.3 Condición de prueba hidrostática.

$$t_t = \frac{4.9 * 46.0 * (1.6 - 0.3)}{201}$$

$$t_t = 1.45 \text{ mm.}$$

El espesor final seleccionado incluyendo el espesor de corrosión y otros permisibles = 8.00 mm.

**3.3.3.1 Cálculo tensión normal circunferencial debido a la carga de líquido y presión interna debería ser verificada en cada anillo, usando la expresión siguiente:**



$$\sigma_{NC} = [\gamma_F * \rho * g * H_{red} + P_{Ed}] * \left(\frac{r}{t}\right) \leq f_{y,d}$$

$$\sigma_{NC1} = [1.00 * 0.87 * 9.81 * 2.4 + 1.86] * \left(\frac{23}{17}\right) \leq 260 \text{ MPa.}$$

$$\sigma_{NC1} = 30.16 \text{ MPa} \leq 260 \text{ MPa.}$$

$$\sigma_{NC2} = [1.00 * 0.87 * 9.81 * 4.5 + 1.86] * \left(\frac{23}{14}\right) \leq 260 \text{ MPa.}$$

$$\sigma_{NC2} = 66.03 \text{ MPa} \leq 260 \text{ MPa.}$$

$$\sigma_{NC3} = [1.00 * 0.87 * 9.81 * 6.9 + 1.86] * \left(\frac{23}{10}\right) \leq 260 \text{ MPa.}$$

$$\sigma_{NC3} = 139.72 \text{ MPa} \leq 260 \text{ MPa.}$$

$$\sigma_{NC4} = [1.00 * 0.87 * 9.81 * 9.3 + 1.86] * \left(\frac{23}{8}\right) \leq 260 \text{ MPa.}$$

$$\sigma_{NC4} = 227.45 \text{ MPa} \leq 260 \text{ MPa.}$$

$$\sigma_{NC5} = [1.00 * 0.87 * 9.81 * 10.2 + 1.86] * \left(\frac{23}{8}\right) \leq 260 \text{ MPa.}$$

$$\sigma_{NC5} = 248.95 \text{ MPa} \leq 260 \text{ MPa.}$$

**3.3.3.2 Comparación del cálculo de los espesores de la envolvente de un tanque de 20 000 m<sup>3</sup>, teniendo como punto de partida tres aceros para su posible construcción.**

Especificación de acero.	S <sub>d</sub> (MPa).	S <sub>t</sub> (MPa).	Notación.
A283M Gr. C	137	154	C1
A36M	160	171	C2
S355 J0	188	201	C3



**Tabla 3-3.** Especificaciones de las placas de acero.

Anillos #.	Altura remanente.	t <sub>d</sub>	t <sub>t</sub>	Espesor de los anillos.	Cantidad de placa por anillo.	Peso Kg.
1	12	19.7	17.1	20	15	3768
2	9.6	16.3	13.6	17	15	3202
3	7.2	12.7	10.0	13	15	2449
4	4.8	9.4	6.5	10	15	1884
5	2.4	6.0	3.0	8	15	1507
<b>Peso total = 192 150.52 Kg ≈ 192.15 Ton.</b>						

**Tabla 3-4.** Resultados para el diámetro del tanque de 46.0 m con 2.4 m la altura del anillo para C1.

Anillos #.	Altura remanente.	t <sub>d</sub>	t <sub>t</sub>	Espesor de los anillos.	Cantidad de placa por anillo.	Peso Kg.
1	12	17.3	15.4	18	15	3391
2	9.6	14.3	12.2	15	15	2826



3	7.2	11.4	9.0	12	15	2260
4	4.8	8.5	5.9	8	15	1507
5	2.4	5.5	2.7	8	15	1507
<b>Peso total = 172 365.00 Kg ≈ 172.36 Ton.</b>						

**Tabla 3-5.** Resultados para el diámetro del tanque de 46.0 m con 2.4 m la altura del anillo para C2.

Anillos #.	Altura remanente.	t <sub>d</sub>	t <sub>t</sub>	Espesor de los anillos.	Cantidad de placa por anillo.	Peso Kg.
1	12	15.2	13.1	17	15	3202
2	9.6	12.7	10.4	14	15	2637
3	7.2	10.1	7.7	10	15	1884
4	4.8	7.6	5.0	8	15	1507
5	2.4	5.1	2.3	8	15	1507
<b>Peso total = 161 055.00 Kg ≈ 161.055 Ton.</b>						

**Tabla 3-5.** Resultados para el diámetro del tanque de 46.0 m con 2.4 m la altura del anillo para C3.



### 3.4 Análisis económicos sobre la base del costo de la envolvente.

Se toma el precio referenciado en Euros de 1m<sup>2</sup> de laminado.

1 m<sup>2</sup> → 0.0628 t = 60.16 Euros.

El costo de la envolvente con el acero ASTM A283M Gr. C.

$$C = \frac{192.15 * 60.16}{0.0628} = 184072.29 \text{ Euros.}$$

El costo de la envolvente con el acero ASTM A36M

$$C = \frac{172.36 * 60.16}{0.0628} = 165114.17 \text{ Euros.}$$

El costo de la envolvente con el acero EN S355 J0

$$C = \frac{161.055 * 60.16}{0.0628} = \mathbf{154284.39 \text{ Euros.}}$$

#### Como resultados:

- El acero más adecuado para el diseño y construcción de un tanque de capacidad 20 000 m<sup>3</sup> con **diámetro: 46.0 m** y **altura: 12.0 m**, es el **EN S355 J0**, debido a su peso en toneladas que es mucho menor que el resto de los aceros que fueron calculados.
- Desde el punto de vista de costo en el mercado el **EN S355 J0** presenta mejor precio en comparación con el resto de los aceros.

### 3.4 Cálculo de la viga de viento superior.

El módulo de sección mínimo requerido del anillo de rigidez se determinará mediante la siguiente ecuación:

$$Z = \frac{D^2 * H_2}{17} * \left( \frac{V}{190} \right)^2$$



$$Z = \frac{(46.0)^2 * 11.285}{17} * \left(\frac{250}{190}\right)^2 = 2428.63 \text{ cm}^3$$

De acuerdo con la tabla 5.20a de la API 650/13, se selecciona el **Detalle e**.

### 3.4.1 Cálculo de la viga de viento intermedia.

La altura máxima de la envolvente sin refuerzo se calculará como sigue:

$$H_1 = 9.47 * t * \sqrt{\left(\frac{t}{D}\right)^3 * \left(\frac{190}{V}\right)^2}$$

$$H_1 = 9.47 * 8 * \sqrt{\left(\frac{8}{46.0}\right)^3 * \left(\frac{190}{250}\right)^2} = 3.14 \text{ m}$$

### 3.5 Cálculo de la altura transformada equivalente.

Después de determinar la altura máxima de la envolvente no rígida,  $H_1$ , la altura de la transformación de la envolvente se calculará de la siguiente manera:

Con la siguiente ecuación, cambia el ancho real de cada anillo, por un ancho transpuesto de cada anillo. Por supuesto que tiene el espesor superior de la envolvente.

$$W_{tr} = \sum_1^{n\text{anillos}} h_{(i)} * \sqrt{\left(\frac{t_{\text{último anillo}}}{t_{\text{actual}(i)}}\right)^5}$$

La altura transformada equivalente de la envolvente es:

$$W_{tr} = 2.4 * \left( \sqrt{\left(\frac{8}{17}\right)^5} + \sqrt{\left(\frac{8}{14}\right)^5} + \sqrt{\left(\frac{8}{12}\right)^5} + \sqrt{\left(\frac{8}{8}\right)^5} + \sqrt{\left(\frac{8}{8}\right)^5} \right) = 5.15 \text{ m.}$$

$$3.14 \text{ m} < 5.15 \text{ m}$$



Como la altura transformada equivalente es mayor que la altura máxima sin rigidizar, es necesario disponer de rigidizadores secundarios.

### 3.6 Aplicación del Anexo V.

#### a) Envoltente sin rigidizar.

El procedimiento utiliza el espesor nominal más delgado del anillo y el método de la envoltente transformada para establecer el número y las ubicaciones de los rigidizadores intermedios.

#### b) Criterio de Pandeo.

Para una envoltente de tanque no rigidizada sometida a suficiente presión externa para causar pandeo, el pandeo ocurrirá elásticamente si se cumple el siguiente criterio. Se debe tener en cuenta que este criterio generalmente se cumplirá, excepto para tanques muy pequeños y excepcionalmente gruesos.

Si no se cumple este criterio, los efectos de la presión externa deben evaluarse de acuerdo con los requisitos del Código ASME Sección VIII, División 1.

$$\left(\frac{D}{t_{\text{smín}}}\right)^{0.75} * \left[\left(\frac{H_{TS}}{D}\right) * \left(\frac{F_y}{E}\right)^{0.5}\right] \geq 0.00675$$

$$\left(\frac{46}{8}\right)^{0.75} * \left[\left(\frac{5.15}{46}\right) * \left(\frac{345}{199000}\right)^{0.5}\right] \geq 0.00675$$

$$0.01689 \geq 0.00675$$

La presión externa de diseño total para la envoltente ( $P_s$ , usando el  $\psi$  apropiado y la presión externa de diseño especificada ( $P_e$ , usando  $\psi = 3.0$ ) no debe exceder para un tanque sin rigidización:



$$P_s \leq \frac{E}{15203 * \psi * \left(\frac{H_{TS}}{D}\right) * \left(\frac{D}{t_{s\text{mín}}}\right)^{2.5}}$$

$$P_s \leq \frac{199000}{15203 * 1 * \left(\frac{5.15}{46}\right) * \left(\frac{46}{8}\right)^{2.5}}$$

$$0.25 \leq 1.487$$

La ecuación puede reescribirse para calcular el espesor nominal del anillo más delgado requerido para una presión externa de diseño especificada como:

$$t_{s\text{mín}} \geq \frac{47.07 * (\psi * H_{TS} * P_s)^{0.4} * D^{0.6}}{(E)^{0.4}}$$

$$t_{s\text{mín}} \geq \frac{47.07 * (1 * 5.15 * 0.25)^{0.4} * (46)^{0.6}}{(199000)^{0.4}}$$

$$8.0 \text{ mm} \geq 3.93 \text{ mm.}$$

**3.7 Cálculo del módulo de sección mínima requerida de una viga de viento intermedia se determinará por lo siguiente ecuación:**

$$Z = \frac{D^2 * h_1}{17} * \left(\frac{V}{190}\right)^2$$

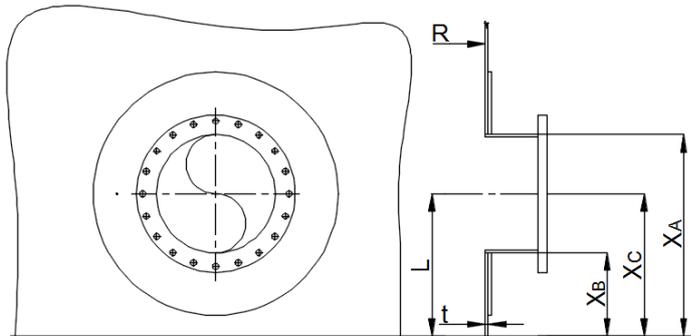
$$Z = \frac{(46)^2 * 2.8}{17} * \left(\frac{250}{190}\right)^2 = 603.37 \text{ cm}^3$$

De acuerdo con la tabla 5.20a de la API 650/13, se selecciona el **Detalle e**.

**3.8 Aplicación del Anexo P.**



1) Boquilla: Ø610 mm.



**Figura 3-7.** Boquilla de descarga.

$a = 305 \text{ mm};$

$= 734 \text{ mm};$

$H = 12000 \text{ mm};$

$\Delta T = 80^\circ\text{C} - 15^\circ\text{C} = 65^\circ\text{C};$

$R = 46000/2 = 23000 \text{ mm};$

$G = 0.87;$

$t = 17 \text{ mm}.$

- **Coefficiente de rigidez para la carga radial en la boquilla (P.2a)**

$R/t = 23000/17 = 1353.$

$a/R = 305/23000 = 0.013.$

$L/2a = 630/610 @ 1.0$

$$\frac{K_R}{E * (2 * a)} = 4.4 * 10^{-5}$$



$$K_R = (4.4 * 10^{-5}) * (199000 \text{ N/mm}^2) * (610 \text{ mm})$$

$$K_R = 5.3 * 10^3 \text{ N/mm}$$

- **Coefficiente de rigidez para el momento longitudinal (P.2b)**

$$\frac{K_L}{E * (2 * a)^3} = 5.1 * 10^{-5}$$

$$K_L = (5.1 * 10^{-5}) * (199000 \text{ N/mm}^2) * (610 \text{ mm})^3$$

$$K_L = 2.3 * 10^9 \text{ N - mm/rad}$$

- **coeficiente de rigidez para el momento circunferencial (P.2c)**

$$\frac{K_C}{E * (2 * a)^3} = 5.1 * 10^{-5}$$

$$K_C = (8.5 * 10^{-5}) * (199000 \text{ N/mm}^2) * (610 \text{ mm})^3$$

$$K_C = 3.8 * 10^9 \text{ mm/rad}$$

### 3.8.1 Cálculo de la desviación y rotación libre en la envolvente en el eje de la boquilla resultado de la carga hidrostática del tanque lleno.

$$\beta = \frac{1.285}{(R * t)^{0.5}} = \frac{1.285}{(23000 * 17)^{0.5}} = 0.00205$$

$$\beta * L = 0.00205 * 630 = 1.29 \text{ rad}$$

$$W = \frac{(9.8 * 10^{-6}) * (0.87) * (12000) * (23000)^2}{199000 * 17} * \left[ 1 - e^{-1.29} * \cos(1.29) - \frac{630}{12000} \right] + (12 * 10^{-6}) * (23000) * (65)$$



$$W = 12.59 \text{ mm.}$$

$$\theta = \frac{(9.8 * 10^{-6}) * (0.87) * (12000) * (23000)^2}{199000 * 17} * \left[ \frac{1}{12000} - 0.00205 * e^{-1.29} * (\cos(1.29) + \sin(1.29)) \right]$$

$$\theta = -0.0077 \text{ rad.}$$

- **Realizar el análisis de flexibilidad de la tubería usando  $W$ ,  $\theta$ ,  $K_R$ ,  $K_L$  como la condición de extremo en la conexión de la boquilla a la tubería.**

$$X_A = 1039 \text{ mm.}$$

$$X_B = 429 \text{ mm.}$$

$$X_C = 734 \text{ mm.}$$

- **Determine las cantidades no dimensionales.**

$$\frac{X_A}{(R * t)^{0.5}} = \frac{1039}{(23000 * 17)^{0.5}} = 1.66$$

$$\frac{X_B}{(R * t)^{0.5}} = \frac{429}{(23000 * 17)^{0.5}} = 0.68$$

$$\frac{X_C}{(R * t)^{0.5}} = \frac{734}{(23000 * 17)^{0.5}} = 1.17$$

$$\lambda = \frac{a}{(R * t)^{0.5}} = \frac{305}{(23000 * 17)^{0.5}} = 0.48$$

$$Y_F = 1.2/N.$$

$$Y_L = 4.0/N\text{-mm.}$$

$$Y_C = 5.0/N\text{-mm.}$$

- **Construir los nomogramas de carga.**

$$1.0 - 0.75 \left( \frac{X_B}{(R * t)^{0.5}} \right) = 1.0 - 0.75 \left( \frac{429}{(23000 * 17)^{0.5}} \right) = 0.48$$

$$1.0 - 0.75 \left( \frac{X_A}{(R * t)^{0.5}} \right) = 1.0 - 0.75 \left( \frac{1039}{(23000 * 17)^{0.5}} \right) = -0.2$$

$$1.0 - 0.75 \left( \frac{X_C}{(R * t)^{0.5}} \right) = 1.0 - 0.75 \left( \frac{734}{(23000 * 17)^{0.5}} \right) = 0.12$$

- **Determinación de la carga permisible.**

$$F_P = P * \pi * a^2$$

$$F_P = (\rho * g * h) * \pi * a^2$$

$$F_P = (0.87 * 9800 * 12.0 - 0.734) * 3.14 * (0.305)^2$$

$$F_P = 28057.20 \text{ N.}$$

$$\frac{\lambda}{2Y_F} \left( \frac{F_R}{F_P} \right) = \frac{0.48}{2(1.2)} \left( \frac{F_R}{28057} \right) = 7.12 * 10^{-6} F_R$$

$$\frac{\lambda}{aY_L} \left( \frac{M_L}{F_P} \right) = \frac{0.48}{(305)(4.0)} \left( \frac{M_L}{28057} \right) = 1.4 * 10^{-5} M_L$$

$$\frac{\lambda}{aY_C} \left( \frac{M_C}{F_P} \right) = \frac{0.48}{(305)(5.0)} \left( \frac{M_C}{28057} \right) = 1.1 * 10^{-5} M_C$$



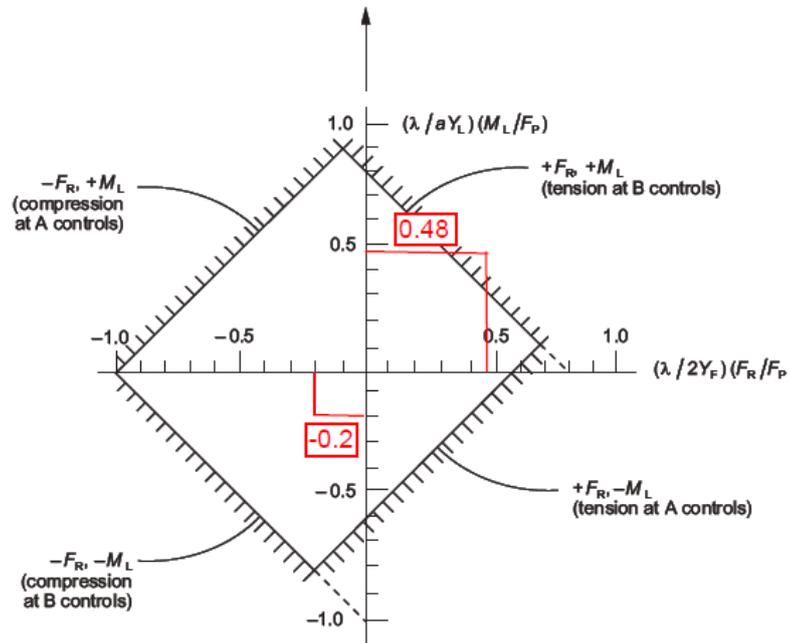


Figure P.5a—Determination of Allowable Loads from Nomogram:  $F_R$  and  $M_L$

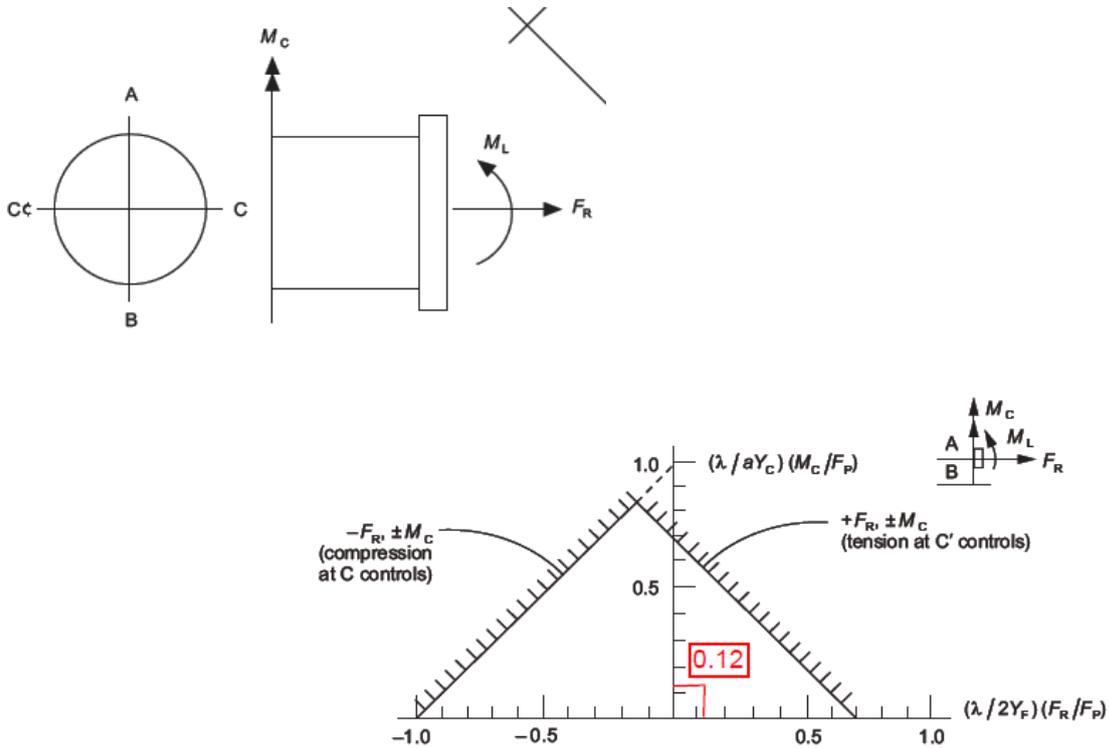


Figure P.5b—Determination of Allowable Loads from Nomogram:  $F_R$  and  $M_C$

Figura 3-9. Gráfica del Comportamiento de la boquilla de descarga.



- **Determine la carga de la tubería limitada.**

Para  $M_L = 0$  y  $M_C = 0$

$$\text{Para } F_R = \frac{\lambda}{2Y_F} \left( \frac{F_R}{F_P} \right) = 7.12 * 10^{-6} F_R \leq -0.2$$

Por tanto:

$$F_{R\text{máx.}} = \frac{-0.2}{7.12 * 10^{-6}} = -28089 \text{ N (A)}$$

Para  $M_L = 0$  y  $F_R = 0$

$$\text{Para } M_C = \frac{\lambda}{aY_C} \left( \frac{M_C}{F_P} \right) = 1.1 * 10^{-5} M_C \leq 0.12$$

Por tanto:

$$M_{C\text{máx}} = \frac{0.12}{1.1 * 10^{-5}} = 10909.09 \text{ N - mm (C)}$$

Para  $F_R = 0$  y  $M_C = 0$

$$\text{Para } M_L = \frac{\lambda}{aY_L} \left( \frac{M_L}{F_P} \right) = 1.4 * 10^{-5} M_L \leq -0.2$$

Por tanto:

$$M_L = \frac{-0.2}{1.4 * 10^{-5}} = -14285.71 \text{ N - mm (A)}$$



2) Boquilla: Ø324 mm.

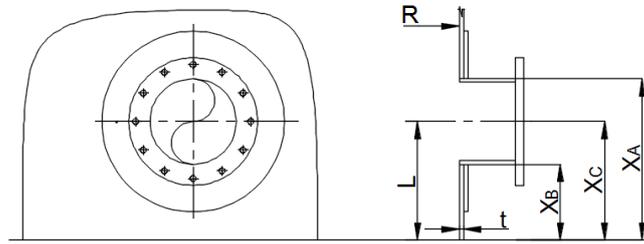


Figura 3-10. Boquilla de succión.

$a = 162 \text{ mm};$

$L = 449 \text{ mm};$

$H = 12000 \text{ mm};$

$\Delta T = 80^\circ\text{C} - 15^\circ\text{C} = 65^\circ\text{C};$

$R = 46000/2 = 23000 \text{ mm};$

$G = 0.87;$

$t = 17 \text{ mm}.$

- **Coefficiente de rigidez para la carga radial en la boquilla (P.2a)**

$$R/t = 23000/17 = 1353.$$

$$a/R = 162/23000 = 0.007.$$

$$L/2a = 449/324 @ 1.0$$

$$\frac{K_R}{E * 2 * a} = 5.8 * 10^{-4}$$

$$K_R = 5.8 * 10^{-4} \left( 199000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right) * (324 \text{ mm})$$

$$K_R = 3.7 * 10^{-4} \text{ N/mm}.$$

- **Coefficiente de rigidez para el momento longitudinal (P.2b)**



$$\frac{K_L}{E * (2 * a)^3} = 4.0 * 10^{-4}$$

$$K_L = 4.0 * 10^{-4} (199000 \text{ N/mm}^2) * (2 * 162 \text{ mm})^3$$

$$K_L = 2.7 * 10^9 \text{ N - mm/rad.}$$

- **Coeficiente de rigidez para el momento circunferencial (P.2c)**

$$\frac{K_C}{E * (2 * a)^3} = 8.3 * 10^{-3}$$

$$K_C = 8.3 * 10^{-3} (199000 \text{ N/mm}^2) * (2 * 162)^3$$

$$K_C = 5.6 * 10^{10} \text{ mm/rad.}$$

- **Cálculo de la desviación y rotación libre en la envolvente en el eje de la boquilla resultado de la carga hidrostática del tanque lleno.**

$$\beta = \frac{1.285}{(R * t)^{0.5}} = \frac{1.285}{(23000 * 17)^{0.5}} = 0.00205$$

$$\beta * L = 0.00205 * 449 = 0.92 \text{ rad.}$$

$$W = \frac{(9.8 * 10^{-6}) * (0.87) * (12000) * (23000)^2}{199000 * 17} * \left[ 1 - e^{-0.92} * \cos(0.92) - \frac{449}{12000} \right] + (12 * 10^{-6}) * (23000) * (65)$$



$$W = 10.87 \text{ mm.}$$

$$\theta = \frac{(9.8 * 10^{-6}) * (0.87) * (12000) * (23000)^2}{199000 * 17} * \left[ \frac{1}{12000} - 0.00205 * e^{-0.92} * (\cos(0.92) + \sin(0.92)) \right]$$

$$\theta = -0.00073 \text{ rad.}$$

- **Realizar el análisis de flexibilidad de la tubería usando W,  $\theta$ ,  $K_R$ ,  $K_L$  como la condición de extremo en la conexión de la boquilla a la tubería.**

$$X_A = 611 \text{ mm.}$$

$$X_B = 287 \text{ mm.}$$

$$X_C = 449 \text{ mm.}$$

- **Determine las cantidades no dimensionales.**

$$\frac{X_A}{(R * t)^{0.5}} = \frac{611}{(23000 * 17)^{0.5}} = 0.97$$

$$\frac{X_B}{(R * t)^{0.5}} = \frac{287}{(23000 * 17)^{0.5}} = 0.45$$

$$\frac{X_C}{(R * t)^{0.5}} = \frac{449}{(23000 * 17)^{0.5}} = 0.71$$

$$\lambda = \frac{a}{(R * t)^{0.5}} = \frac{162}{(23000 * 17)^{0.5}} = 0.25$$

$$Y_F = 1.8/N.$$

$$Y_L = 8.0/N\text{-mm.}$$

$$Y_C = 18.0/\text{N}\cdot\text{mm}.$$

- **Construir los nomogramas de carga.**

$$1.0 - 0.75 \left( \frac{X_B}{(R * t)^{0.5}} \right) = 1.0 - 0.75 \left( \frac{287}{(23000 * 17)^{0.5}} \right) = 0.67$$

$$1.0 - 0.75 \left( \frac{X_A}{(R * t)^{0.5}} \right) = 1.0 - 0.75 \left( \frac{611}{(23000 * 17)^{0.5}} \right) = 0.28$$

$$1.0 - 0.75 \left( \frac{X_C}{(R * t)^{0.5}} \right) = 1.0 - 0.75 \left( \frac{449}{(23000 * 17)^{0.5}} \right) = 0.47$$

- **Determinación de la carga permisible.**

$$F_P = P * \pi * a^2$$

$$F_P = (\rho * g * h) * \pi * a^2$$

28

$$F_P = (0.87 * 9800 * 12.0 - 0.449) * 3.14 * (0.162)^2$$

$$F_P = 1298.80 \text{ N}.$$

$$\frac{\lambda}{2Y_F} \left( \frac{F_R}{F_P} \right) = \frac{0.25}{2(1.8)} \left( \frac{F_R}{1298.80} \right) = 5.34 * 10^{-5} F_R$$

$$\frac{\lambda}{aY_L} \left( \frac{M_L}{F_P} \right) = \frac{0.25}{(162)(8.0)} \left( \frac{M_L}{1298.80} \right) = 1.48 * 10^{-7} M_L$$

$$\frac{\lambda}{aY_C} \left( \frac{M_C}{F_P} \right) = \frac{0.25}{(162)(18.0)} \left( \frac{M_C}{1298.80} \right) = 6.6 * 10^{-8} M_C$$



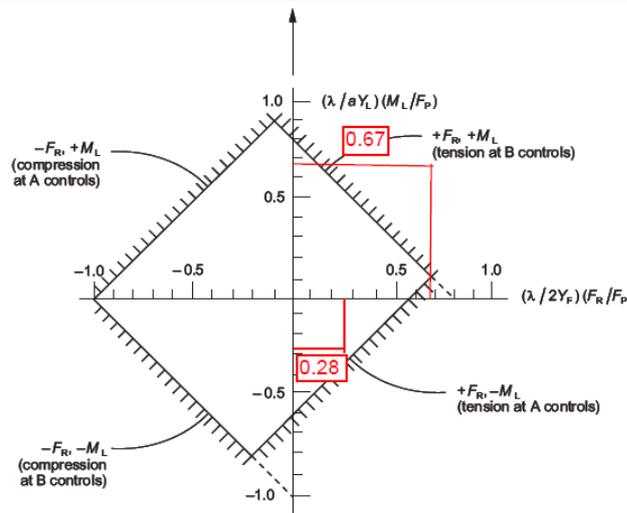


Figure P.5a—Determination of Allowable Loads from Nomogram:  $F_R$  and  $M_L$

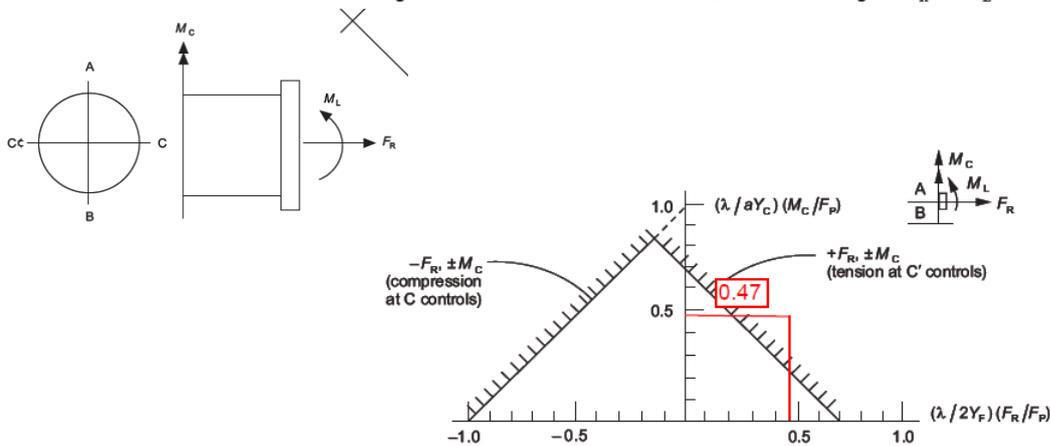


Figure P.5b—Determination of Allowable Loads from Nomogram:  $F_R$  and  $M_C$

### Figura 3-11. Gráfica del Comportamiento de la boquilla de succión

- Determine la carga de la tubería limitada.

Para  $M_L = 0$  y  $M_C = 0$

$$\text{Para } F_R = \frac{\lambda}{2Y_F} \left( \frac{F_R}{F_P} \right) = 5.34 * 10^{-5} F_R \leq 0.28$$

Por tanto:

$$F_{R\text{máx.}} = \frac{0.28}{5.34 * 10^{-5}} = 5243.44 \text{ N (A)}$$

Para  $M_L = 0$  y  $F_R = 0$



$$\text{Para } M_C = \frac{\lambda}{aY_C} \left( \frac{M_C}{F_P} \right) = 6.6 * 10^{-8} M_C \leq 0.47$$

Por tanto:

$$M_{C\text{máx}} = \frac{0.47}{6.6 * 10^{-8}} = 7.12 * 10^6 \text{ N} - \text{mm (C)}$$

Para  $F_R = 0$  y  $M_C = 0$

$$\text{Para } M_L = \frac{\lambda}{aY_L} \left( \frac{M_L}{F_P} \right) = 1.48 * 10^{-7} M_L \leq 0.28$$

Por tanto:

$$M_L = \frac{0.28}{1.4 * 10^{-7}} = 2.0 * 10^6 \text{ N} - \text{mm (A)}$$

### 3.9 Cálculo del fondo del tanque.

#### 3.9.1 Espesor adoptado.

$$t_{\text{adoptado}} = t_{\text{mín}} + CA$$

$$t_{\text{adoptado}} = 6 + 3 = 9 \text{ mm.}$$

El espesor de las placas del fondo será **9 mm**.

#### Aplicación del anexo V.

La base del tanque será evaluada para una presión externa si es aplicable alguna de las siguientes condiciones.

La condición que hay que cumplir para evitar el levantamiento del fondo del tanque es:

$$P_{\text{tot}} = P_f + P_p \geq |P_e|$$

$$P_f = \rho_{\text{acero}} * t_f * g$$

$$P_f = 7850 * \frac{8}{1000} * \frac{9.81}{1000} = 0.616 \text{ kPa.}$$



$$P_p = \rho_{\text{producto}} * H_{cl} * g$$

$$P_p = \frac{870 * 0.3 * 9.81}{1000} 2.560 \text{ kPa.}$$

$$P_{\text{tot}} = 0.616 \text{ kPa} + 2.560 \text{ kPa} = 3.17 \text{ kPa.}$$

$$3.17 \text{ kPa} \geq 0.25 \text{ kPa.}$$

Se cumple la condición para que no haya levantamiento del fondo. El espesor de la placa establecido es válido para el diseño.

### 3.9.2 Cálculo del ancho de la placa anular.

$$L = 2 * t_b \sqrt{\frac{F_y}{2 * \gamma * G * H}} \geq 600 \text{ mm.}$$

$$L = 2 * 10 * \sqrt{\frac{275}{2 * 0.00981 * 0.87 * 12}} = 734.2 \text{ mm}$$

$$735 \text{ mm} \geq 600 \text{ mm.}$$

Se cumple la condición.

Vuelo mínimo: 50 mm.

$$A_{\text{placa}} = L + t_s + \text{vuelo mínimo.}$$

$$A_{\text{placa}} = 714 + 17 + 50 = 781 \text{ mm} \approx 780 \text{ mm.}$$



**Cálculo del espesor de la placa anular.**

$$\sigma_d = \frac{4.9 * D * (H - 0.3) * G}{t_{dn} \left( 1 - \frac{CA}{t_d} \right)}$$

$$\sigma_d = \frac{4.9 * 46 * (12 - 0.3) * 0.87}{17 \left( 1 - \frac{3}{16.26} \right)} = 165.39 \text{ MPa.}$$

$$\sigma_t = \frac{4.9 * D * (H - 0.3)}{t_{dn}}$$

$$\sigma_t = \frac{4.9 * 46 * (12 - 3)}{17} = 155.12 \text{ MPa.}$$

De acuerdo a la tabla 5.1a de la API 650/13, de acuerdo al valor de tensión  $\sigma_d = 165.39 \text{ MPa}$ , el espesor es 6 mm. Ajustando el espesor de la placa anular se toma **10 mm**.

**Cálculo del área del fondo del tanque.**

$$A_f = \frac{\pi * D^2}{4}$$

$$A_f = \frac{3.14 * (46)^2}{4} = 1661.06 \text{ m}^2$$

**Cálculo del área de las placas que conforman el fondo.**

$$A_p = b * h$$

$$A_p = 12.0 \text{ m} * 2.4 \text{ m} = 28.8 \text{ m}^2$$



### Cálculo del número de placas del fondo.

$$N_{OPL} = \frac{A_{fondo}}{A_{PL}}$$

$$N_{OPL} = \frac{1661.06}{28.8} = 57.67$$

Serán utilizadas en diseño del fondo alrededor de **58 placas**.

### 3.10 Cálculo del techo del tanque.

#### Perfiles IPE utilizados.

Perfil IPE.	A, cm <sup>2</sup>	H, cm	B, cm	t <sub>alas</sub> , cm	t <sub>alma</sub> , cm	W <sub>elast,y</sub> , cm <sup>3</sup>	W <sub>plast,y</sub> , cm <sup>3</sup>
330	62.6	33	16	1.15	0.75	713	804

Perfil IPE.	i <sub>y</sub> , mm	i <sub>z</sub> , mm	I <sub>y</sub> , cm <sup>4</sup>	G, Kg/m
330	138	35.5	11770	49.1

#### Perfiles L utilizados.

Perfil	A, mm <sup>2</sup>	H, mm	B, mm	t, mm	G, Kg/m	i <sub>y</sub> , mm
100x100x7	1370	100	100	7.0	10.7	30.60

#### 3.10.1 Dimensionamiento del techo fijo con estructura rigidizadora.

El tipo de acero empleado para los elementos de cubierta es EN 275 J0.



Las tensiones básicas de cálculo, de diseño y de prueba hidrostática respectivamente, para el acero empleado son:

$$S_{dr} = \min\left(\frac{2}{3}\right) * 275, \left(\frac{2}{5}\right) * 430$$

$$S_{dr} = \min(181.5, 172)$$

$$S_{dr} = 172 \text{ MPa}$$

$$S_{tr} = \min\left(\frac{3}{4}\right) * 275, \left(\frac{3}{7}\right) * 430$$

$$S_{tr} = \min(206.25, 180.6)$$

$$S_{tr} = 180 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{adm} = \min(180, 172) = 172 \text{ MPa.}$$

Antes de realizar el dimensionamiento de la estructura se calculan los parámetros relacionados con la geometría del techo esférico.

$$R_c = 1.2 * 46.0 = 55.2 \text{ m.}$$

$$\theta = \arcsen\left(\frac{23.0}{55.2}\right) = 24.62^\circ$$

$$H_{roof} = 55.2 * (1 - \cos(24.62)) = 5.020 \text{ m}$$

El espesor mínimo de la placa del techo.

$$t_{r,\min} = 5 \text{ mm}$$

El espesor adoptado para la placa de cubierta incluyendo el sobreespesor de corrosión es de 6 mm.

Se obtiene la longitud en verdadera magnitud del arco rigidizador que se empleará para calcular la carga debido al peso de la estructura.

$$A_{casq} = 2 * \pi * 55.2 * 5.020 = 1740.21 \text{ m}^2$$



$$A_h = \frac{\pi * (46.0)^2}{4} = 1661.06 \text{ m}^2$$

$$L_{\text{vigas}} = \frac{2 * \pi * (24.62 - 2.38) * 55.2}{360} = 21.41 \text{ m}$$

**Tabulación de los valores de IPE 400.**

<b>IPE 330</b>			
<b>Cálculos</b>			
Qc [kN]	90.34	gR [kPa]	0.100
gH [kPa]	0.476	P <sub>1</sub> [kPa]	1.676
P <sub>2</sub> [kPa]	0.376	P [kPa]	1.676
P <sub>v,Ed</sub> [kPa]	1.766	β	0.2618
P <sub>Ed</sub> [kN]	134.335	N <sub>Ed</sub> [kN]	293.282
M <sub>máx</sub> [mkN]	76.573	ε	0.1251
M <sub>Ed</sub> [mkN]	126.125	M <sub>s</sub> [mkN]	87.520
I <sub>y, min</sub> [cm <sup>4</sup> ]	4089.45	σ <sub>máx</sub> [MPa]	169.60
σ <sub>adm</sub> [MPa]	172		

$$I_{y,\text{mín},\text{rig}} = 4089.45 \text{ cm}^4 \leq I_{y,\text{rig}} = 11770 \text{ cm}^4$$

$$\sigma_{\text{máx}} = 169.60 \text{ MPa} \leq \sigma_{\text{adm}} = 172 \text{ MPa}$$

$$n_{\text{vigas}} = 12 \text{ vigas} \leq N_{\text{rig,máx}} = \frac{\pi * (0.1 * 46.0)}{2 * \frac{16}{100}} = 45.13 \text{ vigas}$$



$$\text{Separación} = \frac{2 * \pi * \left(\frac{46}{2}\right)}{45} \leq 3.25$$

$$\text{Separación} = 3.20 \leq 3.25$$

### 3.10.2 Comprobación de pandeo del rigidizador.

La longitud de pandeo para la comprobación sobre el eje “y” se tomará igual a la longitud de la viga, sin tener en cuenta la posible restricción al pandeo de la chapa de cubierta.

$$L_y = 23 - 0.1 * 23 = 20.7 \text{ m.}$$

La longitud de pandeo para la comprobación sobre el eje “z” se toma como la distancia entre los anillos de arriostramiento entre rigidizadores del techo.

$$L_z = \frac{20.7}{5+1} = 3.45 \text{ m.}$$

El perfil adoptado para los rigidizadores de cubierta según las restricciones del apartado anterior ha resultado ser el IPE 330.

$$N_{Ed} = 293.282 \text{ kN.}$$

$$M_{Ed} = 126.125 \text{ mkN.}$$

$$M_s = 87.520 \text{ mkN.}$$

Aplicando las ecuaciones 5-43 a 5-47 se obtienen los coeficientes de pandeo para ambos ejes. El coeficiente  $\beta$  se toma igual a 1 (empotrado-desplazamiento vertical permitido).

$$\lambda_y = \frac{0.7 * 20700}{138} = 105$$



$$\lambda_z = \frac{0.7 * 3450}{35.5} = 68.02$$

$$\lambda_{ref} = \pi * \sqrt{\frac{210000}{275}} = 86.75$$

$$\lambda_{red,y} = \frac{105}{86.75} = 1.2$$

$$\lambda_{red,z} = \frac{68.02}{86.77} = 0.78$$

$$\phi_y = 0.5 * (1 + 0.21 * (1.0 - 0.2) + (1.0)^2) = 1.08$$

$$\phi_z = 0.5 * (1 + 0.21 * (0.78 - 0.2) + (0.78)^2) = 0.86$$

$$\chi_y = \frac{1}{1.08 + \sqrt{(1.08)^2 - (1.0)^2}} = 0.67$$

$$\chi_z = \frac{1}{0.86 + \sqrt{(0.86)^2 - (0.78)^2}} = 0.81$$

El siguiente paso es clasificar la sección del perfil IPE 330 para calcular la resistencia y momento de cálculo de la sección.

Suponer agotamiento plástico en las alas del perfil.

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{F_{yr}}} = \sqrt{\frac{235}{275}} = 0.92$$

$$\frac{c}{t} = \frac{B - t_{alma}}{2 * t_{alas}} = \frac{160 - 7.5}{2 * 11.5} = 6.63$$

$$6.63 < 9 * 0.92 = 8.28 \rightarrow \text{clase 1.}$$



Suponer agotamiento plástico en alma del perfil.

$$\alpha = \frac{1}{2} + \frac{293282}{2 * 307 * 7.5 * 275} = 0.73$$

$$0.73 \geq 0.5$$

$$\frac{c}{t} = \frac{d}{t_{\text{alma}}} = \frac{H - 2 * t_{\text{alas}}}{t_{\text{alma}}} = \frac{330 - 2 * 11.5}{7.5} = 40.93$$

$$40.93 < \frac{396 * \epsilon}{13 * \alpha - 1} = \frac{396 * 0.92}{13 * 0.73 - 1} = 42.91$$

Por tanto, de acuerdo la tabla 5.2 de la EN 1993-1-1: 2005, la clase de la sección del IPE 330 es 1.

La resistencia y momento de cálculo dependen del límite elástico del acero, del área del perfil y del módulo resistente plástico al tratarse de clase 1.

$$N_{rk} = 6260 * \frac{275}{1000} = 1721.5 \text{ kN.}$$

$$M_{y,rk} = 804 * \frac{275}{1000} = 221.1 \text{ mkN.}$$

Los coeficientes de interacción se obtienen mediante el coeficiente de momento equivalente, la resistencia y el momento de cálculo del perfil.

$$\alpha_s = \frac{M_s}{M_{Ed}} = \frac{-87.520}{126.125} = -0.69$$

$$C_{my} = 0.1 - 0.8 * (-0.69) = 0.65 \geq 0.4 \rightarrow \text{cumple.}$$



$$K_{yy} = 0.65 * \left( 1 + (1.0 - 0.2) * \left( \frac{293.282}{0.67 * \frac{1721.5}{1.10}} \right) \right) = 0.795$$

$$K_{yy} = 0.795 \leq 0.65 * \left( 1 + 0.8 * \frac{235.603}{0.67 * \frac{1721.5}{1.10}} \right) = 0.795 \rightarrow \text{cumple.}$$

$$K_{zy} = 0.6 * 0.795 = 0.47$$

Comprobación de pandeo por flexocompresión se obtiene:

$$\frac{293.282}{0.67 * \frac{1721.5}{1.10}} + 0.795 * \frac{126.125}{\frac{221.1}{1.10}} = 0.76 \leq 1$$

$$\frac{293.282}{0.81 * \frac{1721.5}{1.10}} + 0.470 * \frac{126.125}{\frac{221.1}{1.10}} = 0.52 \leq 1$$

### 3.10.3 Dimensionamiento de los anillos circunferenciales de arriostramiento entre rigidizadores.

En este caso tenemos un diámetro del tanque de 46 m por tanto es necesario disponer de 4 anillos de arriostramiento en el techo.

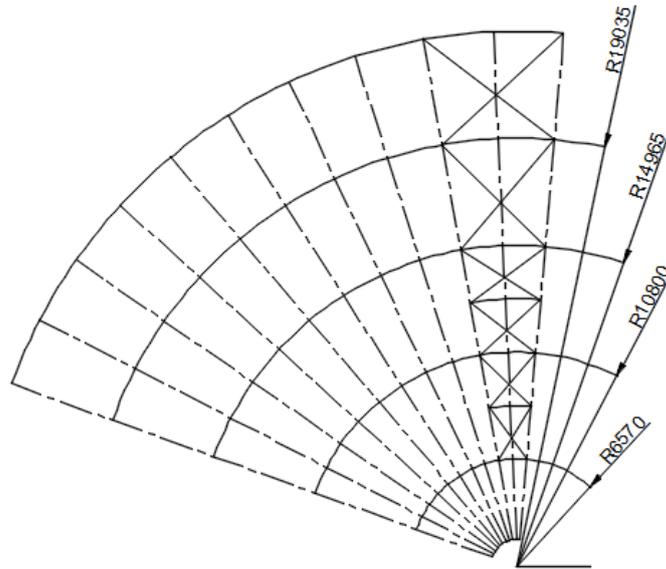
El cálculo de los perfiles L necesarios se realiza en función de los efectos de las imperfecciones geométricas equivalentes y en el criterio de pandeo, ya que dichos elementos trabajan a compresión.

$$K_m = \sqrt{0.5 * \left( 1 + \frac{1}{11.25} \right)} = 0.737$$



$$m = \frac{45}{4} = 11.25$$

$$e_{0, \text{arr}} = 0.737 * \frac{21.41}{500} = 0.0315 \text{ m.}$$



**Figura 3-12.** Disposición de anillos circunferenciales de arriostramiento.

### 3.11 Dimensionamiento del anillo circunferenciales de la unión envolvente-techo.

Según el inciso (e) del epígrafe 5.1.5.9 de la API 650/13, el perfil mínimo del anillo circunferencial en la unión envolvente-techo depende del diámetro del tanque. En este caso tenemos un diámetro de 46.0 m, por tanto, el perfil mínimo será L75x75x10.

El dimensionamiento se basa en calcular las áreas de participación del techo y la envolvente del tanque que influyen en el estado tensional del anillo. Para ello se calcula el área necesaria que tiene que cumplir dicho perfil para cumplir el criterio de plastificación.



El área de participación del techo.

$$W_r = 0.6 * \sqrt{55.20 * 1000 * (5 - 1)} = 281.93 \text{ mm.}$$

$$A_{p,1} = 281.93 * (5 - 1) = 1127.72 \text{ mm}^2$$

El área de participación en la envolvente.

$$W_c = 0.6 * \sqrt{\frac{46}{2} * 1000 * (8 - 3)} = 203.46 \text{ mm.}$$

$$A_{p,2} = 203,46 * (8 - 3) = 1017.3 \text{ mm}^2$$

La fuerza en el anillo es:

$$N_{Ed,c} = \frac{1.783 * \left(\frac{46}{2}\right)^2}{2 * \tan(24.58 - 2.34)} = 648.28 \text{ kN.}$$

El área de sección transversal necesaria del anillo de refuerzo superior es:

$$A_{nec} = \frac{648.28 * 1000}{\frac{2}{3} * 250} = 3889.83 \text{ mm}^2$$

Por tanto, el área final requerida para el perfil será:

$$F_{req} = 3889.83 - 1127.72 - 1017.3 = 1744.81 \text{ mm}^2$$

El perfil L75x75x10 no cumple con el área requerida. El perfil adoptado es L110x110x10 con un área de 2120 mm<sup>2</sup>.

La tensión real máxima a la que está sometido el anillo de compresión es:



$$\sigma_{\text{máx,c}} = \frac{648.28 * 1000}{(1127.72 + 1017 + 2120)} = 155.99 \text{ MPa.}$$

$$\sigma_{\text{máx,c}} = 155.99 \text{ MPa} \leq \sigma_{\text{adm}} = \frac{2}{3} * 250 = 166.66 \text{ MPa}$$

El perfil adoptado es admisible.

$$\text{Separación} = \frac{2 * \pi * 23}{48} = 3.00 \text{ m.}$$

Como la separación entre rigidizadores adyacentes en el punto de conexión con el envolvente del tanque no excede de 3.25 m, la comprobación de estabilidad no es obligatoria, así como los momentos de flexión en el anillo.

#### **Cálculo de la máxima de presión interna de diseño.**

$$P = \frac{4050.89 * 250 * \tan(24.62)}{200 * (46)^2} + \frac{0.00127 * 1340000}{(46)^2} = 1.89 \text{ kPa.}$$

#### **Cálculo del área de compresión requerida de la unión techo a la envolvente.**

$$A = \frac{200 * (46)^2 * \left(1.9 - \frac{0.00127 * 1340000}{(46)^2}\right)}{250 * \tan(24.62)} = 4050.89 \text{ mm}^2$$

#### **Cálculo de la máxima área del techo frágil.**

$$A = \frac{1526920}{2 * \pi * 250 * 0.458} = 2123,49 \text{ mm}^2$$

#### **Cálculo de la presión de falla.**

$$P_f = 1.6 * (1.9) - \frac{0.000746 * 1340000}{(46)^2} = 2.56 \text{ kPa.}$$



### 3.12 Verificación del efecto del viento.

Para comprobar la estabilidad al vuelco del tanque lo primero es calcular las presiones dinámicas de la envolvente y la cubierta, respectivamente, en función de la velocidad del viento en la zona de emplazamiento del tanque, y las áreas proyectadas que se emplearán para calcular los momentos de vuelco. Aplicando las ecuaciones 6-1 a 6-4:

$$p_{\text{din,envolvente}} = 0.86 * \left(\frac{250}{190}\right)^2 = 1.48 \text{ kPa}$$

$$A_{\text{w,envolente}} = 46.0 * 12.0 = 552 \text{ m}^2$$

$$p_{\text{din,techo}} = 1.44 * \left(\frac{250}{190}\right)^2 = 2.45 \text{ kPa}$$

$$A_{\text{w}} = \frac{\pi * (46.0)^2}{4} = 1661.06 \text{ m}^2$$

El momento de vuelco alrededor de la unión envolvente-fondo según las ecuaciones 6-6 a 6-8 es:

$$M_{\text{v,envolvente}} = 1.48 * 1000 * 552 * \frac{12}{2} = 4901760.0 \text{ mN}$$

$$M_{\text{techo}} = 2.45 * 1000 * 1661.06 * \frac{46}{2} = 93600731.0 \text{ mN}$$

$$M_{\text{w}} = 4901760.0 + 93600731.0 = 98502491.0 \text{ mN}$$

El momento alrededor de la unión envolvente-fondo debido a la presión de diseño interna es:

$$M_{\text{pi}} = 2 * 1000 * \frac{46}{2} * \frac{\pi * (46)^2}{4} = 76408760 \text{ mN}$$



Los valores de los pesos necesarios para el cálculo de los momentos se obtienen de la resolución del ejemplo definido en el anexo pesos.

El momento alrededor de la unión envolvente-fondo debido al peso nominal de la envolvente y la estructura soporte del techo soportada por la envolvente que no está unida a la placa de cubierta es:

$$M_{dl} = 161570.15 * 9.81 * \frac{46}{2} = 36455072.94 \text{ mN}$$

El momento alrededor de la unión de la envolvente-fondo debido al peso del líquido es:

$$M_f = 83496.43 * \frac{46}{2} = 1920417.89 \text{ mN}$$

El momento alrededor de la unión envolvente-fondo debido al peso de la placa de cubierta es:

$$M_{DLR} = 104314.56 * 9.81 * \frac{46}{2} = 23512501.82 \text{ mN}$$

Las comprobaciones a realizar para comprobar si es necesario anclar el tanque debido al viento, según las ecuaciones 6-13 y 6-14 son las siguientes:

$$135510254.6 < 47815883.78$$

$$174911251 < 21539247.24$$

$$76435256 < 47815883.78$$

No se cumple ninguna de las comprobaciones, por tanto, es necesario anclar el tanque debido al efecto del viento.

### 3.13 Cálculo del peso del Tanque.

#### 1) Peso de los anillos que componen la envolvente del tanque.

$$W_1 = 7850 * \pi * 46.0 * \frac{(17.0 + 14.0 + 10.0 + 8.0 + 8.0)}{1000} * 2.4 = 155111.22 \text{ Kg.}$$

#### 2) Peso de la placa de fondo del tanque.



$$W_2 = 7850 * 1661.06 * 0.008 = 104314.568 \text{ Kg.}$$

**3) Peso del anillo anular del fondo.**

$$W_3 = 7850.0 * \pi * 46.0 * \frac{767.14}{1000} * \frac{10}{1000} = 8696.66 \text{ Kg.}$$

**4) Peso de la placa del techo.**

$$W_4 = 7850 * 1661.06 * \frac{6}{1000} = 78235.92 \text{ Kg.}$$

**5) Peso de la estructura rigidizadora del techo.**

$$W_5 = 48 * 40.27 * 21.41 = 41384.67 \text{ Kg.}$$

**6) Peso del anillo circunferencial de compresión de la unión envolvente-techo.**

$$W_{\text{anillo}} = 3.14 * 46 * 16.48 = 2380.37 \text{ Kg.}$$

**7) Peso del soporte central del techo.**

$$W_{\text{sc}} = 7850 * \frac{[(2 * 166.10) + (30 * 2.5)]}{10000} * 0.1 * 3.14 * 46 = 4617.05 \text{ Kg.}$$

**8) Peso de los anillos circunferenciales de arriostramiento entre rigidizadores del techo.**

$$W_{\text{arr}} = 22.62 * 14.91 * 4 = 1349.05 \text{ Kg.}$$

**9) El valor de DL del tanque es:**

$$D_L = W_1 + W_2 + W_3 + W_4 + W_5 + W_{\text{anillo}} + W_{\text{arr}} + W_{\text{sc}}$$

$$D_L = 155111.22 + 104314.56 + 8696.66 + 78235.92 + 41384.67 + 2380.37 \\ + 4617.05 + 1349.05 = 396089.5 \text{ Kg.}$$



**10)Peso del líquido para la verificación del efecto del viento, según API 650.**

El peso del líquido, ( $w_L$ ), es el peso de una banda de líquido sobre el cuerpo usando una gravedad específica de 0.7 y una altura de 1/2 la altura del nivel de diseño del líquido, (H). ( $w_L$ ) será el menor de  $70.4 \cdot H \cdot D$  o lo siguiente:

$$w_L = 70 * 8 * \sqrt{250 * 0.87 * 12} = 28604.8 \text{ N/m.}$$

$$w_w = 28604.8 * 3.14 * 46 = 4131677.31 \text{ N.}$$

**11)Peso total del cuerpo del tanque más accesorios**

$$W_s = 155111.22 \text{ Kg.}$$

**12)Peso Total del techo fijo.**

$$W_{acc} = 2380.37 + 4617.05 + 1349.05 = 8346.47 \text{ Kg.}$$

**13)Peso total del fondo.**

$$W_f = 104314.568 + 8696.66 = 113011.22 \text{ Kg.}$$

**14)Peso efectivo del contenido del tanque con densidad del producto.**

$$W_p = 0.87 * 12 * 3.14 * \left(\frac{46}{2}\right)^2 = 17341.46 \text{ Kg.}$$

**15)Peso del cuerpo del tanque más la estructura rigidizadora del techo que absorbe la envolvente del tanque.**

$$W_{s_r} = 155111.22 + 41384.67 + 8346.47 = 204842.34 \text{ Kg.}$$

- **Conclusiones parciales.**



1. La metodología fue aplicada a un tanque de capacidad 20 000 m<sup>3</sup> para el almacenamiento de diésel especial perteneciente a la Refinería Cienfuegos SA, donde se llegó a los resultados esperados desde el punto de vista de los cálculos analíticos, que el tanque opera de forma segura.



## CONCLUSIONES.

La metodología para el diseño y evaluación de tanques atmosféricos cumplió con las normas internacionales API 650/13, EN 1993-1-1/05 y EN 1993-4-2/07, permitiendo establecer un sistema de cálculo para el diseño de los componentes estructurales del tanque siendo el fondo, la envolvente y el techo.

Se realizó la comprobación de los cálculos analíticos aplicando el Software de diseño Intergraph Tank 2016, resultando que el valor de espesor del primer anillo de la envolvente siendo el más crítico, tanto por el cálculo analítico como por la corrida del software fue de 17.0 mm, que es el normalizado para el diseño.

El valor de velocidad de viento de diseño que es utilizado en el Software Intergraph Tank 2016 es 190 Km/h, por solicitud de la Refinería se usó el valor de 250 Km/h para el análisis de la estabilidad al viento. Originando este último usar el diseño 145 pernos de anclaje y dos anillos intermedios de rigidez. De usarse 190 Km/h fuesen 48 pernos de anclaje y un solo anillo intermedio de rigidez.

Se realizó el análisis estructural del tanque aplicando el Software SAP 2000 V14, donde se modeló la envolvente del tanque bajo carga hidrostática. Los resultados obtenidos fueron favorables ya que los espesores de cada anillo de la envolvente del tanque son los adecuados.



## RECOMENDACIONES.

Que la metodología establecida sea un documento de consulta para el diseño y la evaluación de tanques de almacenamiento atmosférico a las empresas que presenten estos equipos.

En conjunto la Universidad de Cienfuegos y la Refinería Cienfuegos SA se debería preparar un curso especializado en cuanto a todo el desarrollo de la ingeniería de tanques atmosféricos, para mejorar la capacidad en cuanto al diseño de equipos estáticos de los estudiantes de ingeniería mecánica.

En la preparación académica de los estudiantes lograr que se familiaricen con el manejo de los códigos de diseño de tanques atmosféricos ya sea API 650 como las normas europeas.



## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

- Normas EN (2005). *Design of Steel Structures- Part 1-1: General rules and rules for buildings*. United Kingdom.
- Alberto, J. A. (2012). *Diseño de un Tanque de almacenamiento Atmosférico de 20000 BIs de capacidad*. Coatzacoalcos, veracruz.
- Aldaz, E. E. (20014). *Proceso para la Fabricación y Montaje de Tanques Hidrostáticos para Almacenamiento de Combustible*. Quito, Ecuador.
- API Standard, 6. (2013). *Welded Tanks for Oil Storage*. Washington, EUA.: API Publishing Services.
- Arce, C. J. (2015). *Diseño Automático de Tanques de Acero con Techo Fijo*. Sevilla, España.
- Normas BS., (1989). *Manufacture of vertical steel welded non-refrigerated storage tanks with butt-welded shells for the petroleum industry*. United Kingdom: Board of BSI.
- Burckhardt, P. A. (2011). *Diseño de un Tanque de Acero Soldado Apoyado sobre el Suelo para Almacenamiento de Hidrocarburos*. Lima, Perú.
- Cengel, Y. (2004). *Fluid Mechanics*. SAN FRANCISCO, EUA.: MacGraw-Hill.
- Normas EN, (2004). *Specification for the Design and Manufacture of Site Suilt, Sertical Sylindrical, Slat-bottemed, Aboveground, Welded, Stell Tanks for the Storage of Liquids at Ambient Temperature and Above*. Netherland.: Danish Standards Association.
- Normas EN, (2007). *Design of Steel Structures- part 4-2: Tanks*. United Kingdom.
- Garner, B. L. (2003). *Guide to Storage and Equipment*. United Kingdom.: Professional engineering publishing.
- Hernández, I. E. (2009). *Manual de Aplicación del Programa Sap 2000*. España.
- Intergraph. (2013, December). *TANK User´s Guide*. Huntsville, Alabama, EUA.
- Jiménez, C. A. (2012). *Diseño de un Tanque de Almacenamiento Atmosférico de 20000 BLS de Capacidad*. México.
- Myers, P. (1997). *Aboveground Storage Tanks*. New York, EUA: Mc-Graw-Hill.



Pasos, M. O. (2014). *Desarrollo del Procedimiento para el Montaje Estructural y Mecánica de un Tanque de Almacenamiento Tipo Techo Fijo Cónico con Mástil Central de 11000 Barriles Bajo la Norma API 650*. Quito, Ecuador.

Pazmiño, E. J. (2009). *Diseño y Cosntrucción de un Tanque para Almacenar 2000 Toneladas de aceite de Palma basado en la Norma API 650*. Quito.

Sánchez, J. M. (2015). *Diseño de una Hoja de Excel para un Tanque de almacenamiento de Gasoleo de Automoción*. México.



## ANEXOS.

### **ANEXO-1: COMPROBACIÓN DE LOS CÁLCULOS ANALÍTICOS DEL DISEÑO APLICANDO EL SOFTWARE INTERGRAPH TANK 2016 V.8.0** (Intergraph, 2013).

En la actualidad el uso de software de diseño se hace indispensable en el campo de la ingeniería de diseño debido a que, garantizar rapidez y optimización en el diseño, disminuyen los rangos de errores en los resultados obtenidos.

TANK es una herramienta para el diseño y análisis de grandes tanques de almacenamiento, usando los códigos de diseño API 650 y API 620. TANK incorpora diálogos interactivos para la entrada de usuario, validación de entrada para evitar errores en el período de la corrida, y diagnóstico extensivo para asistir en resolución de un problema.

TANK incorpora las mayores consideraciones de diseño de la Sección 5.0 de la API 650 y de varios anexos. Estos incluyen:

- El cálculo de los espesores de los anillos y la altura del fluido se establece de acuerdo al método 1-Pie y el método de punto variable de diseño.
- El cálculo de la viga de viento para la parte superior del tanque y hasta 5 vigas intermedias.
- Reporte de la temperatura mínima del metal.
- El cálculo de los espesores de los anillos y la altura del fluido se establece de acuerdo al Anexo A.
- El cálculo sísmico de acuerdo al Anexo E.
- Las consideraciones de la presión interna de acuerdo al Anexo F.
- La modificación de materiales debido a la temperatura de acuerdo al Anexo M.
- El cálculo de ciclo de vida de acuerdo al Anexo M.

#### 1) **Tabulador de los datos del tanque.**



El tabulador de los datos del tanque especifica las características generales del tanque. Para cada celda entrada, un comentario descriptivo define la entrada esperada. Donde es aplicable, las unidades esperadas se visualizan a la derecha de la celda de entrada. En la figura 1 se muestra la pantalla del tabulador de la entrada de datos del tanque.

### **Datos del tanque.**

Código de diseño: API 650.

Método de diseño: Método 1-Pie.

Objetivo de la corrida: Diseño.

Temperatura de diseño: 93 °C.

Diámetro nominal del tanque: 46.0 m.

Altura de la envolvente del tanque: 12.0 m.

Nivel de líquido por diseño: 11.285 m.

Espesor de la placa del fondo: 8.0 mm.

Gravedad específica del producto almacenar: 0.87.

Eficiencia de la junta: 1.0.

Velocidad de viento: 69.44 m/s.

Factor de combinación de presión interna: 0.4.

Material de los anillos de la envolvente del tanque: S355 J0.

Número de anillos: 5.

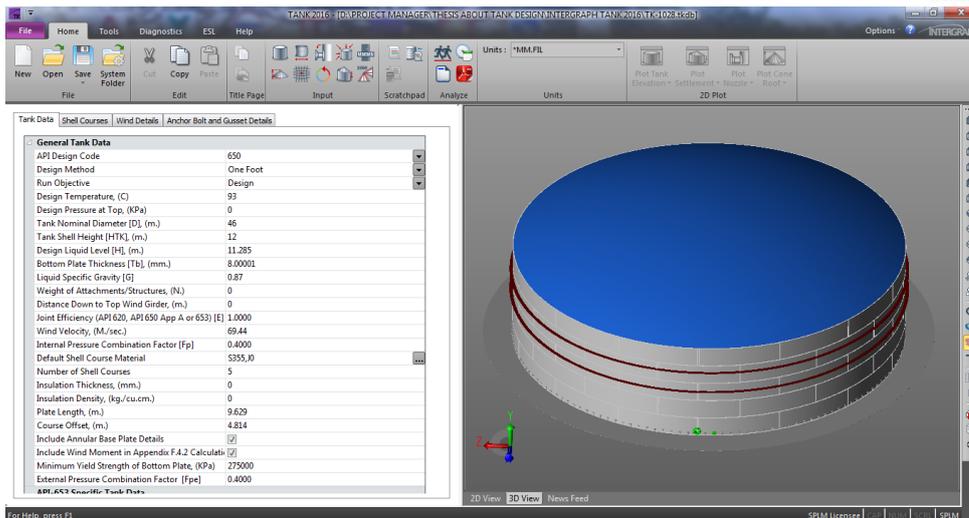
Longitud de la placa del anillo: 9.629 m.

Desfase de los anillos entre las costuras verticales: 4.814 m.

Esfuerzo de fluencia mínimo de la placa del fondo: 275000 kPa.

Factor de combinación de presión externa: 0.4.





**Figura 1.** Tabulador de entrada de los datos del tanque.

## 2) Tabulador de los Anillos de la Envoltante.

El material y sus propiedades en el tabulador de los anillos son usados como valor por defecto para todos los anillos. Se puede usar la opción en este tabulador para cambiar el material, si es necesario, sobre la base de anillo por anillo. El tabulador de los anillos visualiza una cuadrícula donde la altura, espesor, corrosión permisible, nombre del material, tensión de diseño del material, y la tensión de prueba del material pueden ser especificado para cada anillo mostrado en la figura 2.

### Datos de los anillos.

Altura de los anillos: 2.4 m.

Espesor de entrada por el usuario: 20.0 mm.

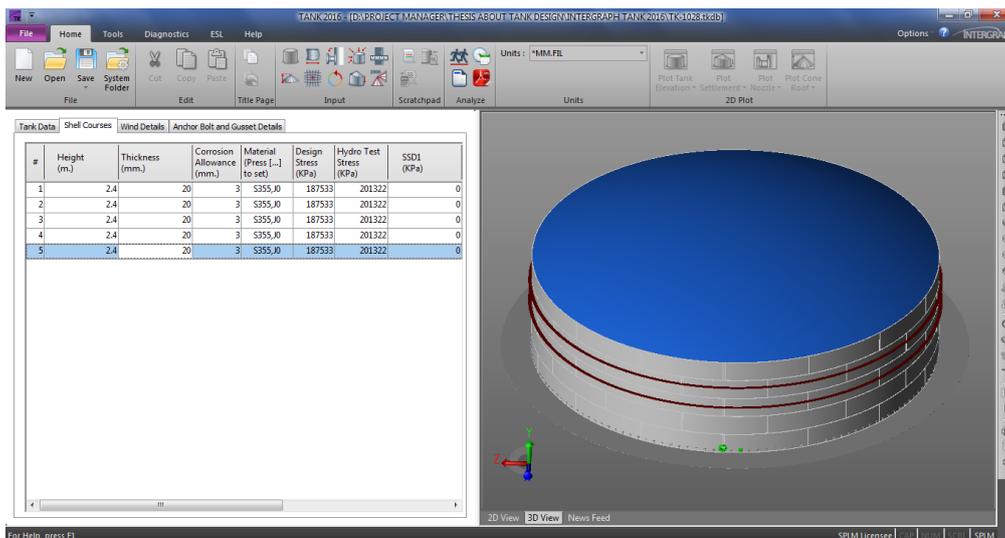
Corrosión permisible: 3.0 mm.

Material: S355 J0.

Tensión de diseño: 187533 kPa.

Tensión de prueba hidrostática: 201322 kPa





**Figura 2.** Tabulador de los anillos de la envolvente.

### 3) Tabulador de Detalles de Viento.

Proporciona la opción para definir los parámetros de vientos detallados especificado en ASCE #7 mostrado en la figura 3.

#### Datos detalles de viento.

Coefficiente de exposición de presión de velocidad: 1.04

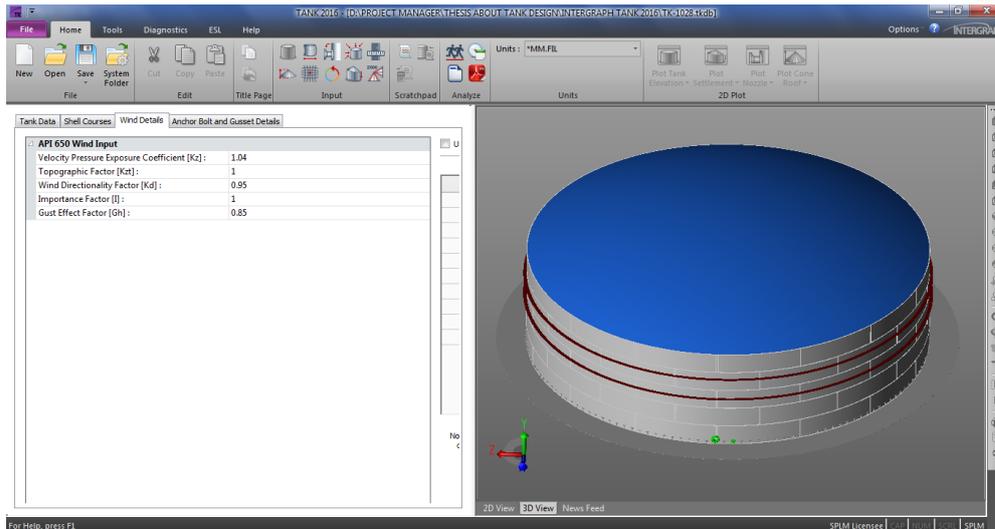
Factor topográfico: 1.0

Factor de direccionalidad: 0.95

Factor de importancia: 1.0

Factor de efecto de ráfaga: 0.85





**Figura 3.** Tabulador de detalles de viento.

#### **4) Tabulador de los Pernos de Anclaje y Detalles de las Placas de Refuerzos Intermedia.**

##### **a) Datos de los pernos de anclaje.**

Diámetros de los pernos del anclaje: 40.0 mm.

Número de pernos de anclajes: 145.0

Esfuerzo de fluencia del perno: 250000.0 KPa.

Desfase del perno desde el diámetro medio del tanque: 46.183 m.

Corrosión permisible del perno de anclaje: 1.5 mm.

##### **b) Silla de anclaje.**

Altura del Gusset: 390.0 mm.

Espesor de la placa del Gusset: 20.0 mm.

Distancia entre Gusset: 150.0 mm.

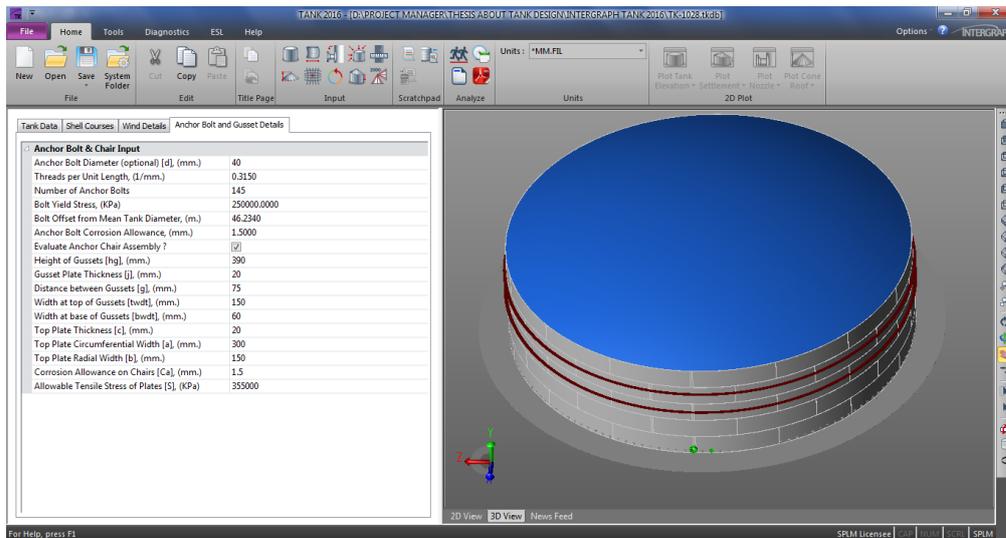
Ancho de la base del Gusset: 60.0 mm.

Espesor de la placa superior: 20.0 mm.



Ancho radial de la placa superior: 150.0 mm.

Corrosión permisible en la silla: 1.5 mm.



**Figura 4.** Tabulador de los pernos de anclaje.

### 5) Tabulador de Rigidez en las Boquillas.

Permite especificar hasta 15 boquillas en el tanque. La especificación de dato puede incluir carga de tubería externa desde el análisis de tensión de la tubería mostrado en la figura 5.

#### Datos de la rigidez de las boquillas.

Designación de la boquilla: **NZ1**

Altura de la boquilla por encima de la placa del fondo: 750.0 mm.

Diámetro exterior de la boquilla: 609.6 mm.

Delta de temperatura: 65 °C.

Módulo de elasticidad: 199000000 kPa.

Coefficiente de expansión térmica: 12.0 (mm/mm/grado)

Refuerzo: Sobre la envolvente.

Espesor de la almohadilla de la boquilla: 17.0 mm.

Peso de la boquilla: 1481.1 N.

Fuerza radial externa aplicada: 242656 N.



Momento circunferencial externo aplicado: 0.980567 N-m.

Momento longitudinal externo aplicado: 1.16884 N-m.

Proyección exterior de la boquilla: 300.0 mm.

Designación de la boquilla: **NZ2**

Altura de la boquilla por encima de la placa del fondo: 455.0 mm.

Diámetro exterior de la boquilla: 323.8 mm.

Delta de temperatura: 65 °C.

Módulo de elasticidad: 199000000 kPa.

Coefficiente de expansión térmica: 12.0 (mm/mm/grado)

Refuerzo: Sobre la envolvente.

Espesor de la almohadilla de la boquilla: 17.0 mm.

Peso de la boquilla: 591.1 N.

Fuerza radial externa aplicada: 421715 N.

Momento circunferencial externo aplicado: 4.17718 N-m.

Momento longitudinal externo aplicado: 2.22613 N-m.

Proyección exterior de la boquilla: 200.0 mm.

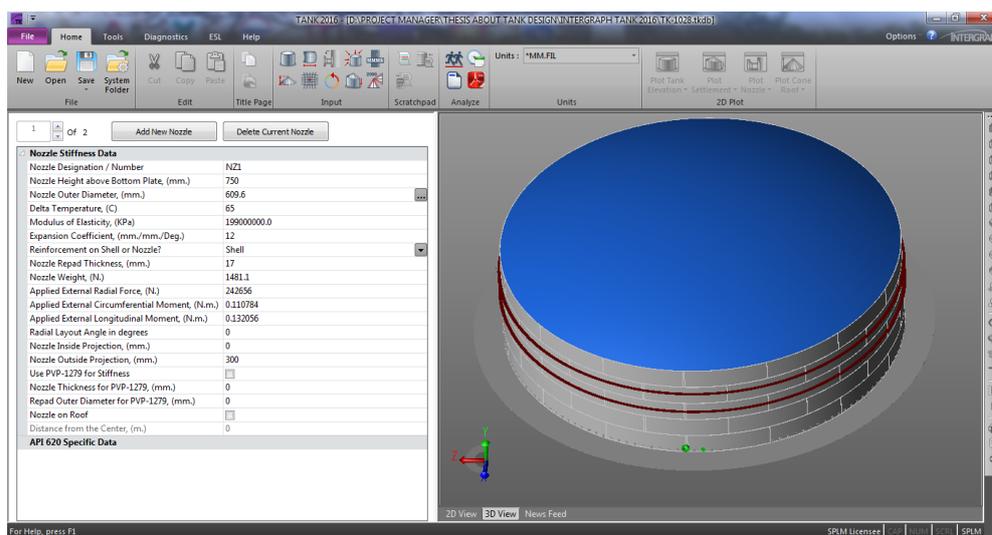


Figura 5. Tabulador de rigidez en las boquillas.



## 6) Tabulador de las Especificaciones Generales del Techo.

Especifica la geometría total del techo. Siempre que un tanque tiene un techo para ser diseñado, el valor para la mitad superior de este diálogo debe ser definido. Determinar si una aproximación simple será hecha, o un techo cónico soportado será diseñado. La aproximación requiere la especificación de los datos remanentes en el tabulador de especificación general del techo. Este dato es usado para un análisis más adelante, tal como análisis sísmico, vuelco por viento, y la presión máxima permitida mostrado en la figura 6.

### Datos de la especificación general del techo.

Tipo de techo: Domo.

Ángulo entre el techo y la horizontal: 24.6247°

Área neta entre la unión techo-envolvente: 4045.15 mm<sup>2</sup>.

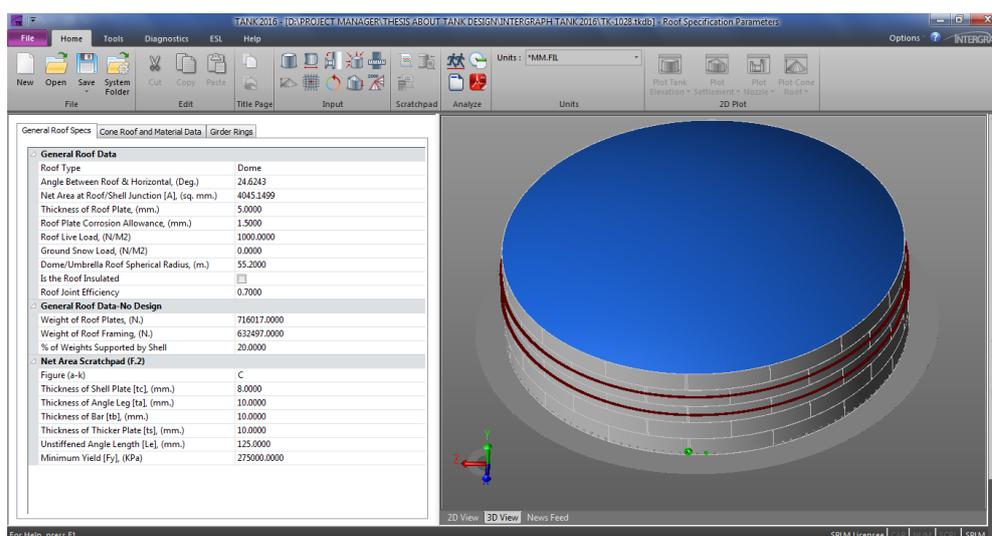
Espesor de la placa del techo: 5.0 mm.

Corrosión permisible de la placa del techo: 1.5 mm.

Carga viva del techo: 1000 N/M<sup>2</sup>.

Radio esférico del Domo: 55.20 m.

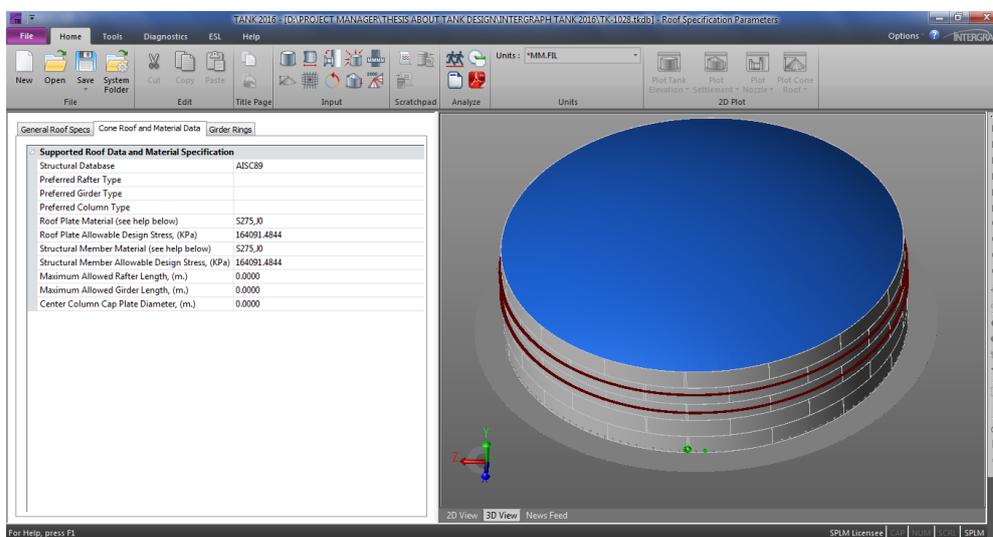
Eficiencia de la junta del techo: 0.70.



**Figura 6.** Tabulador de las especificaciones generales del techo.

### 7) Tabulador de la Selección de Materiales.

Selecciona desde la Base de Datos los materiales a utilizar en el diseño tanto de las placas como las vigas del techo, mostrado en la figura 7.



**Figura 7.** Tabulador de la selección de materiales.

### 8) Tabulador de lista de Reporte.

El tabulador de lista de reporte en el procesador de salida visualiza todos los reportes disponibles y una anotación de error para el trabajo actual. Los reportes que se visualizan son dependientes de la sucesión a la entrada que se especifica antes del análisis, mostrado en la figura 8.



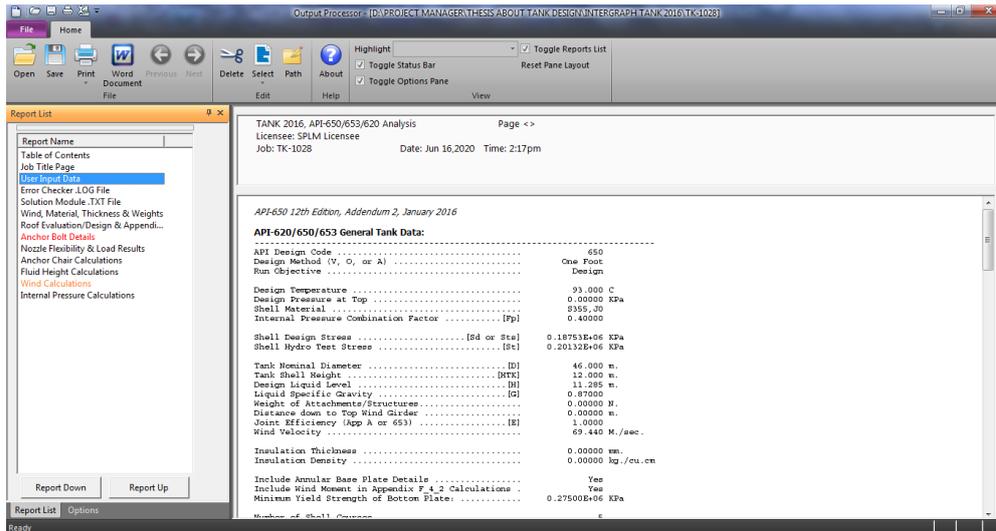


Figura 7. Tabulador de lista de reporte.

### Viento, Material, Espesor y Peso.

#### Wind Information:

---

Wind Velocity .....	69.440 M./sec.
Velocity Factor .....	1.6756
Wind Pressure .....	2.7230 KPa
Area Exposed to Wind .....	707.40 m.^2
Sect 5.9.7.1 Wind Moment on Tank .....	0.14804E+08 N.m.
Wind Shear Force Acting on Tank .....	0.19262E+07 N.
Wind Girder Height Reduction Factor .....	1.0000

#### Material Property Information:

---

Course Number	Material Name	Design Stress (Sd or Sts) (KPa)	Test Stress (St) (KPa)	App M Reduction
1	S355, J0	0.18753E+06	0.20132E+06	1.0000
2	S355, J0	0.18753E+06	0.20132E+06	1.0000
3	S355, J0	0.18753E+06	0.20132E+06	1.0000
4	S355, J0	0.18753E+06	0.20132E+06	1.0000
5	S355, J0	0.18753E+06	0.20132E+06	1.0000

### Shell Course Thickness Data - One Foot Method



Course #	Thickness Values for Three Cases			Min. Temp (deg C)	Status
	Design (mm. )	Test (mm. )	User (mm. )		
1	14.484	12.296	20.000	-7.8	NA
2	11.974	9.6084	20.000	-9.7	NA
3	9.4638	8.0000	20.000	-11.5	NA
4	8.0000	8.0000	20.000	-12.6	NA
5	8.0000	8.0000	20.000	-12.6	NA

**Shell Course Allowed Fluid Heights:**

**Shell Course Allowed Fluid Heights:**

Course	Fluid Heights for Three Cases		
	Design (m. )	Test (m. )	Required (m. )
1	11.285	13.239	11.285
2	8.8850	10.997	8.8850
3	6.4850	8.7559	6.4850
4	5.0854	7.4487	4.0850
5	5.0854	7.4487	1.6850

Maximum Allowed Fluid Height of Entire Tank For:

Design Thickness Case .....	11.285 m.
Test Thickness Case .....	13.239 m.
Required fluid height .....	11.285 m.

**Base Plate Details - Shell Weight & Center of Gravity:**

Annular Base Plate Thickness .....	9.0000 mm.
(from API-650 Table 5-1 plus corrosion)	
Annular Base Plate Width per 5.5.2 .....	745.67 mm.
( $2 + ThkCrsl + \max[ 24, (2tb * \sqrt{Fy/2YHG}) ]$ )	
Weight of Shell + Nozzles .....	0.13883E+07 N.
Total Weight of all Nozzles .....	2072.6 N.
Center of Gravity (Shell+Nozzles) .....	5.2101 m.



### Wind Overturning Stability Check:

Corroded Shell Weight + %Roof - Uplift .....	0.12575E+07 N.
Line Load .....	[wa] 261.70 N./cm.
Moment due to wind (hor+ver) press .....	[Mw] 0.80647E+07 N.m.
Moment due to wind (hor) press .....	[Mws] 0.47826E+07 N.m.
Moment due to internal pressure .....	[Mpi] 0.00000 N.m.
Moment due to tank liquid .....	[Mf] 0.86984E+08 N.m.
Moment due to shell & roof .....	[Mdl] 0.25630E+08 N.m.

### Wind Girder Information:

For "open top" tanks ...

Required Section Modulus, Top Girder .....	0.24622E+07 mm.^3
Table 5-20 Detail, B value .....	e 965.20 mm.
Table 5-20 Shape name (if applicable).....	DETAIL_E
Maximum Height of Unstiffened Shell .....	3.2774 m.

#### Wind Girder - Transformed Section Method

Number of Intermediate Girders Req'd ..... 2

---	Transformed---	Actual	Section	---	TABLE 5-20
Girder Height	Dist.	Dist.	Modulus(mm.**3)	Detail B	Shape
(m. )	(m. )	(m. )			
1   7.8	3.3	3.3	0.67246E+06	e  406.40	DETAIL_E
2   4.5	2.3	2.6	0.54258E+06	e  355.60	DETAIL_E

#### --- Actual Distance of Intermediate Wind Girders from Top of Tank ---

Girder Distance (m. )|

1   3.3
2   5.9

### Weight Summary:

Shell (Corroded) .....	985761. N.
------------------------	------------



Shell (Non-Corroded) .....	1386240. N.
Annular Base Plate .....	73611. N.
Bottom Plate .....	1027973. N.
Nozzles .....	2073. N.
Roof Plates .....	716017. N.
Roof Framing/Structure .....	632497. N.
Shell Attachments .....	0. N.
Shell + Roof Insulation .....	0. N.
Operating Fluid .....	159856624. N.
Water Weight .....	195407072. N.
Operating Weight (Non-Corroded) .....	163695040. N.
Test Weight (Non-Corroded, Filled to Top).....	199245488. N.
Empty Weight (Non-Corroded) .....	3838411. N.

**Evaluación de techo, Diseño y Anexo F.**

**TANK - Roof Design/Analysis Data**

SELF-SUPPORTING DOME ROOF

Roof thickness per 5.10.6, 0.8D .....	12.293 mm.
Roof thickness per 5.10.6, 1.2D .....	13.000 mm.
Roof thickness per 5.10.6, Roof Radius .....	13.000 mm.

Total weight of Roof Plates .....	0.67041E+06 N.
-----------------------------------	----------------

*Based on user input thickness*

User Specified Design Roof Load .....	1.3849 KPa
<i>including user plate thickness</i>	
Computed Design Roof Load .....	1.3849 KPa
<i>including user plate thickness</i>	

**Roof Evaluations - Appendix F**

---

Uplift force due to internal pressure.....	0.00000 N.
Total weight resisting uplift .....	0.27368E+07 N.



Max Design Pressure, roof/shell joint.....	7.9222 in of H2O
Max Design Pressure, roof/shell joint.....	1.9723 KPa
(According to F.4.1)	
Compression Ring Failure Pressure .....	10.719 in of H2O
Compression Ring Failure Pressure .....	2.6686 KPa
(According to F.6)	
Required Compression Areas, Roof/Shell Junction	
Area as per Section F.5 .....	0.00000 mm.^2
Area as per Section 5.10.6, 0.8D .....	5031.0 mm.^2
Area as per Section 5.10.6, 1.2D .....	7546.4 mm.^2
Frangible Roof-to-Shell Junction Area Limit:	
Area as per Section 5.10.2.6 .....	1986.8 mm.^2
Top Angle Requirement Per 5.1.5.9.e	3x3x3/8
(This is a minimum angle size based solely on the tank diameter. Other criteria may require a larger section.)	

## API 650 Appendix F Calculations:

Nominal Tank Weight

$$\begin{aligned}
 &= \text{Shell Weight} + \text{Roof Weight} + \text{Framing Weight} + \text{Attachment Weight} \\
 &= 312120.7 + 160975.0 + 142198.1 + 0.0 \\
 &= 615293.8 \text{ lb. [2736826.8 N.]}
 \end{aligned}$$

Appendix M Yield Stress reduction factor, M.3.6 [Mfact]:

$$\begin{aligned}
 &= \text{Yield Reduction Factor} * F_y / F_{yamb} \\
 &= 1.000 * 50000.0/30000.0 \\
 &= 1.000 \text{ Must be less than or equal to 1.0}
 \end{aligned}$$

Design Pressure per F.4.1 [P]:

$$\begin{aligned}
 &= (0.962 * A * F_y * M_{fact} * \tan(\theta)) / (D^2) + 0.245 * DLR / D^2 \\
 &= (0.962 * 6.270 * 38400.0 * 1.000 * \tan(24.62)) / (150.9^2) + 0.245 * 303173 / 150.9^2 \\
 &= 7.922 \text{ in. of water [201.224 mm. of water]} \\
 &= 0.286 \text{ psi [1.972 KPa]}
 \end{aligned}$$



Required Area of the Roof/Shell Junction per F.5.1 [A]:

$$= D^2(\pi - 0.245 \cdot DLR/D^2) / (0.962 \cdot F_y \cdot M_{fact}(\tan(\theta)))$$

$$= 150.9^2(0.000 - 0.245 \cdot 303173/150.9^2) / (0.962 \cdot 38400.0 \cdot 1.000(\tan(24.62)))$$

$$= 0.000 \text{ in.}^2$$

Maximum Frangible Roof Area 5.10.2.6 [A]:

$$= DLs / (2 \cdot \pi \cdot F_y \cdot M_{fact} \cdot \tan(\theta))$$

$$= 340560.3 / (2 \cdot \pi \cdot 38400.0 \cdot 1.000 \cdot \tan(24.62))$$

$$= 3.080 \text{ in.}^2 \quad [1986.798 \text{ mm.}^2]$$

Calculated failure Pressure from F.6 [Pf]:

$$= 1.6 \cdot P - (0.147 \cdot Dlr) / D^2$$

$$= 1.6 \cdot 7.922 - (0.147 \cdot 303173) / 150.9^2$$

$$= 10.719 \text{ in. of water} \quad [272.259 \text{ mm. of water}]$$

### Detalles de los pernos de anclaje.

#### Anchor Bolt Results - Section 5.12

Load Case	Uplift (N. )	Allowable Bolt Stress (KPa )	Load/Bolt (N. )
Wind Loading	3154161.8	200000.	21752

#### Anchor Bolt Results - Section 5.12

Load Case	Number of Bolts	Bolt Diameter (mm. )	Bolt Stress (KPa )
Wind Loading	145	41.275	20584

Final Anchor Bolt Spacing ..... (m. )                      3.00

**Specified user bolt diameter is insufficient.**



**Bolt Load Calculations per API 650 Table 5.21b:**

Compute weight per table 5.21b [W1]:  
 = Corr. Shell Wght + Attachment Wght + ( Corr. Roof Wght + Ins. ) \* %  
 = 222084.9 + 0.0 + ( 160975.0 + 0.0 ) \* 0.20  
 = 254279.9 lb. [1131037.0 N.]

Compute weight per table 5.21b [W2]:  
 = (Corr. Shell Wght + Ins. Wght)+Att. Wght+(Roof Wght + Fram Wght + Ins.)\*%  
 = ( 222084.9 ) + 0.0 + ( 160975.0 + 142198.1 + 0.0 ) \* 0.20  
 = 282719.5 lb. [1257536.4 N.]

Compute weight per table 5.21b [W3]:  
 = Nom. Shell Wght + Attachment Wght + (Nom. Roof Wght + Ins. Wght) \* %  
 = 312120.7 + 0.0 + (303173.1 + 0.0 ) \* 0.20  
 = 344315.7 lb. [1531516.1 N.]

Net Uplift due to Wind Pressure:  
 = PWR \* D<sup>2</sup> \* 4.08 + [4 \* MWS/D] - W2  
 = 9.667 \* 150.9<sup>2</sup> \* 4.08 + [4 \* 3527622/150.9 ] - 282719.5  
 = 709119.1 lb. [3154161.8 N.]

**Initial Bolt Design for each Load Case (mm., KPa & mm.<sup>2</sup>):**

Anchor Bolt Database: TEMA-Imperial

**Warning: Given bolt size is too small**

Case	Number	Diameter	Stress	Bolt Area
Wind Loading	145	41.275	20584.5	1056.7843

**Final Bolt Design for each Load Case (mm., KPa & mm.<sup>2</sup>):**

Case	Number	Diameter	Stress	Bolt Area
Wind Loading	145	41.275	20584.5	1056.7843



**Flexibilidad en las boquillas y resultados de carga.**

**Nozzle Flexibilities & Loads - Appendix P:**

Load Condition	Design	Test	User
Nozzle: NZ1			
-----			
Radial Stiffness (N./cm.)	0.31278E+06	0.27693E+06	0.42926E+06
Long. Bending Stiff(N.m./deg)	0.29902E+06	0.25698E+06	0.41284E+06
Circ. Bending Stiff(N.m./deg)	0.24540E+06	0.20589E+06	0.36576E+06
Radial Deflection (mm. )	0.17940E+08	0.17940E+08	0.17940E+08
Long. Rotation (deg. )	-0.25918	-0.27167	-0.22954
-----			
Radial Force Multp (1/N. )	0.52247E-05	0.55697E-05	0.45270E-05
Long. Moment Multp (1/N.m.)	0.94448E-05	0.10269E-04	0.78296E-05
Circ. Moment Multp (1/N.m.)	0.56102E-05	0.63172E-05	0.42999E-05
-----			
Radial Force Limit (N. )	19140.	17954.	31463.
+Long. Moment Limit(N.m. )	64334.	57768.	81492.
-Long. Moment Limit(N.m. )	-10588.	-9737.8	-18192.
Circ. Moment Limit (N.m. )	60422.	49823.	90756.
-----			
Load Condition	Design	Test	User
Nozzle: NZ2			
-----			
Radial Stiffness (N./cm.)	0.38199E+06	0.33242E+06	0.54317E+06
Long. Bending Stiff(N.m./deg)	0.13565E+06	0.11586E+06	0.18983E+06
Circ. Bending Stiff(N.m./deg)	0.18898E+06	0.15482E+06	0.28758E+06
Radial Deflection (mm. )	0.17940E+08	0.17940E+08	0.17940E+08
Long. Rotation (deg. )	-0.45506	-0.49602	-0.37305
-----			
Radial Force Multp (1/N.)	0.50236E-05	0.53479E-05	0.43664E-05
Long. Moment Multp (1/N.m.)	0.14156E-04	0.15092E-04	0.12264E-04
Circ. Moment Multp (1/N.m.)	0.49783E-05	0.55589E-05	0.38878E-05
-----			
Radial Force Limit (N. )	90830.	81593.	0.11416E+06
+Long. Moment Limit(N.m.)	52394.	48517.	62111.
-Long. Moment Limit(N.m.)	-32233.	-28913.	-40645.
Circ. Moment Limit (N.m.)	0.12032E+06	0.10511E+06	0.16206E+06



## Nozzle Stiffness Calculations:

---

### Minimum Nozzle Distances per API 650 Table 5.6b:

Min. distance from bottom of tank to center of regular nozzle: 736.600 mm.

Min. distance from bottom of tank to center of low nozzle: 628.650 mm.

Actual distance from bottom of tank to center of nozzle: 750.000 mm.

## Nozzle stiffness coefficients per P.2.4:

Outside radius of nozzle [a]:

$$= D / 2$$

$$= 24.0/2$$

$$= 12.0 \text{ in. [609.6 mm.]}$$

Nominal tank radius [R]:

$$= \text{Nominal tank diameter} / 2$$

$$= 1811.0/2$$

$$= 905.5 \text{ in. [46000.0 mm.]}$$

L / 2a coefficient:

$$= L / 2 * a$$

$$= 29.528/2 * 12.000$$

$$= 1.2$$

**As  $1.0 < L/2a < 1.5$ , interpolate between both sets of curves.**

a / R coefficient:

$$= a / R$$

$$= 12.0/905.512$$

$$= 0.013$$

R / t coefficient:

$$= R / t$$

$$= 905.512/1.240$$

$$= 730.5$$

Interpolated values from the figure per P-2A and P-2D [KR/E(2a)]:

$$= 0.258E-03$$

Interpolated values from the figure per P-2B and P-2E  $[KL/E(2a)^3]$ :

$$= 0.380E-03$$

Interpolated values from the figure P-2C and P-2F  $[KC/E(2a)^3]$ :

$$= 0.312E-03$$

Stiffness coefficient for the radial thrust load per P.2.9.2.1  $[KR]$ :

$$\begin{aligned} &= \text{Coeff. from graph} * E * 2 * a \\ &= 0.258E-03 * 28863168 * 2 * 12.000 \\ &= 0.17861E+06 \text{ lbf./in. } [0.31278E+06 \text{ N./cm.}] \end{aligned}$$

Stiffness coefficient for the longitudinal moment per P.2.9.2.1  $[KL]$ :

$$\begin{aligned} &= \text{Coeff. from graph} * E * (2.0 * a)^3 \\ &= 0.380E-03 * 28863168 * (2.0 * 12.000)^3 \\ &= 0.26467E+07 \text{ in.lbf./deg } [0.29902E+06 \text{ N.m./deg}] \end{aligned}$$

Stiffness coefficient for the circumferential moment per P.2.9.2.1  $[KC]$ :

$$\begin{aligned} &= \text{Coeff. from graph} * E * (2 * a)^3 \\ &= 0.312E-03 * 28863168 * (2 * 12.000)^3 \\ &= 0.21721E+07 \text{ in.lbf./deg } [0.24540E+06 \text{ N.m./deg}] \end{aligned}$$

Characteristic parameter per P.2.3  $[\beta]$ :

$$\begin{aligned} &= 1.285 / (Rt)^{0.5} \\ &= 1.285 / (905.512 * 1.240)^{0.5} \\ &= 0.38355E-01 \text{ 1/in. } [0.15101E-02 \text{ 1/mm.}] \end{aligned}$$

Unrestrained radial growth of the shell per P.2.5.1  $[W]$ :

$$\begin{aligned} &= (0.036 * G * H * R^2) / Et \\ &\quad * [1 - (e^{-(\beta * L)}) * \cos(\beta * L) - (L/H)] \\ &\quad + \alpha * R * \delta[T] \\ &= (0.036 * 0.870 * 444.291 * 905.512^2) / 28863168 * 1.240 \\ &\quad * [1 - (e^{-(0.038 * 29.528)}) * \cos(0.038 * 29.528) - (29.528 / 444.29)] \\ &\quad + 0.667E+01 * 905.512 * 116.991 \\ &= 706299.50000 \text{ in. } [17940008.00000 \text{ mm.}] \end{aligned}$$

Unrestrained shell rotation of the shell per P.2.5.2  $[\theta]$ :

$$\begin{aligned} &= (0.036 * G * H * R^2) / E * t \\ &\quad * [(1/H) - (\beta * e^{-(\beta * L)})] \\ &\quad * [\cos(\beta * L) + \sin(\beta * L)] \\ &= (0.036 * 0.870 * 444.291 * 905.512^2) / 28863168 * 1.240 \\ &\quad * [(1/444.291) - (0.038 * e^{-(0.038 * 29.528)})] \\ &\quad * [\cos(0.038 * 29.528) + \sin(0.038 * 29.528)] \\ &= -0.25918E+00 \text{ deg} \end{aligned}$$



Value of lamda per P.2.3 [lamda]:

$$\begin{aligned}
 &= a / (Rt)^{0.5} \\
 &= 12.000 / (905.512 * 1.240)^{0.5} \\
 &= 0.358
 \end{aligned}$$

Coefficient XA per P.2.3:

$$\begin{aligned}
 &= L + a \\
 &= 29.528 + 12.000 \\
 &= 41.528 \text{ in. [1054.800 mm.]}
 \end{aligned}$$

Coefficient XB per P.2.3:

$$\begin{aligned}
 &= L - a \\
 &= 29.528 - 12.000 \\
 &= 17.528 \text{ in. [445.200 mm.]}
 \end{aligned}$$

Coefficient XC per P.2.3:

$$\begin{aligned}
 &= L \\
 &= 29.528 \text{ in. [750.000 mm.]}
 \end{aligned}$$

Coefficients YF and YL from figure P-4A based on lamda:

$$\begin{aligned}
 YF &= 1.307 \\
 YL &= 4.745
 \end{aligned}$$

Coefficient YC from figure P-4B based on lamda:

$$YC = 7.989$$

Pressure end load on the opening per P.2.3:

$$\begin{aligned}
 &= \pi * a^2 * P \\
 &= 3.1415 * 12.000^2 * 13.030 \\
 &= 5894.858 \text{ lbf. [26220.328 N.]}
 \end{aligned}$$

Radial force nomogram limit values per figure P-3A:

$$\begin{aligned}
 &= \max[(1 - 0.75) (XA / (Rt)^{0.5}), 0.1] \\
 &= \max[(1 - 0.75) (41.528 / (905.512 * 1.240)^{0.5}), 0.1] \\
 &= 0.100
 \end{aligned}$$

Longitudinal nomogram limit values per figure P-3A:

$$\begin{aligned}
 &= \max[(1 - 0.75) (XB / (Rt)^{0.5}), 0.1] \\
 &= \max[(1 - 0.75) (17.528 / (905.512 * 1.240)^{0.5}), 0.1] \\
 &= 0.608
 \end{aligned}$$

Circumferential moment nomogram limit value per figure P-3B:

$$\begin{aligned}
 &= \max[(1 - 0.75) (XC / (Rt)^{0.5}), 0.1] \\
 &= \max[(1 - 0.75) (29.528 / (905.512 * 1.240)^{0.5}), 0.1]
 \end{aligned}$$



= 0.339

Radial force multiplier per figure P-3A:

=  $\lambda / (2 * YF * FP)$   
 =  $0.358 / (2 * 1.307 * 5894.858)$   
 =  $0.23239E-04$  1/lbf. [0.52247E-05 1/N.]

Longitudinal moment multiplier per figure P-3A:

=  $\lambda / (a / 12.0 * YL * FP)$   
 =  $0.358 / (12.000 / 12.0 * 4.745 * 5894.858)$   
 =  $0.12805E-04$  1/ft.lb. [0.94448E-05 1/N.m.]

Circumferential moment multiplier per figure P-3B:

=  $\lambda / (a * 12.0 * YC * FP)$   
 =  $0.358 / (12.000 * 12.0 * 7.989 * 5894.858)$   
 =  $0.76061E-05$  1/ft.lb. [0.56102E-05 1/N.m.]

Radial force limit [ML = 0 and MC = 0] per figure P-3A [FRmax]:

= Radial force nomogram limit value / Radial force multp.  
 =  $0.100 / 0.232E-04$   
 =  $0.43030E+04$  lbf. [0.19140E+05 N.]

Positive Long. moment limit [MC = 0 and FR = 0] per figure P-3A [MLmax]:

= Long. moment nomogram limit value / Long. moment multiplier  
 =  $0.608 / 0.128E-04$   
 =  $0.47452E+05$  ft.lb. [0.64334E+05 N.m.]

Negative Long. moment limit [ML = 0 and MC = 0] per figure P-3A [MLmin]:

= - Radial Force nomogram limit value / Long. moment multiplier  
 =  $-0.100 / 0.128E-04$   
 =  $-0.78095E+04$  ft.lb. [-0.10588E+05 N.m.]

Circ. moment limit [ML = 0 and FR = 0] per figure P-3B [MCmax]:

= Circ. moment nomogram limit value / Circ. moment multiplier  
 =  $0.339 / 0.761E-05$   
 =  $0.44567E+05$  ft.lb. [0.60422E+05 N.m.]

-----

**Minimum Nozzle Distances per API 650 Table 5.6b:**

Min. distance from bottom of tank to center of regular nozzle: 736.600 mm.

Min. distance from bottom of tank to center of low nozzle: 628.650 mm.

Actual distance from bottom of tank to center of nozzle: 750.000 mm.

**Nozzle stiffness coefficients per P.2.4:**

Outside radius of nozzle [a]:

$$\begin{aligned}
 &= D / 2 \\
 &= 24.0/2 \\
 &= 12.0 \text{ in. [609.6 mm.]}
 \end{aligned}$$

Nominal tank radius [R]:

$$\begin{aligned}
 &= \text{Nominal tank diameter} / 2 \\
 &= 1811.0/2 \\
 &= 905.5 \text{ in. [46000.0 mm.]}
 \end{aligned}$$

L / 2a coefficient:

$$\begin{aligned}
 &= L / 2 * a \\
 &= 29.528/2 * 12.000 \\
 &= 1.2
 \end{aligned}$$

**As  $1.0 < L/2a < 1.5$ , interpolate between both sets of curves.**

a / R coefficient:

$$\begin{aligned}
 &= a / R \\
 &= 12.0/905.512 \\
 &= 0.013
 \end{aligned}$$

R / t coefficient:

$$\begin{aligned}
 &= R / t \\
 &= 905.512/1.153 \\
 &= 785.1
 \end{aligned}$$

Interpolated values from the figure per P-2A and P-2D [KR/E(2a)]:

$$= 0.228E-03$$

Interpolated values from the figure per P-2B and P-2E [KL/E(2a)^3]:

$$= 0.327E-03$$

Interpolated values from the figure P-2C and P-2F [KC/E(2a)^3]:

$$= 0.262E-03$$

Stiffness coefficient for the radial thrust load per P.2.9.2.1 [KR]:

$$\begin{aligned}
 &= \text{Coeff. from graph} * E * 2 * a \\
 &= 0.228E-03 * 28863168 * 2 * 12.000 \\
 &= 0.15814E+06 \text{ lbf./in. [0.27693E+06 N./cm.]}
 \end{aligned}$$



Stiffness coefficient for the longitudinal moment per P.2.9.2.1 [KL]:

$$\begin{aligned}
 &= \text{Coeff. from graph} * E * (2.0 * a)^3 \\
 &= 0.327E-03 * 28863168 * (2.0 * 12.000)^3 \\
 &= 0.22746E+07 \text{ in.lbf./deg} \quad [0.25698E+06 \text{ N.m./deg}]
 \end{aligned}$$

Stiffness coefficient for the circumferential moment per P.2.9.2.1 [KC]:

$$\begin{aligned}
 &= \text{Coeff. from graph} * E * (2 * a)^3 \\
 &= 0.262E-03 * 28863168 * (2 * 12.000)^3 \\
 &= 0.18224E+07 \text{ in.lbf./deg} \quad [0.20589E+06 \text{ N.m./deg}]
 \end{aligned}$$

Characteristic parameter per P.2.3 [beta]:

$$\begin{aligned}
 &= 1.285 / (Rt)^{0.5} \\
 &= 1.285 / (905.512 * 1.153)^{0.5} \\
 &= 0.39762E-01 \text{ 1/in.} \quad [0.15654E-02 \text{ 1/mm.}]
 \end{aligned}$$

Unrestrained radial growth of the shell per P.2.5.1 [W]:

$$\begin{aligned}
 &= (0.036 * G * H * R^2) / Et \\
 &\quad * [1 - (e^{-(\beta * L)}) * \cos(\beta * L) - (L/H)] \\
 &\quad + \alpha * R * \delta[T] \\
 &= (0.036 * 0.870 * 444.291 * 905.512^2) / 28863168 * 1.153 \\
 &\quad * [1 - (e^{-(0.040 * 29.528)}) * \cos(0.040 * 29.528) - (29.528 / 444.29)] \\
 &\quad + 0.667E+01 * 905.512 * 116.991 \\
 &= 706299.50000 \text{ in.} \quad [17940008.00000 \text{ mm.}]
 \end{aligned}$$

Unrestrained shell rotation of the shell per P.2.5.2 [theta]:

$$\begin{aligned}
 &= (0.036 * G * H * R^2) / E * t \\
 &\quad * [(1/H) - (\beta * e^{-(\beta * L)}) \\
 &\quad * [\cos(\beta * L) + \sin(\beta * L)]] \\
 &= (0.036 * 0.870 * 444.291 * 905.512^2) / 28863168 * 1.153 \\
 &\quad * [(1/444.291) - (0.040 * e^{-(0.040 * 29.528)}) \\
 &\quad * [\cos(0.040 * 29.528) + \sin(0.040 * 29.528)]] \\
 &= -0.27167E+00 \text{ deg}
 \end{aligned}$$

Value of lamda per P.2.3 [lamda]:

$$\begin{aligned}
 &= a / (Rt)^{0.5} \\
 &= 12.000 / (905.512 * 1.153)^{0.5} \\
 &= 0.371
 \end{aligned}$$

Coefficient XA per P.2.3:

$$\begin{aligned}
 &= L + a \\
 &= 29.528 + 12.000 \\
 &= 41.528 \text{ in.} \quad [1054.800 \text{ mm.}]
 \end{aligned}$$



Coefficient XB per P.2.3:

$$\begin{aligned}
 &= L - a \\
 &= 29.528 - 12.000 \\
 &= 17.528 \text{ in. } [445.200 \text{ mm.}]
 \end{aligned}$$

Coefficient XC per P.2.3:

$$\begin{aligned}
 &= L \\
 &= 29.528 \text{ in. } [750.000 \text{ mm.}]
 \end{aligned}$$

Coefficients YF and YL from figure P-4A based on lamda:

$$\begin{aligned}
 YF &= 1.271 \\
 YL &= 4.524
 \end{aligned}$$

Coefficient YC from figure P-4B based on lamda:

$$YC = 7.355$$

Pressure end load on the opening per P.2.3:

$$\begin{aligned}
 &= \pi * a^2 * P \\
 &= 3.1415 * 12.000^2 * 13.030 \\
 &= 5894.858 \text{ lbf. } [26220.328 \text{ N.}]
 \end{aligned}$$

Radial force nomogram limit values per figure P-3A:

$$\begin{aligned}
 &= \max[(1 - 0.75) (XA / (Rt)^{0.5}), 0.1] \\
 &= \max[(1 - 0.75) (41.528 / (905.512 * 1.153 )^{0.5}), 0.1] \\
 &= 0.100
 \end{aligned}$$

Longitudinal nomogram limit values per figure P-3A:

$$\begin{aligned}
 &= \max[(1 - 0.75) (XB / (Rt)^{0.5}), 0.1] \\
 &= \max[(1 - 0.75) (17.528 / (905.512 * 1.153 )^{0.5}), 0.1] \\
 &= 0.593
 \end{aligned}$$

Circumferential moment nomogram limit value per figure P-3B:

$$\begin{aligned}
 &= \max[(1 - 0.75) (XC / (Rt)^{0.5}), 0.1] \\
 &= \max[(1 - 0.75) (29.528 / (905.512 * 1.153 )^{0.5}), 0.1] \\
 &= 0.315
 \end{aligned}$$

Radial force multiplier per figure P-3A:

$$\begin{aligned}
 &= \text{lamda} / (2 * YF * FP) \\
 &= 0.371 / (2 * 1.271 * 5894.858 ) \\
 &= 0.24774E-04 \text{ 1/lbf. } [0.55697E-05 \text{ 1/N.}]
 \end{aligned}$$

Longitudinal moment multiplier per figure P-3A:

$$\begin{aligned}
 &= \text{lamda} / (a / 12.0 * YL * FP) \\
 &= 0.371 / (12.000 / 12.0 * 4.524 * 5894.858 )
 \end{aligned}$$



$$= 0.13923E-04 \text{ 1/ft.lb. } [0.10269E-04 \text{ 1/N.m.}]$$

Circumferential moment multiplier per figure P-3B:

$$= \lambda / (a * 12.0 * YC * FP)$$

$$= 0.371 / (12.000 * 12.0 * 7.355 * 5894.858)$$

$$= 0.85647E-05 \text{ 1/ft.lb. } [0.63172E-05 \text{ 1/N.m.}]$$

Radial force limit [ML = 0 and MC = 0] per figure P-3A [FRmax]:

$$= \text{Radial force nomogram limit value} / \text{Radial force multp.}$$

$$= 0.100 / 0.248E-04$$

$$= 0.40365E+04 \text{ lbf. } [0.17954E+05 \text{ N.}]$$

Positive Long. moment limit [MC = 0 and FR = 0] per figure P-3A [MLmax]:

$$= \text{Long. moment nomogram limit value} / \text{Long. moment multiplier}$$

$$= 0.593 / 0.139E-04$$

$$= 0.42609E+05 \text{ ft.lb. } [0.57768E+05 \text{ N.m.}]$$

Negative Long. moment limit [ML = 0 and MC = 0] per figure P-3A [MLmin]:

$$= - \text{Radial Force nomogram limit value} / \text{Long. moment multiplier}$$

$$= -0.100 / 0.139E-04$$

$$= -0.71826E+04 \text{ ft.lb. } [-0.97378E+04 \text{ N.m.}]$$

Circ. moment limit [ML = 0 and FR = 0] per figure P-3B [MCmax]:

$$= \text{Circ. moment nomogram limit value} / \text{Circ. moment multiplier}$$

$$= 0.315 / 0.856E-05$$

$$= 0.36749E+05 \text{ ft.lb. } [0.49823E+05 \text{ N.m.}]$$

-----

**Minimum Nozzle Distances per API 650 Table 5.6b:**

Min. distance from bottom of tank to center of regular nozzle: 736.600 mm.

Min. distance from bottom of tank to center of low nozzle: 628.650 mm.

Actual distance from bottom of tank to center of nozzle: 750.000 mm.

**Nozzle stiffness coefficients per P.2.4:**

Outside radius of nozzle [a]:

$$= D / 2$$

$$= 24.0 / 2$$

$$= 12.0 \text{ in. } [609.6 \text{ mm.}]$$

Nominal tank radius [R]:



= Nominal tank diameter / 2  
 = 1811.0/2  
 = 905.5 in. [46000.0 mm.]

L / 2a coefficient:

= L / 2 \* a  
 = 29.528/2 \* 12.000  
 = 1.2

**As  $1.0 < L/2a < 1.5$ , interpolate between both sets of curves.**

a / R coefficient:

= a / R  
 = 12.0/905.512  
 = 0.013

R / t coefficient:

= R / t  
 = 905.512/1.457  
 = 621.6

Interpolated values from the figure per P-2A and P-2D [KR/E(2a)]:

= 0.354E-03

Interpolated values from the figure per P-2B and P-2E [KL/E(2a)<sup>3</sup>]:

= 0.525E-03

Interpolated values from the figure P-2C and P-2F [KC/E(2a)<sup>3</sup>]:

= 0.465E-03

Stiffness coefficient for the radial thrust load per P.2.9.2.1 [KR]:

= Coeff. from graph \* E \* 2 \* a  
 = 0.354E-03 \* 28863168 \* 2 \* 12.000  
 = 0.24513E+06 lbf./in. [0.42926E+06 N./cm.]

Stiffness coefficient for the longitudinal moment per P.2.9.2.1 [KL]:

= Coeff. from graph \* E \* ( 2.0 \* a )<sup>3</sup>  
 = 0.525E-03 \* 28863168 \* ( 2.0 \* 12.000 )<sup>3</sup>  
 = 0.36541E+07 in.lbf./deg [0.41284E+06 N.m./deg]

Stiffness coefficient for the circumferential moment per P.2.9.2.1 [KC]:

= Coeff. from graph \* E \* ( 2 \* a )<sup>3</sup>  
 = 0.465E-03 \* 28863168 \* ( 2 \* 12.000 )<sup>3</sup>  
 = 0.32374E+07 in.lbf./deg [0.36576E+06 N.m./deg]



Characteristic parameter per P.2.3 [beta]:

$$\begin{aligned}
 &= 1.285 / (Rt)^{0.5} \\
 &= 1.285 / (905.512 * 1.457)^{0.5} \\
 &= 0.35381E-01 \text{ 1/in. } [0.13930E-02 \text{ 1/mm.}]
 \end{aligned}$$

Unrestrained radial growth of the shell per P.2.5.1 [W]:

$$\begin{aligned}
 &= (0.036 * G * H * R^2) / Et \\
 &\quad * [1 - (e^{-(\beta * L)}) * \cos(\beta * L) - (L/H)] \\
 &\quad + \alpha * R * \Delta T \\
 &= (0.036 * 0.870 * 444.291 * 905.512^2) / 28863168 * 1.457 \\
 &\quad * [1 - (e^{-(0.035 * 29.528)}) * \cos(0.035 * 29.528) - (29.528 / 444.29)] \\
 &\quad + 0.667E+01 * 905.512 * 116.991 \\
 &= 706299.43750 \text{ in. } [17940006.00000 \text{ mm.}]
 \end{aligned}$$

Unrestrained shell rotation of the shell per P.2.5.2 [theta]:

$$\begin{aligned}
 &= (0.036 * G * H * R^2) / E * t \\
 &\quad * [(1/H) - (\beta * e^{-(\beta * L)}) \\
 &\quad * [\cos(\beta * L) + \sin(\beta * L)]] \\
 &= (0.036 * 0.870 * 444.291 * 905.512^2) / 28863168 * 1.457 \\
 &\quad * [(1/444.291) - (0.035 * e^{-(0.035 * 29.528)}) \\
 &\quad * [\cos(0.035 * 29.528) + \sin(0.035 * 29.528)]] \\
 &= -0.22954E+00 \text{ deg}
 \end{aligned}$$

Value of lamda per P.2.3 [lamda]:

$$\begin{aligned}
 &= a / (Rt)^{0.5} \\
 &= 12.000 / (905.512 * 1.457)^{0.5} \\
 &= 0.330
 \end{aligned}$$

Coefficient XA per P.2.3:

$$\begin{aligned}
 &= L + a \\
 &= 29.528 + 12.000 \\
 &= 41.528 \text{ in. } [1054.800 \text{ mm.}]
 \end{aligned}$$

Coefficient XB per P.2.3:

$$\begin{aligned}
 &= L - a \\
 &= 29.528 - 12.000 \\
 &= 17.528 \text{ in. } [445.200 \text{ mm.}]
 \end{aligned}$$

Coefficient XC per P.2.3:

$$\begin{aligned}
 &= L \\
 &= 29.528 \text{ in. } [750.000 \text{ mm.}]
 \end{aligned}$$

Coefficients YF and YL from figure P-4A based on lamda:



$$YF = 1.392$$

$$YL = 5.280$$

Coefficient YC from figure P-4B based on lamda:

$$YC = 9.615$$

Pressure end load on the opening per P.2.3:

$$\begin{aligned} &= \pi * a^2 * P \\ &= 3.1415 * 12.000^2 * 13.030 \\ &= 5894.858 \text{ lbf. } [26220.328 \text{ N.}] \end{aligned}$$

Radial force nomogram limit values per figure P-3A:

$$\begin{aligned} &= \max[(1 - 0.75) (XA / (Rt)^{0.5}), 0.1] \\ &= \max[(1 - 0.75) (41.528 / (905.512 * 1.457)^{0.5}), 0.1] \\ &= 0.142 \end{aligned}$$

Longitudinal nomogram limit values per figure P-3A:

$$\begin{aligned} &= \max[(1 - 0.75) (XB / (Rt)^{0.5}), 0.1] \\ &= \max[(1 - 0.75) (17.528 / (905.512 * 1.457)^{0.5}), 0.1] \\ &= 0.638 \end{aligned}$$

Circumferential moment nomogram limit value per figure P-3B:

$$\begin{aligned} &= \max[(1 - 0.75) (XC / (Rt)^{0.5}), 0.1] \\ &= \max[(1 - 0.75) (29.528 / (905.512 * 1.457)^{0.5}), 0.1] \\ &= 0.390 \end{aligned}$$

Radial force multiplier per figure P-3A:

$$\begin{aligned} &= \text{lamda} / (2 * YF * FP) \\ &= 0.330 / (2 * 1.392 * 5894.858) \\ &= 0.20136E-04 \text{ 1/lbf. } [0.45270E-05 \text{ 1/N.}] \end{aligned}$$

Longitudinal moment multiplier per figure P-3A:

$$\begin{aligned} &= \text{lamda} / (a / 12.0 * YL * FP) \\ &= 0.330 / (12.000 / 12.0 * 5.280 * 5894.858) \\ &= 0.10615E-04 \text{ 1/ft.lb. } [0.78296E-05 \text{ 1/N.m.}] \end{aligned}$$

Circumferential moment multiplier per figure P-3B:

$$\begin{aligned} &= \text{lamda} / (a * 12.0 * YC * FP) \\ &= 0.330 / (12.000 * 12.0 * 9.615 * 5894.858) \\ &= 0.58296E-05 \text{ 1/ft.lb. } [0.42999E-05 \text{ 1/N.m.}] \end{aligned}$$

Radial force limit [ML = 0 and MC = 0] per figure P-3A [FRmax]:

$$\begin{aligned} &= \text{Radial force nomogram limit value} / \text{Radial force multp.} \\ &= 0.142 / 0.201E-04 \end{aligned}$$



$$= 0.70736E+04 \text{ lbf. } [0.31463E+05 \text{ N.}]$$

Positive Long. moment limit [MC = 0 and FR = 0] per figure P-3A [MLmax]:

$$= \text{Long. moment nomogram limit value} / \text{Long. moment multiplier}$$

$$= 0.638/0.106E-04$$

$$= 0.60108E+05 \text{ ft.lb. } [0.81492E+05 \text{ N.m.}]$$

Negative Long. moment limit [ML = 0 and MC = 0] per figure P-3A [MLmin]:

$$= - \text{Radial Force nomogram limit value} / \text{Long. moment multiplier}$$

$$= -0.142/0.106E-04$$

$$= -.13418E+05 \text{ ft.lb. } [-0.18192E+05 \text{ N.m.}]$$

Circ. moment limit [ML = 0 and FR = 0] per figure P-3B [MCmax]:

$$= \text{Circ. moment nomogram limit value} / \text{Circ. moment multiplier}$$

$$= 0.390/0.583E-05$$

$$= 0.66941E+05 \text{ ft.lb. } [0.90756E+05 \text{ N.m.}]$$

-----

**Minimum Nozzle Distances per API 650 Table 5.6b:**

Min. distance from bottom of tank to center of regular nozzle: 450.850 mm.

Min. distance from bottom of tank to center of low nozzle: 342.900 mm.

Actual distance from bottom of tank to center of nozzle: 455.000 mm.

**Nozzle stiffness coefficients per P.2.4:**

Outside radius of nozzle [a]:

$$= D / 2$$

$$= 12.7/2$$

$$= 6.4 \text{ in. } [323.8 \text{ mm.}]$$

Nominal tank radius [R]:

$$= \text{Nominal tank diameter} / 2$$

$$= 1811.0/2$$

$$= 905.5 \text{ in. } [46000.0 \text{ mm.}]$$

L / 2a coefficient:

$$= L / 2 * a$$

$$= 17.913/2 * 6.374$$

$$= 1.4$$

**As  $1.0 < L/2a < 1.5$ , interpolate between both sets of curves.**

a / R coefficient:

$$\begin{aligned}
 &= a / R \\
 &= 6.4/905.512 \\
 &= 0.007
 \end{aligned}$$

R / t coefficient:

$$\begin{aligned}
 &= R / t \\
 &= 905.512/1.240 \\
 &= 730.5
 \end{aligned}$$

Interpolated values from the figure per P-2A and P-2D [KR/E(2a)]:

$$= 0.593E-03$$

Interpolated values from the figure per P-2B and P-2E [KL/E(2a)^3]:

$$= 0.115E-02$$

Interpolated values from the figure P-2C and P-2F [KC/E(2a)^3]:

$$= 0.160E-02$$

Stiffness coefficient for the radial thrust load per P.2.9.2.1 [KR]:

$$\begin{aligned}
 &= \text{Coeff. from graph} * E * 2 * a \\
 &= 0.593E-03 * 28863168 * 2 * 6.374 \\
 &= 0.21813E+06 \text{ lbf./in. } [0.38199E+06 \text{ N./cm.}]
 \end{aligned}$$

Stiffness coefficient for the longitudinal moment per P.2.9.2.1 [KL]:

$$\begin{aligned}
 &= \text{Coeff. from graph} * E * ( 2.0 * a )^3 \\
 &= 0.115E-02 * 28863168 * ( 2.0 * 6.374 )^3 \\
 &= 0.12007E+07 \text{ in.lbf./deg } [0.13565E+06 \text{ N.m./deg}]
 \end{aligned}$$

Stiffness coefficient for the circumferential moment per P.2.9.2.1 [KC]:

$$\begin{aligned}
 &= \text{Coeff. from graph} * E * ( 2 * a )^3 \\
 &= 0.160E-02 * 28863168 * ( 2 * 6.374 )^3 \\
 &= 0.16727E+07 \text{ in.lbf./deg } [0.18898E+06 \text{ N.m./deg}]
 \end{aligned}$$

Characteristic parameter per P.2.3 [beta]:

$$\begin{aligned}
 &= 1.285 / (Rt)^{0.5} \\
 &= 1.285 / (905.512 * 1.240 )^{0.5} \\
 &= 0.38355E-01 \text{ 1/in. } [0.15101E-02 \text{ 1/mm.}]
 \end{aligned}$$

Unrestrained radial growth of the shell per P.2.5.1 [W]:

$$\begin{aligned}
 &= (0.036 * G * H * R^2) / Et \\
 &\quad * [1 - (e^{-(\beta * L)}) * \cos(\beta * L) - (L/H)] \\
 &\quad + \alpha * R * \delta [T]
 \end{aligned}$$



$$\begin{aligned}
 &= (0.036 \cdot 0.870 \cdot 444.291 \cdot 905.512^2) / 28863168 \cdot 1.240 \\
 &\quad * [1 - (e^{-(0.038 \cdot 17.913)}) \cdot \cos(0.038 \cdot 17.913) - (17.913 / 444.29)] \\
 &\quad + 0.667E+01 \cdot 905.512 \cdot 116.991 \\
 &= 706299.43750 \text{ in. } [17940006.00000 \text{ mm.}]
 \end{aligned}$$

Unrestrained shell rotation of the shell per P.2.5.2 [theta]:

$$\begin{aligned}
 &= (0.036 \cdot G \cdot H \cdot R^2) / E \cdot t \\
 &\quad * [(1/H) - (\beta \cdot e^{-(\beta \cdot L)})] \\
 &\quad * [\cos(\beta \cdot L) + \sin(\beta \cdot L)] \\
 &= (0.036 \cdot 0.870 \cdot 444.291 \cdot 905.512^2) / 28863168 \cdot 1.240 \\
 &\quad * [(1/444.291) - (0.038 \cdot e^{-(0.038 \cdot 17.913)})] \\
 &\quad * [\cos(0.038 \cdot 17.913) + \sin(0.038 \cdot 17.913)] \\
 &= -0.45506E+00 \text{ deg}
 \end{aligned}$$

Value of lamda per P.2.3 [lamda]:

$$\begin{aligned}
 &= a / (Rt)^{0.5} \\
 &= 6.374 / (905.512 \cdot 1.240)^{0.5} \\
 &= 0.190
 \end{aligned}$$

Coefficient XA per P.2.3:

$$\begin{aligned}
 &= L + a \\
 &= 17.913 + 6.374 \\
 &= 24.287 \text{ in. } [616.900 \text{ mm.}]
 \end{aligned}$$

Coefficient XB per P.2.3:

$$\begin{aligned}
 &= L - a \\
 &= 17.913 - 6.374 \\
 &= 11.539 \text{ in. } [293.100 \text{ mm.}]
 \end{aligned}$$

Coefficient XC per P.2.3:

$$\begin{aligned}
 &= L \\
 &= 17.913 \text{ in. } [455.000 \text{ mm.}]
 \end{aligned}$$

Coefficients YF and YL from figure P-4A based on lamda:

$$\begin{aligned}
 YF &= 2.490 \\
 YL &= 10.916
 \end{aligned}$$

Coefficient YC from figure P-4B based on lamda:

$$YC = 31.039$$

Pressure end load on the opening per P.2.3:

$$\begin{aligned}
 &= \pi \cdot a^2 \cdot P \\
 &= 3.1415 \cdot 6.374^2 \cdot 13.395 \\
 &= 1709.744 \text{ lbf. } [7604.939 \text{ N.}]
 \end{aligned}$$



Radial force nomogram limit values per figure P-3A:

$$\begin{aligned}
 &= \max[(1 - 0.75)(XA / (Rt)^{0.5}), 0.1] \\
 &= \max[(1 - 0.75)(24.287/(905.512 * 1.240)^{0.5}), 0.1] \\
 &= 0.456
 \end{aligned}$$

Longitudinal nomogram limit values per figure P-3A:

$$\begin{aligned}
 &= \max[(1 - 0.75)(XB / (Rt)^{0.5}), 0.1] \\
 &= \max[(1 - 0.75)(11.539/(905.512 * 1.240)^{0.5}), 0.1] \\
 &= 0.742
 \end{aligned}$$

Circumferential moment nomogram limit value per figure P-3B:

$$\begin{aligned}
 &= \max[(1 - 0.75)(XC / (Rt)^{0.5}), 0.1] \\
 &= \max[(1 - 0.75)(17.913/(905.512 * 1.240)^{0.5}), 0.1] \\
 &= 0.599
 \end{aligned}$$

Radial force multiplier per figure P-3A:

$$\begin{aligned}
 &= \lambda / (2 * YF * FP) \\
 &= 0.190 / (2 * 2.490 * 1709.744) \\
 &= 0.22345E-04 \text{ 1/lbf. } [0.50236E-05 \text{ 1/N.}]
 \end{aligned}$$

Longitudinal moment multiplier per figure P-3A:

$$\begin{aligned}
 &= \lambda / (a / 12.0 * YL * FP) \\
 &= 0.190 / (6.374/12.0 * 10.916 * 1709.744) \\
 &= 0.19192E-04 \text{ 1/ft.lb. } [0.14156E-04 \text{ 1/N.m.}]
 \end{aligned}$$

Circumferential moment multiplier per figure P-3B:

$$\begin{aligned}
 &= \lambda / (a * 12.0 * YC * FP) \\
 &= 0.190 / (6.374 * 12.0 * 31.039 * 1709.744) \\
 &= 0.67494E-05 \text{ 1/ft.lb. } [0.49783E-05 \text{ 1/N.m.}]
 \end{aligned}$$

Radial force limit [ML = 0 and MC = 0] per figure P-3A [FRmax]:

$$\begin{aligned}
 &= \text{Radial force nomogram limit value} / \text{Radial force multp.} \\
 &= 0.456 / 0.223E-04 \\
 &= 0.20420E+05 \text{ lbf. } [0.90830E+05 \text{ N.}]
 \end{aligned}$$

Positive Long. moment limit [MC = 0 and FR = 0] per figure P-3A [MLmax]:

$$\begin{aligned}
 &= \text{Long. moment nomogram limit value} / \text{Long. moment multiplier} \\
 &= 0.742 / 0.192E-04 \\
 &= 0.38645E+05 \text{ ft.lb. } [0.52394E+05 \text{ N.m.}]
 \end{aligned}$$

Negative Long. moment limit [ML = 0 and MC = 0] per figure P-3A [MLmin]:

$$\begin{aligned}
 &= - \text{Radial Force nomogram limit value} / \text{Long. moment multiplier} \\
 &= -0.456 / 0.192E-04
 \end{aligned}$$



$$= -.23775E+05 \text{ ft.lb. } [-0.32233E+05 \text{ N.m.}]$$

Circ. moment limit [ML = 0 and FR = 0] per figure P-3B [MCmax]:

$$= \text{Circ. moment nomogram limit value} / \text{Circ. moment multiplier}$$

$$= 0.599/0.675E-05$$

$$= 0.88746E+05 \text{ ft.lb. } [0.12032E+06 \text{ N.m.}]$$

-----

**Minimum Nozzle Distances per API 650 Table 5.6b:**

Min. distance from bottom of tank to center of regular nozzle: 450.850 mm.

Min. distance from bottom of tank to center of low nozzle: 342.900 mm.

Actual distance from bottom of tank to center of nozzle: 455.000 mm.

**Nozzle stiffness coefficients per P.2.4:**

Outside radius of nozzle [a]:

$$= D / 2$$

$$= 12.7/2$$

$$= 6.4 \text{ in. } [323.8 \text{ mm.}]$$

Nominal tank radius [R]:

$$= \text{Nominal tank diameter} / 2$$

$$= 1811.0/2$$

$$= 905.5 \text{ in. } [46000.0 \text{ mm.}]$$

L / 2a coefficient:

$$= L / 2 * a$$

$$= 17.913/2 * 6.374$$

$$= 1.4$$

**As  $1.0 < L/2a < 1.5$ , interpolate between both sets of curves.**

a / R coefficient:

$$= a / R$$

$$= 6.4/905.512$$

$$= 0.007$$

R / t coefficient:

$$= R / t$$

$$= 905.512/1.153$$

$$= 785.1$$

Interpolated values from the figure per P-2A and P-2D [KR/E(2a)]:  
 = 0.516E-03

Interpolated values from the figure per P-2B and P-2E [KL/E(2a)^3]:  
 = 0.983E-03

Interpolated values from the figure P-2C and P-2F [KC/E(2a)^3]:  
 = 0.131E-02

Stiffness coefficient for the radial thrust load per P.2.9.2.1 [KR]:  
 = Coeff. from graph \* E \* 2 \* a  
 = 0.516E-03 \* 28863168 \* 2 \* 6.374  
 = 0.18982E+06 lbf./in. [0.33242E+06 N./cm.]

Stiffness coefficient for the longitudinal moment per P.2.9.2.1 [KL]:  
 = Coeff. from graph \* E \* ( 2.0 \* a )^3  
 = 0.983E-03 \* 28863168 \* ( 2.0 \* 6.374 )^3  
 = 0.10255E+07 in.lbf./deg [0.11586E+06 N.m./deg]

Stiffness coefficient for the circumferential moment per P.2.9.2.1 [KC]:  
 = Coeff. from graph \* E \* ( 2 \* a )^3  
 = 0.131E-02 \* 28863168 \* ( 2 \* 6.374 )^3  
 = 0.13703E+07 in.lbf./deg [0.15482E+06 N.m./deg]

Characteristic parameter per P.2.3 [beta]:  
 = 1.285 / (Rt)^0.5  
 = 1.285/(905.512 \* 1.153 )^0.5  
 = 0.39762E-01 1/in. [0.15654E-02 1/mm.]

Unrestrained radial growth of the shell per P.2.5.1 [W]:  
 = (0.036\*G\*H\*R^2)/Et  
 \* [1-(e^-(beta\*L)) \* cos(beta\*L) - (L/H)]  
 + alpha \* R \* delta[T]  
 = (0.036\*0.870 \*444.291 \*905.512^2)/28863168 \*1.153  
 \* [1-(e^-(0.040 \*17.913 )) \* cos(0.040 \*17.913 ) - (17.913/444.29 )]  
 + 0.667E+01 \* 905.512 \* 116.991  
 = 706299.43750 in. [17940006.00000 mm.]

Unrestrained shell rotation of the shell per P.2.5.2 [theta]:  
 = (0.036\*G\*H\*R^2)/E\*t  
 \* [(1/H)-(beta\*e^-(beta\*L))  
 \* [cos(beta\*L)+sin(beta\*L)]]  
 = (0.036\*0.870 \*444.291 \*905.512^2)/28863168 \*1.153



$$\begin{aligned}
 & * [(1/444.291) - (0.040 * e^{-(0.040 * 17.913)})] \\
 & * [\cos(0.040 * 17.913) + \sin(0.040 * 17.913)] \\
 & = -0.49602E+00 \text{ deg}
 \end{aligned}$$

Value of lamda per P.2.3 [lamda]:

$$\begin{aligned}
 & = a / (Rt)^{0.5} \\
 & = 6.374 / (905.512 * 1.153)^{0.5} \\
 & = 0.197
 \end{aligned}$$

Coefficient XA per P.2.3:

$$\begin{aligned}
 & = L + a \\
 & = 17.913 + 6.374 \\
 & = 24.287 \text{ in. [616.900 mm.]}
 \end{aligned}$$

Coefficient XB per P.2.3:

$$\begin{aligned}
 & = L - a \\
 & = 17.913 - 6.374 \\
 & = 11.539 \text{ in. [293.100 mm.]}
 \end{aligned}$$

Coefficient XC per P.2.3:

$$\begin{aligned}
 & = L \\
 & = 17.913 \text{ in. [455.000 mm.]}
 \end{aligned}$$

Coefficients YF and YL from figure P-4A based on lamda:

$$\begin{aligned}
 YF & = 2.425 \\
 YL & = 10.614
 \end{aligned}$$

Coefficient YC from figure P-4B based on lamda:

$$YC = 28.816$$

Pressure end load on the opening per P.2.3:

$$\begin{aligned}
 & = \pi * a^2 * P \\
 & = 3.1415 * 6.374^2 * 13.395 \\
 & = 1709.744 \text{ lbf. [7604.939 N.]}
 \end{aligned}$$

Radial force nomogram limit values per figure P-3A:

$$\begin{aligned}
 & = \max[(1 - 0.75) (XA / (Rt)^{0.5}), 0.1] \\
 & = \max[(1 - 0.75) (24.287 / (905.512 * 1.153)^{0.5}), 0.1] \\
 & = 0.436
 \end{aligned}$$

Longitudinal nomogram limit values per figure P-3A:

$$\begin{aligned}
 & = \max[(1 - 0.75) (XB / (Rt)^{0.5}), 0.1] \\
 & = \max[(1 - 0.75) (11.539 / (905.512 * 1.153)^{0.5}), 0.1] \\
 & = 0.732
 \end{aligned}$$



Circumferential moment nomogram limit value per figure P-3B:

$$\begin{aligned}
 &= \max[(1 - 0.75)(XC / (Rt)^{0.5}), 0.1] \\
 &= \max[(1 - 0.75)(17.913/(905.512 * 1.153)^{0.5}), 0.1] \\
 &= 0.584
 \end{aligned}$$

Radial force multiplier per figure P-3A:

$$\begin{aligned}
 &= \lambda / (2 * YF * FP) \\
 &= 0.197 / (2 * 2.425 * 1709.744) \\
 &= 0.23787E-04 \text{ 1/lbf. } [0.53479E-05 \text{ 1/N.}]
 \end{aligned}$$

Longitudinal moment multiplier per figure P-3A:

$$\begin{aligned}
 &= \lambda / (a / 12.0 * YL * FP) \\
 &= 0.197 / (6.374/12.0 * 10.614 * 1709.744) \\
 &= 0.20461E-04 \text{ 1/ft.lb. } [0.15092E-04 \text{ 1/N.m.}]
 \end{aligned}$$

Circumferential moment multiplier per figure P-3B:

$$\begin{aligned}
 &= \lambda / (a * 12.0 * YC * FP) \\
 &= 0.197 / (6.374 * 12.0 * 28.816 * 1709.744) \\
 &= 0.75366E-05 \text{ 1/ft.lb. } [0.55589E-05 \text{ 1/N.m.}]
 \end{aligned}$$

Radial force limit [ML = 0 and MC = 0] per figure P-3A [FRmax]:

$$\begin{aligned}
 &= \text{Radial force nomogram limit value} / \text{Radial force multp.} \\
 &= 0.436 / 0.238E-04 \\
 &= 0.18344E+05 \text{ lbf. } [0.81593E+05 \text{ N.}]
 \end{aligned}$$

Positive Long. moment limit [MC = 0 and FR = 0] per figure P-3A [MLmax]:

$$\begin{aligned}
 &= \text{Long. moment nomogram limit value} / \text{Long. moment multiplier} \\
 &= 0.732 / 0.205E-04 \\
 &= 0.35786E+05 \text{ ft.lb. } [0.48517E+05 \text{ N.m.}]
 \end{aligned}$$

Negative Long. moment limit [ML = 0 and MC = 0] per figure P-3A [MLmin]:

$$\begin{aligned}
 &= - \text{Radial Force nomogram limit value} / \text{Long. moment multiplier} \\
 &= -0.436 / 0.205E-04 \\
 &= -.21326E+05 \text{ ft.lb. } [-0.28913E+05 \text{ N.m.}]
 \end{aligned}$$

Circ. moment limit [ML = 0 and FR = 0] per figure P-3B [MCmax]:

$$\begin{aligned}
 &= \text{Circ. moment nomogram limit value} / \text{Circ. moment multiplier} \\
 &= 0.584 / 0.754E-05 \\
 &= 0.77525E+05 \text{ ft.lb. } [0.10511E+06 \text{ N.m.}]
 \end{aligned}$$

-----  
**Minimum Nozzle Distances per API 650 Table 5.6b:**

Min. distance from bottom of tank to center of regular nozzle: 450.850 mm.



Min. distance from bottom of tank to center of low nozzle: 342.900 mm.  
Actual distance from bottom of tank to center of nozzle: 455.000 mm.

**Nozzle stiffness coefficients per P.2.4:**

Outside radius of nozzle [a]:

$$\begin{aligned} &= D / 2 \\ &= 12.7/2 \\ &= 6.4 \text{ in. } [323.8 \text{ mm.}] \end{aligned}$$

Nominal tank radius [R]:

$$\begin{aligned} &= \text{Nominal tank diameter} / 2 \\ &= 1811.0/2 \\ &= 905.5 \text{ in. } [46000.0 \text{ mm.}] \end{aligned}$$

L / 2a coefficient:

$$\begin{aligned} &= L / 2 * a \\ &= 17.913/2 * 6.374 \\ &= 1.4 \end{aligned}$$

**As  $1.0 < L/2a < 1.5$ , interpolate between both sets of curves.**

a / R coefficient:

$$\begin{aligned} &= a / R \\ &= 6.4/905.512 \\ &= 0.007 \end{aligned}$$

R / t coefficient:

$$\begin{aligned} &= R / t \\ &= 905.512/1.457 \\ &= 621.6 \end{aligned}$$

Interpolated values from the figure per P-2A and P-2D [KR/E(2a)]:

$$= 0.843E-03$$

Interpolated values from the figure per P-2B and P-2E [KL/E(2a)^3]:

$$= 0.161E-02$$

Interpolated values from the figure P-2C and P-2F [KC/E(2a)^3]:

$$= 0.244E-02$$

Stiffness coefficient for the radial thrust load per P.2.9.2.1 [KR]:



$$\begin{aligned}
 &= \text{Coeff. from graph} * E * 2 * a \\
 &= 0.843\text{E-}03 * 28863168 * 2 * 6.374 \\
 &= 0.31017\text{E+}06 \text{ lbf./in. } [0.54317\text{E+}06 \text{ N./cm.}]
 \end{aligned}$$

Stiffness coefficient for the longitudinal moment per P.2.9.2.1 [KL]:

$$\begin{aligned}
 &= \text{Coeff. from graph} * E * ( 2.0 * a )^3 \\
 &= 0.161\text{E-}02 * 28863168 * ( 2.0 * 6.374 )^3 \\
 &= 0.16802\text{E+}07 \text{ in.lbf./deg } [0.18983\text{E+}06 \text{ N.m./deg}]
 \end{aligned}$$

Stiffness coefficient for the circumferential moment per P.2.9.2.1 [KC]:

$$\begin{aligned}
 &= \text{Coeff. from graph} * E * ( 2 * a )^3 \\
 &= 0.244\text{E-}02 * 28863168 * ( 2 * 6.374 )^3 \\
 &= 0.25454\text{E+}07 \text{ in.lbf./deg } [0.28758\text{E+}06 \text{ N.m./deg}]
 \end{aligned}$$

Characteristic parameter per P.2.3 [beta]:

$$\begin{aligned}
 &= 1.285 / (Rt)^{0.5} \\
 &= 1.285 / (905.512 * 1.457 )^{0.5} \\
 &= 0.35381\text{E-}01 \text{ 1/in. } [0.13930\text{E-}02 \text{ 1/mm.}]
 \end{aligned}$$

Unrestrained radial growth of the shell per P.2.5.1 [W]:

$$\begin{aligned}
 &= (0.036 * G * H * R^2) / Et \\
 &\quad * [1 - (e^{-(\beta * L)}) * \cos(\beta * L) - (L/H)] \\
 &\quad + \alpha * R * \delta [T] \\
 &= (0.036 * 0.870 * 444.291 * 905.512^2) / 28863168 * 1.457 \\
 &\quad * [1 - (e^{-(0.035 * 17.913)}) * \cos(0.035 * 17.913) - (17.913 / 444.29)] \\
 &\quad + 0.667\text{E+}01 * 905.512 * 116.991 \\
 &= 706299.37500 \text{ in. } [17940004.00000 \text{ mm.}]
 \end{aligned}$$

Unrestrained shell rotation of the shell per P.2.5.2 [theta]:

$$\begin{aligned}
 &= (0.036 * G * H * R^2) / E * t \\
 &\quad * [(1/H) - (\beta * e^{-(\beta * L)}) \\
 &\quad * [\cos(\beta * L) + \sin(\beta * L)]] \\
 &= (0.036 * 0.870 * 444.291 * 905.512^2) / 28863168 * 1.457 \\
 &\quad * [(1/444.291) - (0.035 * e^{-(0.035 * 17.913)}) \\
 &\quad * [\cos(0.035 * 17.913) + \sin(0.035 * 17.913)]] \\
 &= -0.37305\text{E+}00 \text{ deg}
 \end{aligned}$$

Value of lamda per P.2.3 [lamda]:

$$\begin{aligned}
 &= a / (Rt)^{0.5} \\
 &= 6.374 / (905.512 * 1.457 )^{0.5} \\
 &= 0.176
 \end{aligned}$$

Coefficient XA per P.2.3:

$$= L + a$$



$$= 17.913 + 6.374$$

$$= 24.287 \text{ in. [616.900 mm.]}$$

Coefficient XB per P.2.3:

$$= L - a$$

$$= 17.913 - 6.374$$

$$= 11.539 \text{ in. [293.100 mm.]}$$

Coefficient XC per P.2.3:

$$= L$$

$$= 17.913 \text{ in. [455.000 mm.]}$$

Coefficients YF and YL from figure P-4A based on lamda:

$$YF = 2.643$$

$$YL = 11.623$$

Coefficient YC from figure P-4B based on lamda:

$$YC = 36.663$$

Pressure end load on the opening per P.2.3:

$$= \pi * a^2 * P$$

$$= 3.1415 * 6.374^2 * 13.395$$

$$= 1709.744 \text{ lbf. [7604.939 N.]}$$

Radial force nomogram limit values per figure P-3A:

$$= \max[(1 - 0.75) (XA / (Rt)^{0.5}), 0.1]$$

$$= \max[(1 - 0.75) (24.287 / (905.512 * 1.457)^{0.5}), 0.1]$$

$$= 0.498$$

Longitudinal nomogram limit values per figure P-3A:

$$= \max[(1 - 0.75) (XB / (Rt)^{0.5}), 0.1]$$

$$= \max[(1 - 0.75) (11.539 / (905.512 * 1.457)^{0.5}), 0.1]$$

$$= 0.762$$

Circumferential moment nomogram limit value per figure P-3B:

$$= \max[(1 - 0.75) (XC / (Rt)^{0.5}), 0.1]$$

$$= \max[(1 - 0.75) (17.913 / (905.512 * 1.457)^{0.5}), 0.1]$$

$$= 0.630$$

Radial force multiplier per figure P-3A:

$$= \text{lamda} / (2 * YF * FP)$$

$$= 0.176 / (2 * 2.643 * 1709.744)$$

$$= 0.19422E-04 \text{ 1/lbf. [0.43664E-05 1/N.]}$$



Longitudinal moment multiplier per figure P-3A:

$$\begin{aligned}
 &= \text{lamda} / (a / 12.0 * YL * FP) \\
 &= 0.176 / (6.374 / 12.0 * 11.623 * 1709.744 ) \\
 &= 0.16627E-04 \text{ 1/ft.lb. } [0.12264E-04 \text{ 1/N.m.}]
 \end{aligned}$$

Circumferential moment multiplier per figure P-3B:

$$\begin{aligned}
 &= \text{lamda} / (a * 12.0 * YC * FP) \\
 &= 0.176 / (6.374 * 12.0 * 36.663 * 1709.744 ) \\
 &= 0.52710E-05 \text{ 1/ft.lb. } [0.38878E-05 \text{ 1/N.m.}]
 \end{aligned}$$

Radial force limit [ML = 0 and MC = 0] per figure P-3A [FRmax]:

$$\begin{aligned}
 &= \text{Radial force nomogram limit value} / \text{Radial force multp.} \\
 &= 0.498 / 0.194E-04 \\
 &= 0.25665E+05 \text{ lbf. } [0.11416E+06 \text{ N.}]
 \end{aligned}$$

Positive Long. moment limit [MC = 0 and FR = 0] per figure P-3A [MLmax]:

$$\begin{aligned}
 &= \text{Long. moment nomogram limit value} / \text{Long. moment multiplier} \\
 &= 0.762 / 0.166E-04 \\
 &= 0.45813E+05 \text{ ft.lb. } [0.62111E+05 \text{ N.m.}]
 \end{aligned}$$

Negative Long. moment limit [ML = 0 and MC = 0] per figure P-3A [MLmin]:

$$\begin{aligned}
 &= - \text{Radial Force nomogram limit value} / \text{Long. moment multiplier} \\
 &= -0.498 / 0.166E-04 \\
 &= -.29979E+05 \text{ ft.lb. } [-0.40645E+05 \text{ N.m.}]
 \end{aligned}$$

Circ. moment limit [ML = 0 and FR = 0] per figure P-3B [MCmax]:

$$\begin{aligned}
 &= \text{Circ. moment nomogram limit value} / \text{Circ. moment multiplier} \\
 &= 0.630 / 0.527E-05 \\
 &= 0.11954E+06 \text{ ft.lb. } [0.16206E+06 \text{ N.m.}]
 \end{aligned}$$

### Cálculo de viento.

#### **Wind Load Calculations:**

Wind velocity factor 5.2.1 [Vfact]:

$$\begin{aligned}
 &= ( \text{Wind Velocity} / 120 )^2 \\
 &= ( 155.3 / 120 )^2 \\
 &= 1.676
 \end{aligned}$$

Vertical projected wind area of tank [VArea]:

$$\begin{aligned}
 &= \text{Tank Height} * \text{Insulated Tank Diameter} \\
 &= 39.37 * 150.92 \\
 &= 5941.679 \text{ ft}^2 [552.000 \text{ m.}^2]
 \end{aligned}$$



Velocity pressure per 5.9.7.1 [p]:

$$\begin{aligned}
 &= 0.00256 * K_z * K_{zt} * k_d * V^2 * I * G + 5.0 \\
 &= 0.00256 * 1.040 * 1.000 * 0.950 * 155.333^2 * 1.000 * 0.850 + 5.0 \\
 &= 56.873 \text{ psf} \quad [2723.091 \text{ N/M}^2]
 \end{aligned}$$

Wind moment on shell [Moment]:

$$\begin{aligned}
 &= \text{Wind Pressure} * \text{Wind Area} * \text{Tank Height}/2 \\
 &= 56.873 * 5941.7 * 39.37/2 \\
 &= 0.66520\text{E}+07 \text{ ft.lb.} \quad [0.90185\text{E}+07 \text{ N.m.}]
 \end{aligned}$$

**Vertical projected wind area of Dome/Umbrella roof:**

Roof Radius + Insulation (if any):

$$\begin{aligned}
 &= 181.102 \\
 &= 181.102 \text{ ft.} \quad [55.200 \text{ m.}]
 \end{aligned}$$

Half apex angle between tank and apex radii:

$$\begin{aligned}
 &= \text{asin}( D / ( 2 * 1/2 \text{ Apex Angle} ) ) \\
 &= \text{asin}( 150.919 / ( 2 * 181.102 ) ) \\
 &= 24.6 \text{ deg.}
 \end{aligned}$$

Area of the sector:

$$\begin{aligned}
 &= 2 * \text{Half angle} / ( 2 \text{ pi} ) * ( \text{pi} * (1/2 \text{ Apex Angle})^2 ) \\
 &= 2 * 0.430 / ( 2 * 3.142 ) * ( 3.142 * 181.102^2 ) \\
 &= 14095.802 \text{ ft.}^2 \quad [1309.543 \text{ m.}^2]
 \end{aligned}$$

Height from apex to chord:

$$\begin{aligned}
 &= 1/2 \text{ Apex Angle} * \text{cos}(\text{Half angle}) \\
 &= 181.102 * \text{cos}(0.430 ) \\
 &= 164.633 \text{ ft.} \quad [50.180 \text{ m.}]
 \end{aligned}$$

Area of triangle below the chord line:

$$\begin{aligned}
 &= \text{Apex height} * D/2 \\
 &= 164.633 * 150.919/2 \\
 &= 12423.078 \text{ ft.}^2 \quad [1154.142 \text{ m.}^2]
 \end{aligned}$$

Dome/Umbrella roof area:

$$\begin{aligned}
 &= \text{Sector area} - \text{Triangle area} \\
 &= 14095.802 - 12423.078 \\
 &= 1672.724 \text{ ft.}^2 \quad [155.401 \text{ m.}^2]
 \end{aligned}$$

Area Exposed to Wind:

$$= \text{Wind area of tank} + \text{Wind area of roof}$$



$$= 5941.679 + 1672.724$$

$$= 7614.402 \text{ ft.}^2 \quad [707.401 \text{ m.}^2]$$

Wind Moment at the base including the dome/umbrella roof [Total Moment]:

$$= \text{Moment} + (\text{Wind P} * \text{Roof Area}(\text{Tank Height} + \text{dome Height}/3))$$

$$= 6652006 + (56.873 * 7614.4 (39.4 + 16.47/3))$$

$$= 10919668.000 \text{ ft.lb.} \quad [14804450.000 \text{ N.m.}]$$

Wind shear force acting on the tank:

$$= \text{Wind Pressure} * (\text{tank area} + \text{roof area})$$

$$= 56.873 * 7614.4$$

$$= 0.43305\text{E}+06 \text{ lbf.} \quad [0.19262\text{E}+07 \text{ N.}]$$

Moment about shell-to-bottom joint [MDL]:

$$= (\text{Shell Weight} + \text{Attachement Weight} + \text{Framing Weight} * \% )D/2$$

$$= (222084.9 + 0.0 + 142198.1 * 0.20)150.9/2$$

$$= 18904408.0 \text{ ft.lb} \quad [25629840.0 \text{ N.m.}]$$

Resisting Weight of Fluid [WL]:

$$= \min(5.6 * t_b * \sqrt{F_{by} * H * \min(0.7, G)}, 0.45 * H * D)$$

$$= \min(5.6 * 0.3150 * \sqrt{39886.3 * 37.02 * \min(0.7, 0.870)}, 0.45 * 37.0 * 150.92)$$

$$= \min(1793.3, 2514.4)$$

$$= 1793.3 \text{ lbf/ft} \quad [26.2 \text{ N./mm.}]$$

Moment from Fluid Weight [MF]:

$$= WL * (\text{PI} * D) * (D / 2)$$

$$= 1793.3 * (3.1416 * 150.92) * (150.92/2)$$

$$= 64158480.0 \text{ ft.lb} \quad [86983504.0 \text{ N.m.}]$$

Moment from Design Internal Pressure [MPI]:

$$= \text{Design Pressure} * \pi(\text{Diameter in inches} / 2)^2 * (D / 2)$$

$$= 0.0000 * 3.1416 (1811.02/2)^2 * (150.92/2)$$

$$= 0.0 \text{ ft.lb} \quad [0.0 \text{ N.m.}]$$

Design Pressure per F.4.1 [P]:

$$= (0.962 * A * F_y * M_{\text{fact}} * \tan(\theta)) / (D^2) + 0.245 * \text{DLR} / D^2$$

$$= (0.962 * 6.270 * 38400.0 * 1.000 * \tan(24.62)) / (150.9^2) + 0.245 * 303173 / 150.9^2$$

$$= 7.922 \text{ in. of water} \quad [201.224 \text{ mm. of water}]$$

$$= 0.286 \text{ psi} \quad [1.972 \text{ KPa}]$$

Moment about shell-to-bottom joint [MWS]:

$$= P_{ws} * D * H^2/2$$

$$= 18 * V_{\text{fact}} * (D + \text{Insulation}) * H^2/2$$



$$= 18 * 1.6756 (150.9 + 0.0) * 39.4^2/2$$

$$= 3527622.8 \text{ ft.lb} \quad [4782609.5 \text{ N.m.}]$$

Moment about shell-to-bottom joint [MW]:

$$= \text{MWS} + \text{Wind Uplift} * \text{VArea} * D / 2$$

$$= 3527622 + 0.3491 * 2575954 * 150.9/2$$

$$= 71381392.0 \text{ ft.lb} \quad [96776040.0 \text{ N.m.}]$$

Moment about shell-to-bottom joint [MDLR]:

$$= (\text{Roof Weight}) D/2$$

$$= (160975.0) 150.9/2$$

$$= 12147068.0 \text{ ft.lb} \quad [16468509.0 \text{ N.m.}]$$

*Warning: The following API 650 Section 5.11.2.1 criteria were not met:*

- 1)  $0.6MW + MPI < MDL/1.5 + MDLR$
- 2)  $MW + FP(MPI) < (MDL + MF)/2 + MDLR$

**Note: Anchorage is required for this design.**

### Cálculo por presión interna.

**Determine required thickness per the selected Method:**

Shell Course Thickness per the One Foot Method:

#### Required Thickness for Course # 1

Required thickness based on the 1ft method per 5.6.3.2, Operating [td]:

$$= 2.6D (H - 1) G/Sd$$

$$= 2.6 * 150.919 (37.02 - 1) 0.870/27200.0$$

$$= 0.452 \text{ in.} \quad [11.484 \text{ mm.}]$$

Minimum thickness per 5.6.1.1 : = 0.570 in. [14.484 mm.]

Final Selected Thickness including corrosion and other allowances:

$$= 0.57024 \text{ in.} \quad [14.48406 \text{ mm.}]$$

Required thickness per 5.6.3.2, Hydrotest [tt]:

$$= 2.6D (H - 1) /St$$

$$= 2.6 * 150.919 (37.02 - 1) /29200.0$$

$$= 0.48409 \text{ in.} \quad [12.29596 \text{ mm.}]$$



Minimum thickness per 5.6.1.1 : = 0.484 in. [12.296 mm.]

Final Selected Thickness including other Code allowances:  
= 0.48409 in. [12.29596 mm.]

**Required Thickness for Course # 2**

Required thickness based on the 1ft method per 5.6.3.2, Operating [td]:  
=  $2.6D( H - 1 )G/Sd$   
=  $2.6 * 150.919 ( 29.15 - 1 )0.870/27200.0$   
= 0.353 in. [8.974 mm.]

Minimum thickness per 5.6.1.1 : = 0.471 in. [11.974 mm.]

Final Selected Thickness including corrosion and other allowances:  
= 0.47141 in. [11.97393 mm.]

Required thickness per 5.6.3.2, Hydrotest [tt]:  
=  $2.6D( H - 1 )/St$   
=  $2.6 * 150.919 ( 29.15 - 1 )/29200.0$   
= 0.37828 in. [9.60837 mm.]

Minimum thickness per 5.6.1.1 : = 0.378 in. [9.608 mm.]

Final Selected Thickness including other Code allowances:  
= 0.37828 in. [9.60837 mm.]

**Required Thickness for Course # 3**

Required thickness based on the 1ft method per 5.6.3.2, Operating [td]:  
=  $2.6D( H - 1 )G/Sd$   
=  $2.6 * 150.919 ( 21.28 - 1 )0.870/27200.0$   
= 0.254 in. [6.464 mm.]

Minimum thickness per 5.6.1.1 : = 0.373 in. [9.464 mm.]

Final Selected Thickness including corrosion and other allowances:  
= 0.37259 in. [9.46380 mm.]

Required thickness per 5.6.3.2, Hydrotest [tt]:  
=  $2.6D( H - 1 )/St$   
=  $2.6 * 150.919 ( 21.28 - 1 )/29200.0$   
= 0.27247 in. [6.92077 mm.]



Minimum thickness per 5.6.1.1 : = 0.315 in. [8.000 mm.]

Final Selected Thickness including other Code allowances:  
= 0.31496 in. [8.00000 mm.]

**Required Thickness for Course # 4**

Required thickness based on the 1ft method per 5.6.3.2, Operating [td]:  
=  $2.6D(H - 1)G/Sd$   
=  $2.6 * 150.919 ( 13.40 - 1 )0.870/27200.0$   
= 0.156 in. [3.954 mm.]

Minimum thickness per 5.6.1.1 : = 0.315 in. [8.000 mm.]

Final Selected Thickness including corrosion and other allowances:  
= 0.31496 in. [8.00000 mm.]

Required thickness per 5.6.3.2, Hydrotest [tt]:  
=  $2.6D(H - 1)/St$   
=  $2.6 * 150.919 ( 13.40 - 1 )/29200.0$   
= 0.16666 in. [4.23318 mm.]

Minimum thickness per 5.6.1.1 : = 0.315 in. [8.000 mm.]

Final Selected Thickness including other Code allowances:  
= 0.31496 in. [8.00000 mm.]

**Required Thickness for Course # 5**

Required thickness based on the 1ft method per 5.6.3.2, Operating [td]:  
=  $2.6D(H - 1)G/Sd$   
=  $2.6 * 150.919 ( 5.53 - 1 )0.870/27200.0$   
= 0.057 in. [1.444 mm.]

Minimum thickness per 5.6.1.1 : = 0.315 in. [8.000 mm.]

Final Selected Thickness including corrosion and other allowances:  
= 0.31496 in. [8.00000 mm.]

Required thickness per 5.6.3.2, Hydrotest [tt]:  
=  $2.6D(H - 1)/St$   
=  $2.6 * 150.919 ( 5.53 - 1 )/29200.0$   
= 0.06085 in. [1.54559 mm.]



Minimum thickness per 5.6.1.1 : = 0.315 in. [8.000 mm.]

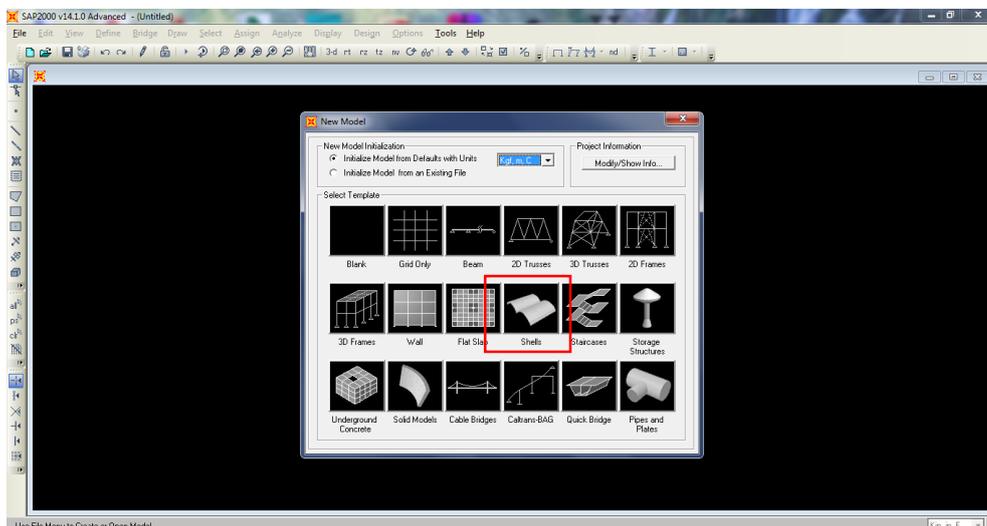
Final Selected Thickness including other Code allowances:  
= 0.31496 in. [8.00000 mm.]



## ANEXO-2: ANÁLISIS ESTRUCTURAL DEL TANQUE MODELADO POR SAP 2000 V14 (Hernández, 2009).

### 1) Geometría de la envolvente del tanque.

Para generar el modelo estructural de la envolvente, se utilizará la plantilla que tiene SAP 2000 por defecto. Luego de cargar el programa, se selecciona como unidad de trabajo **Kgf, m, C**. En la ventana **New Model**, se selecciona la plantilla **Shell** resaltado, como se muestra en la Figura 1.



**Figura 1.** Selección de la plantilla **Shell** desde la ventana **New Model**.

La figura 2 se muestra la plantilla **Shell**, en la cual debemos de ingresar los parámetros geométricos del modelo a analizar, siendo los siguientes:

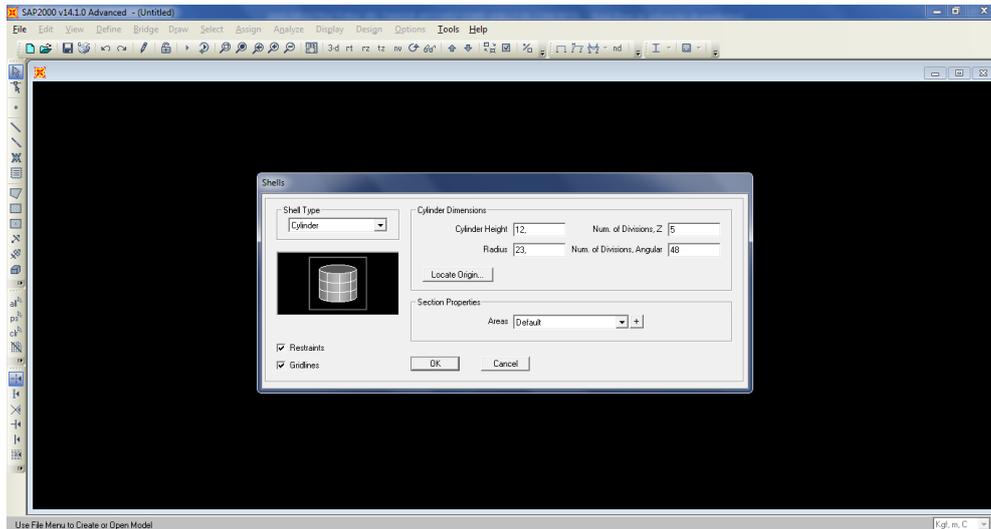
**Cylinder Height:** representa la altura de la envolvente = 12,0

**Radius:** es el radio de circunferencia de la envolvente = 23,0



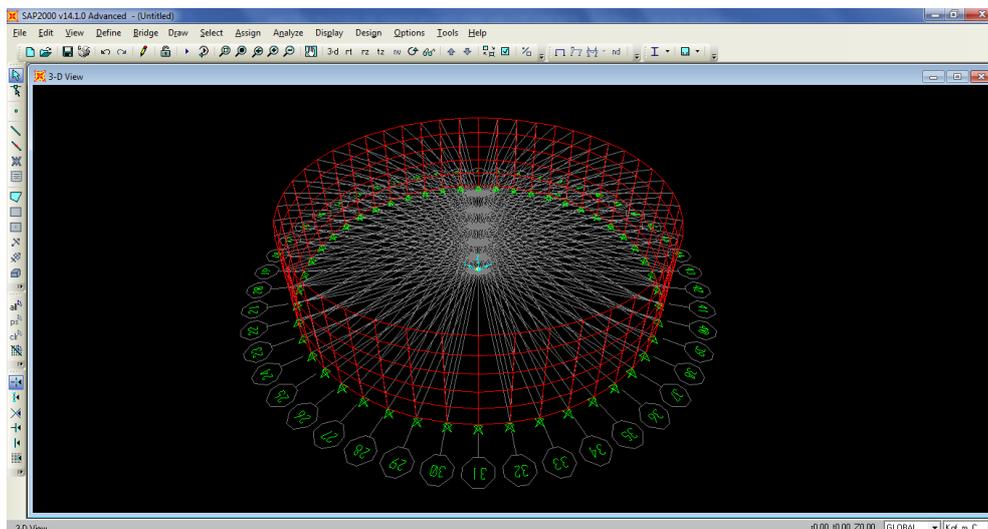
**Num. Of Divisions, Z:** es el número de divisiones verticales en las que se dividirá la malla de elementos **Shell = 5**.

**Num. Of Divisions, Angular:** es el número de divisiones horizontales en las que se dividirá la malla de elementos **Shell = 48**.



**Figura 2.** Selección del cuadro de diálogos **Shell**.

Una vez ingresados los parámetros geométricos del modelo se hace clic en **OK**, donde se obtiene el desarrollo de la envoltente del tanque como es mostrado en la figura 3.

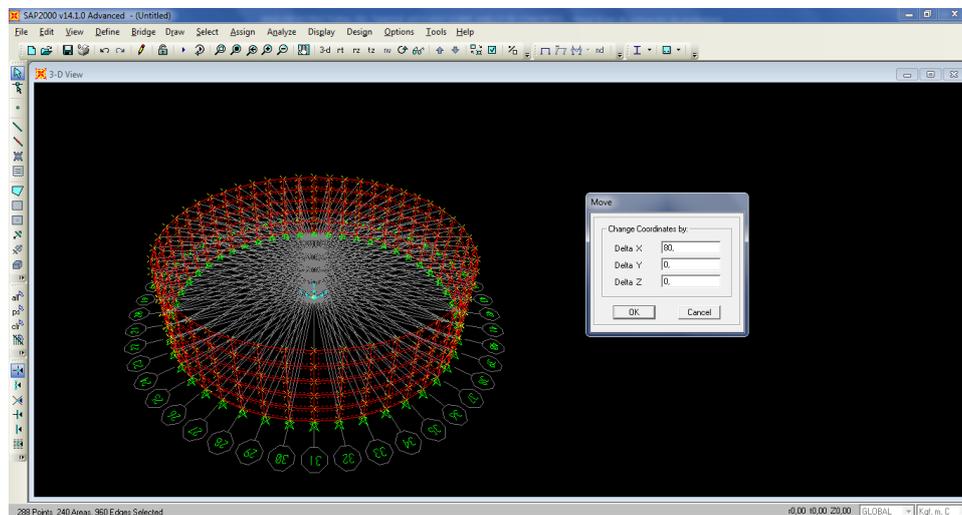


**Figura 3.** Desarrollo de la envolvente del tanque desde el cuadro de diálogos **Shell**.

## 2) Geometría del domo esférico del tanque.

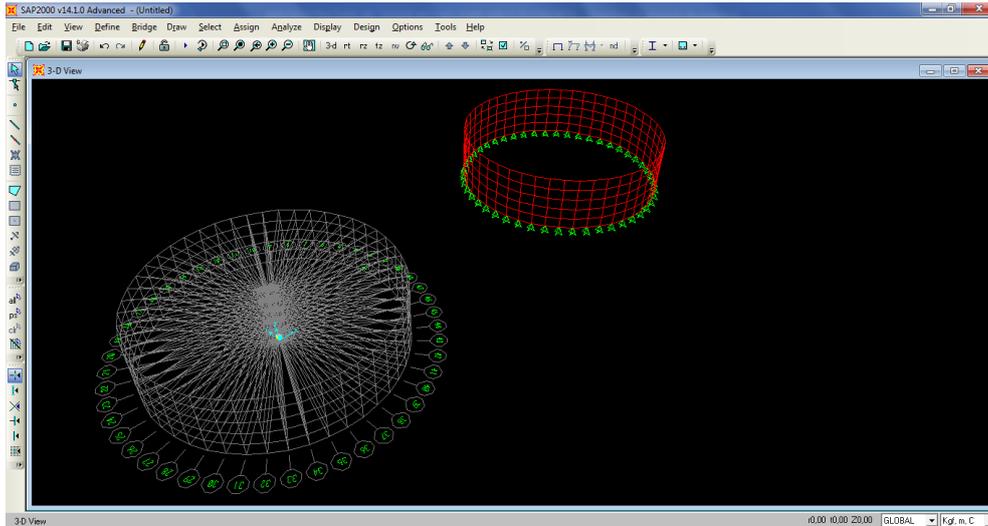
Para generar el modelo estructural del domo esférico, se adiciona desde el mismo modelo estructural del **Shell**.

Para adicionar el domo esférico hay que mover el desarrollo de la envolvente desde su posición. En la barra de menú selecciona **Select** y con la opción **All**, se marca toda la envolvente. Luego de marcada toda la envolvente, se va a la barra de menú **Edit/Move**, aparece una ventana con los tres ejes de coordenadas X, Y y Z. Se selecciona X, dándole un valor de 80, Y=0, Z=0, como se muestra en la figura 4 y se da clic en **OK**. En la figura 5 se ve el desplazamiento de la envolvente desde el modelo.



**Figura 4.** Valor en la dirección X para mover la envolvente desde el modelo **Shell**.





**Figura 5.** Desplazamiento de la envolvente desde el modelo **Shell**.

Luego de haber movido la envolvente desde el modelo, se va la barra de menú **Edit/Add To Model From Template**, se va nuevamente a la plantilla **Shell**. En la opción **Shell Type**, se selecciona la plantilla **Spherical Dome**.

La figura 6 se muestra el cuadro de diálogo del **Spherical Dome**, en la cual debemos de ingresar los parámetros geométricos del modelo a analizar, siendo los siguientes:

**Radius, R:** es el radio de la esfera del domo = 55.2

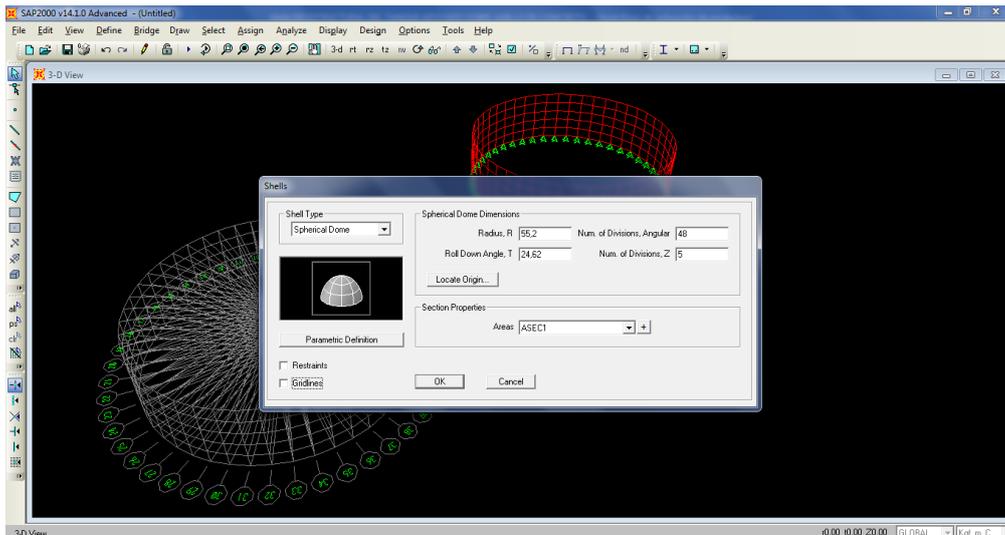
**Roll Down Angle, T:** representa la altura del domo = 24.62°.

**Num. of Divisions, Angular:** es el número de divisiones horizontales en las que se dividirá la malla de elementos **Shell** del domo = 48

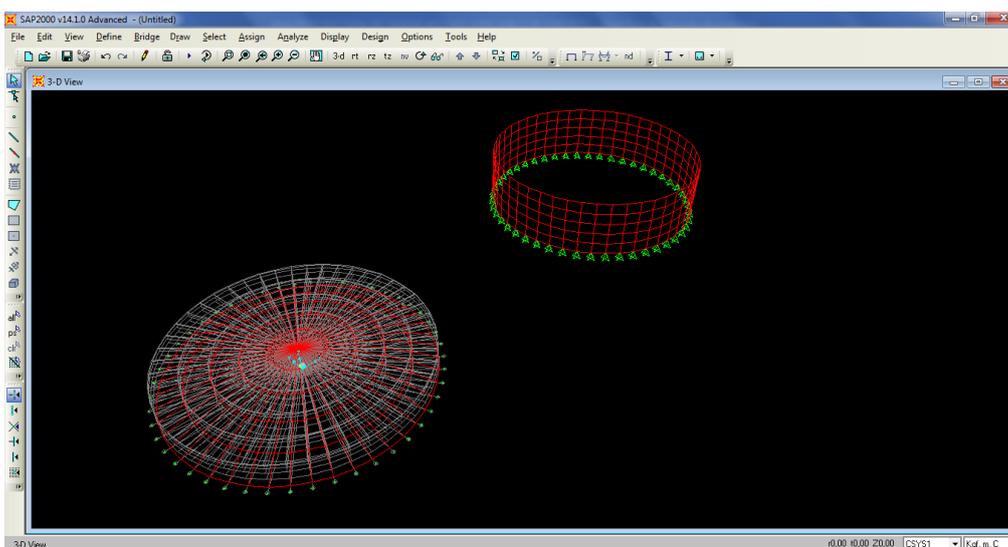
**Num. of Divisions, Z:** es el número de divisiones verticales en las que se dividirá la malla de elementos **Shell** = 5.

Una vez ingresados los parámetros geométricos del modelo se hace clic en **OK**, donde se obtiene el desarrollo del domo esférico del tanque como es mostrado en la figura 7.





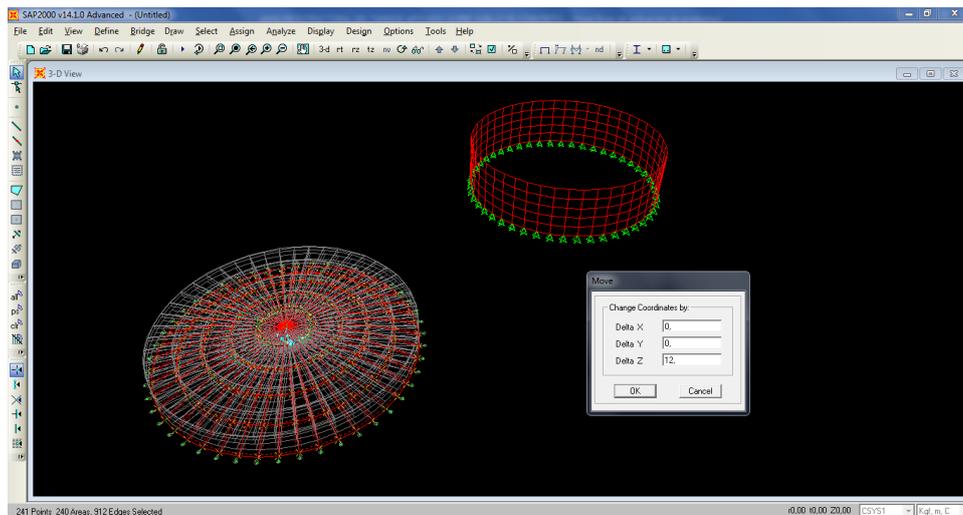
**Figura 6.** Selección del cuadro de diálogos **Spherical Dome**.



**Figura 7.** Desarrollo del domo esférico del tanque desde el cuadro de diálogos **Spherical Dome**.

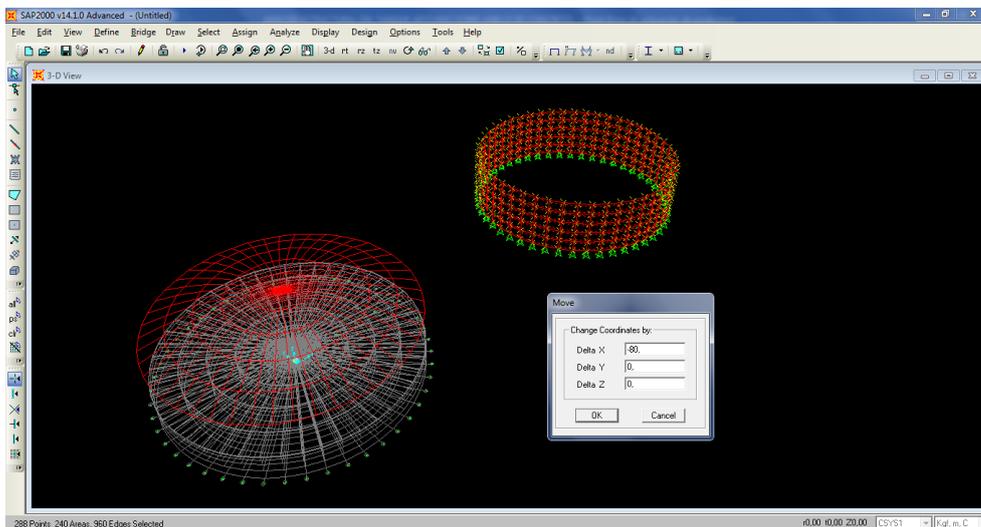
Se selecciona el domo esférico y se va a la barra de menú **Edit/Move**, mostrará el cuadro de movimiento, donde debemos de indicar a que posición vamos a mover. El domo esférico se desplazará 12 metros en la dirección Z como se muestra en la figura 8.





**Figura 8.** Desplazamiento del domo esférico en la dirección Z.

Se selecciona la envolvente y se va a la barra de menú **Edit/Move**, mostrará el cuadro de movimiento, donde debemos de indicar a que posición vamos a mover la envolvente. La envolvente se desplazará -80 metros en la dirección X como se muestra en la figura 9.



**Figura 9.** Desplazamiento de la envolvente en la dirección X.

En la figura 10 se muestra el desarrollo del modelo del tanque a través de la unión de la envolvente y el domo esférico.



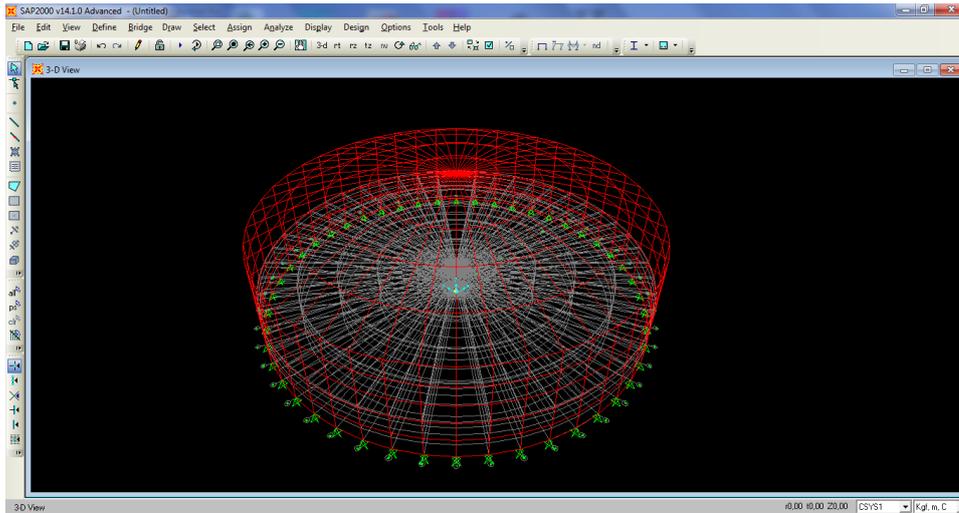


Figura 10.

Desarrollo del modelo del tanque.

Para establecer las nuevas restricciones, se selecciona las restricciones existentes por defecto, luego se va a la barra de menú **Assign/Joint/Restrains**, se seleccionará las nuevas restricciones que tendrá el modelo mostrado en la figura 11.

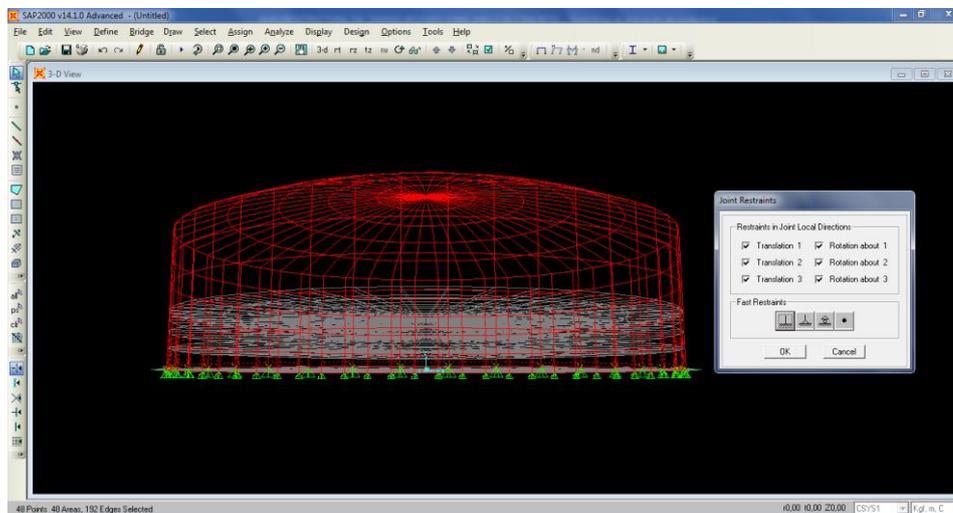


Figura 11. Selección de las restricciones en el modelo del tanque.

### 3) Definir las Propiedades de los tipos de materiales a utilizarse.



Después de haber definido la geometría del modelo del tanque, se definen los materiales a utilizarse tanto para el domo esférico como para la envolvente, siendo aceros estructurales, para ellos hacemos clic en el menú **Define/Material**, se selecciona la opción **Add New Material**, y se establecen los parámetros de los materiales seleccionados, como se muestran en las figuras 12 y 13.

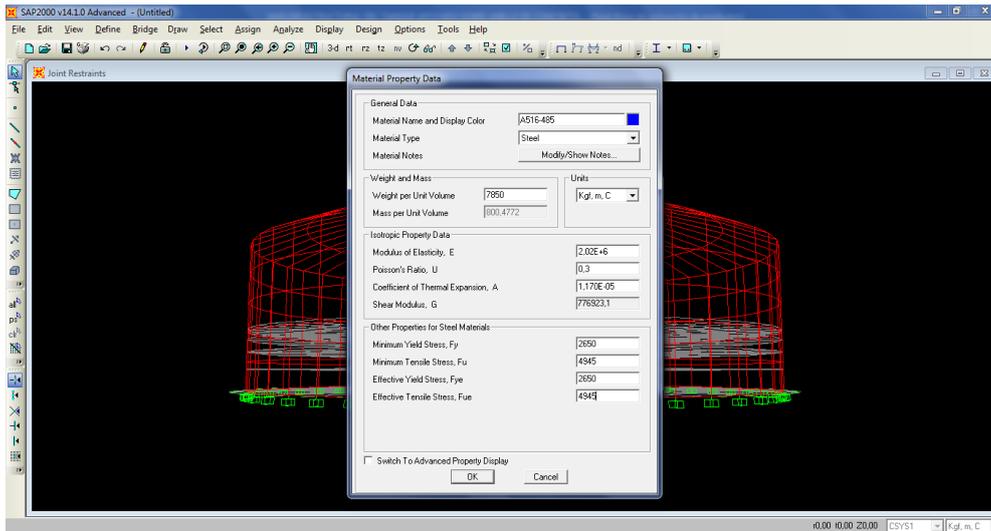


Figura 12. Definición de materiales para la envolvente del tanque.



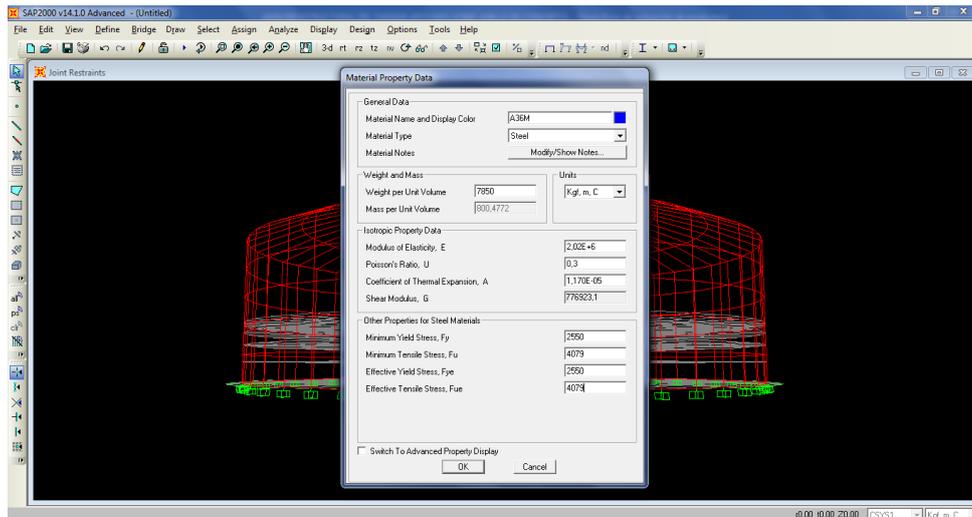


Figura 13. Definición de materiales para el domo esférico del tanque.

#### 4) Definir las secciones de los elementos estructurales.

Para definir las secciones se va al menú **Define/Section Properties/Area Sections**, donde se selecciona la sección **Shell**. Se da un clic en **Add New Section**, seguidamente nos mostrara la ventana de definición de secciones en la cual ingresamos la geometría de la sección a definir, tal como se muestra en la Figura 14.

En la ventana Shell Section Data se configura las secciones que va llevar la envolvente y las placas del domo.

##### a) Tabulación del material de la envolvente.

Anillos.	Material.	Espesores.
C1	S355 J0	Membrane: 0.017 Bending: 0.017
C2	S355 J0	Membrane: 0.014 Bending: 0.014



C3	S355 J0	Membrane: 0.010 Bending: 0.010
C4	S355 J0	Membrane: 0.008 Bending: 0.008
C5	S355 J0	Membrane: 0.008 Bending: 0.008

b) Tabulación del material del domo esférico.

Roof.	Material.	Espesores.
Plate.	S275 J0	Membrane: 0.005 Bending: 0.005

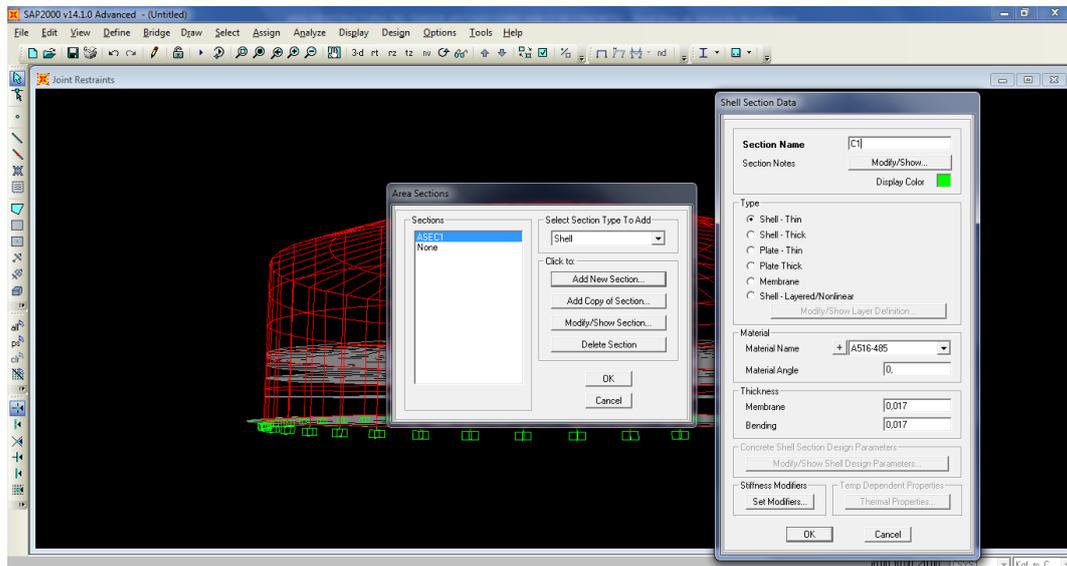
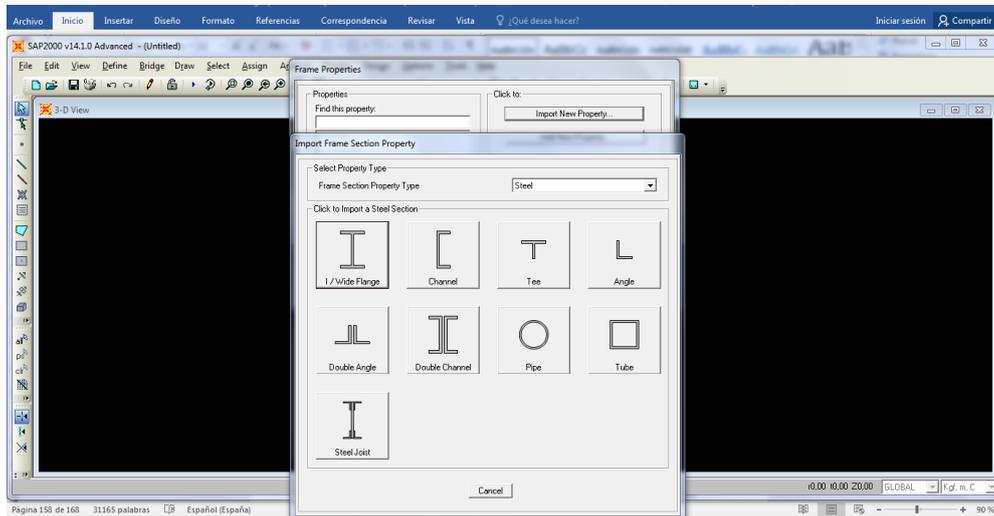


Figura 14. Definición de las áreas de secciones de la envolvente y las placas del domo esférico del tanque.

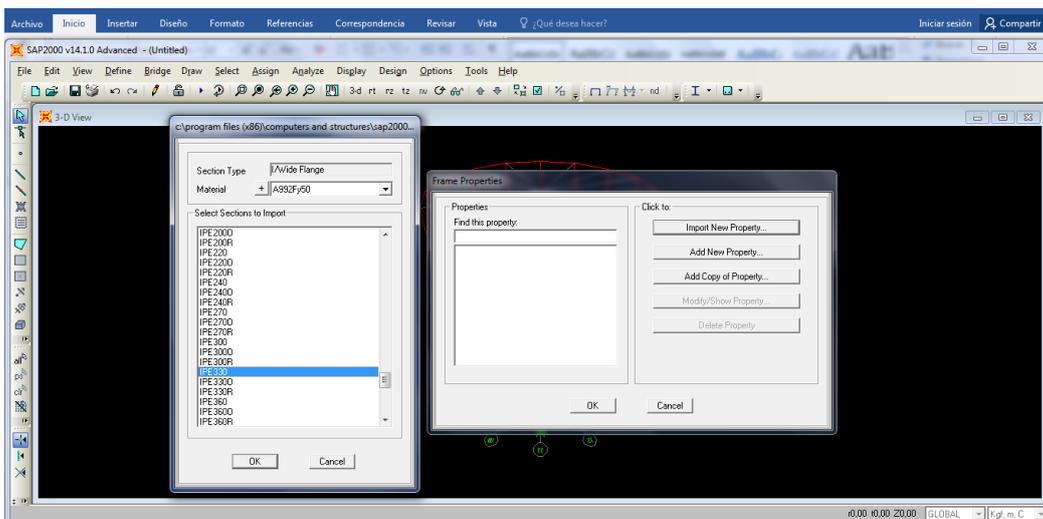


Para definir los perfiles se va al menú **Define/Section Properties/Frame Sections**, donde se selecciona la opción **Import New Property** como se muestra en la figura 15.



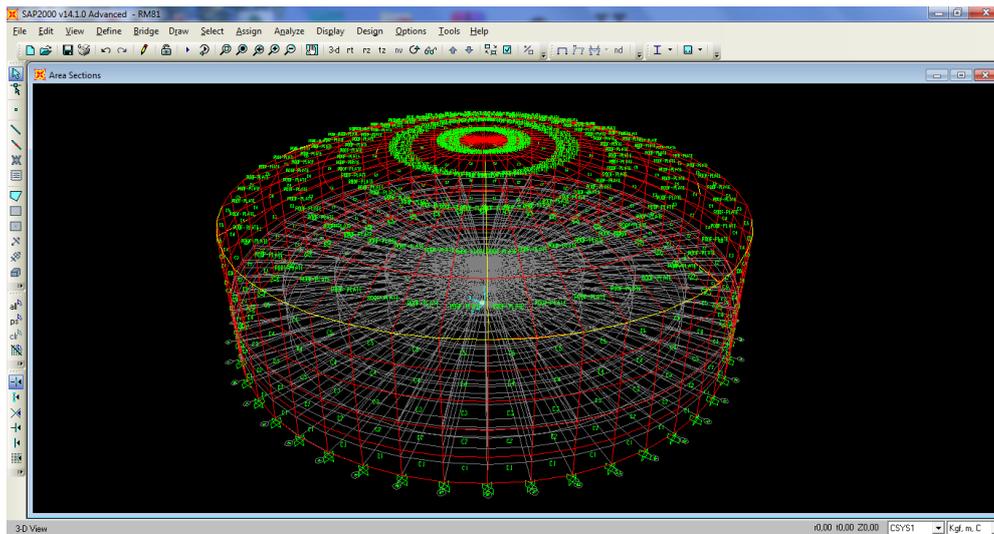
**Figura 15.** Definición de perfiles aplicar en el modelo del tanque.

Se importa desde la sección **I/Wide Flange** el perfil IPE 330 y desde la sección **Angle** el perfil 100x100x10 mm desde el archivo de Base de Datos EURO.PRO que presenta el programa por defecto mostrado en la figura 16.



**Figura 16.** Selección de los perfiles desde el archivo de Base de Datos EURO.PRO.

Una vez definido los materiales son asignados al modelo del tanque como se muestra en la figura 17.



**Figura 17.** Asignación de materiales al modelo del tanque.

### 5) Definir cargas.

Las cargas que van a actuar en el modelo del tanque son ingresadas mediante la opción de **Define Load Patterns**. En esta se ingresa el tipo de cargas que intervienen en el análisis, carga muerta, carga viva y el empuje hidrostático.

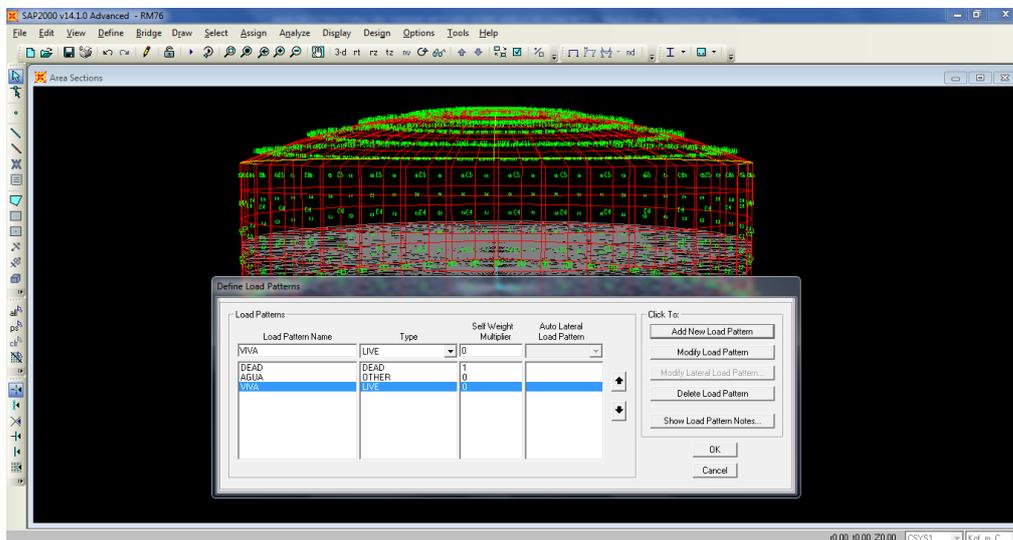
**Carga muerta:** Es el peso propio no es necesario ingresarlo ya que el programa SAP2000, calcula dicho peso en función de las propiedades ingresadas y de los espesores de los elementos.

**Carga viva:** Es la carga viva se la ingresará como una carga distribuida en toda la superficie del domo esférico, siendo el valor de 100 Kg/m<sup>2</sup>.



**Carga de agua:** Para el caso de la presión hidrostática sobre las paredes del tanque se debe previamente en la opción **Define-Joint Patterns** definir un patrón de cargas, lo denominamos **PRESIÓN**.

En la figura 18 se plasma el cuadro de diálogo donde se definen las cargas que son aplicadas en el modelo. Con **Load Pattern Name:** se identifican las nuevas cargas que son asignadas, siendo la carga **AGUA** de **Type: OTHER** y la carga **VIVA** de **Type: LIVE**. La carga muerta es incorporada en el programa. Se da clic **OK**.



**Figura 18.** Definición de cargas aplicar en el modelo del tanque.

## 6) Definir Joint Patterns.

Para asignar la carga de agua es necesario definir **Joint Patterns** en la sección del cilindro y asignarles una función.

En la barra de menú **Define** se selecciona **Joint Patterns...**, donde el programa muestra el cuadro de diálogo **Define Pattern Names**. Es identificado el Patterns **PRESION** y se presiona la pestaña **Add New Patterns Name** quedando definido dando clic en **OK**, como se muestra en la figura 19.



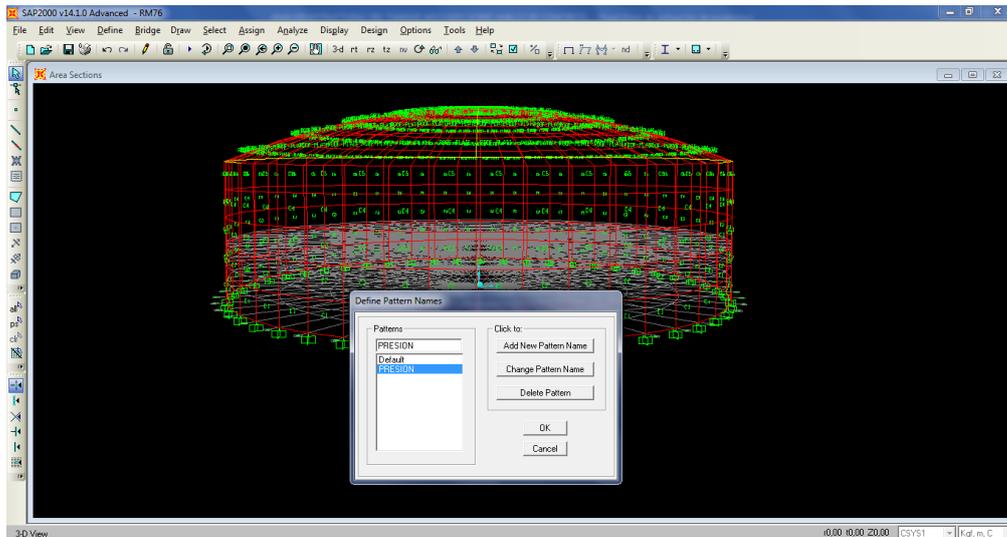
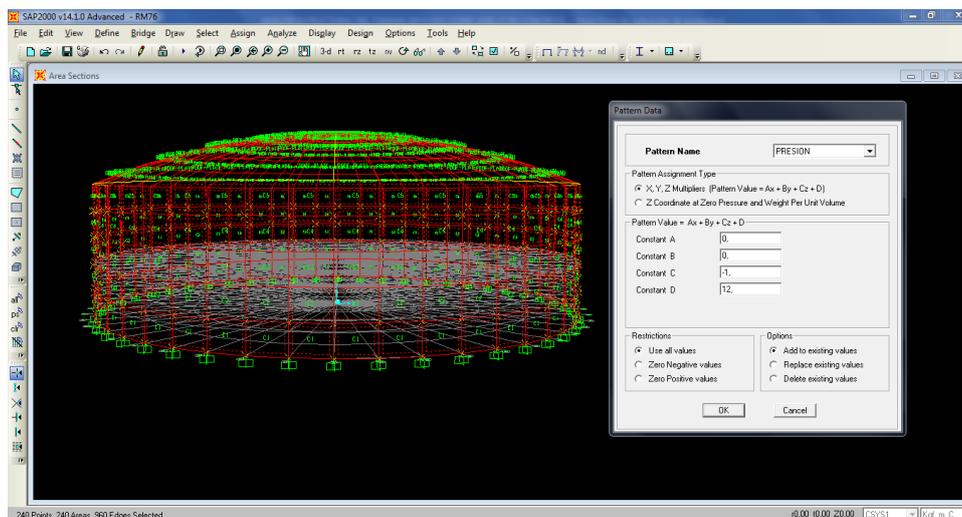


Figura 19. Definición del Pattern Name.

## 7) Asignar Joint Patterns.

Se selecciona la envolvente, desde **Assign** se selecciona **Joint patterns** en el cuadro de diálogo en **Pattern Name** se selecciona **PRESION** y en la Constante C digitamos -1 el valor de la carga hidrostática de agua y la Constante D se selecciona 12 como la altura de la envolvente del tanque mostrado en la figura 20.



**Figura 20.** Asignación del **Pattern Name**.

### 8) Asignar la carga de agua.

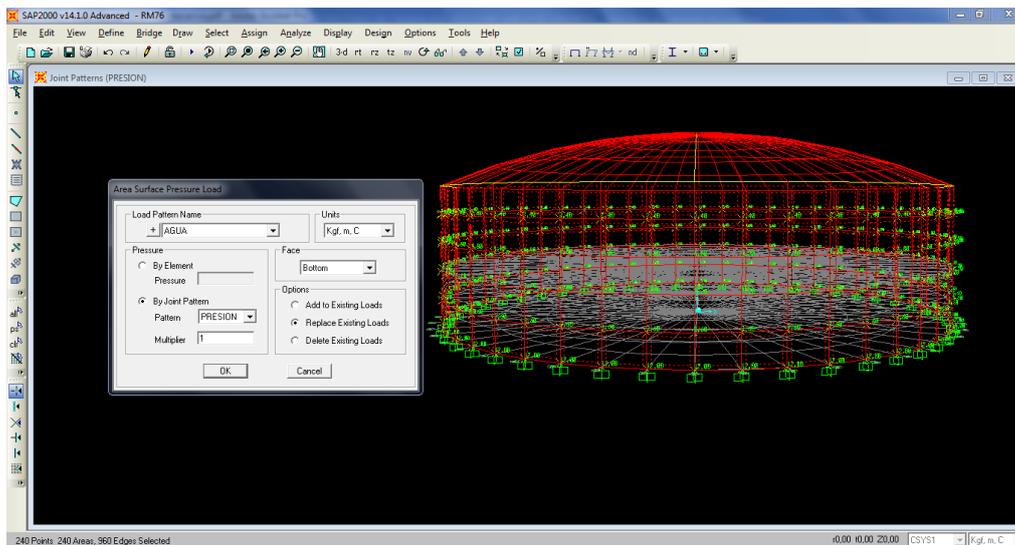
Se selecciona la envolvente del tanque en el menú **Assign** y la opción **Area Loads/Surface Pressure (All)**

En **load Patterns Name**, se selecciona AGUA.

En **Pressure**, se activa **By Joint Pattern** y en **Pattern** se selecciona PRESIÓN.

En **Face** se selecciona Bottom.

Todas estas opciones son mostradas en la figura 21.



**Figura 21.** Asignación del **Area Loads/Surface Pressure (All)**.

Al presionar **OK** se muestra la envolvente con las presiones asignada mostrada en la figura 22.



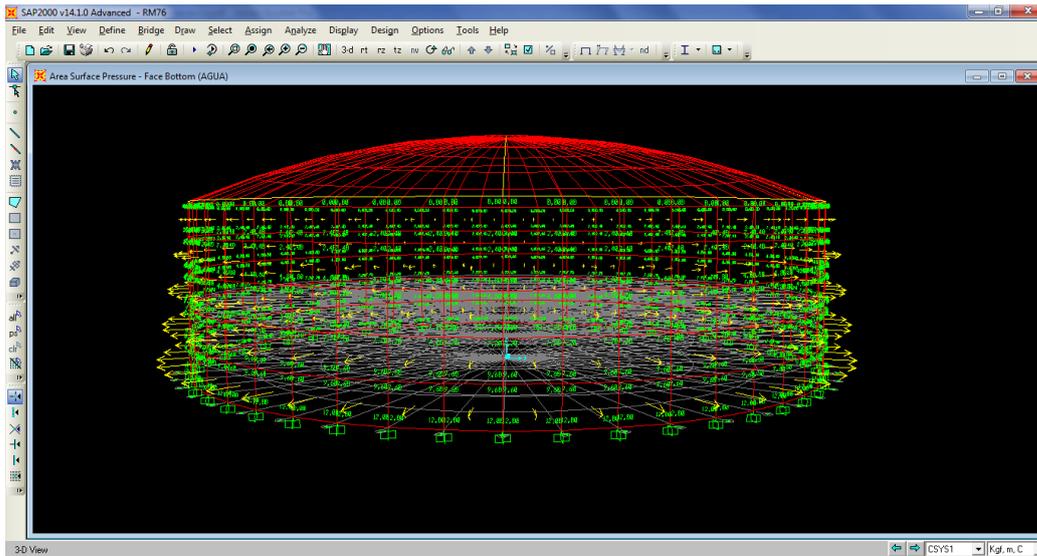


Figura 22. Distribución de la PRESIÓN en la envoltente del tanque.

### 9) Asignar la carga viva.

Se selecciona el domo esférico, en el menú **Assign** y la opción **Uniform (Shell)** mostrado en la figura 23.

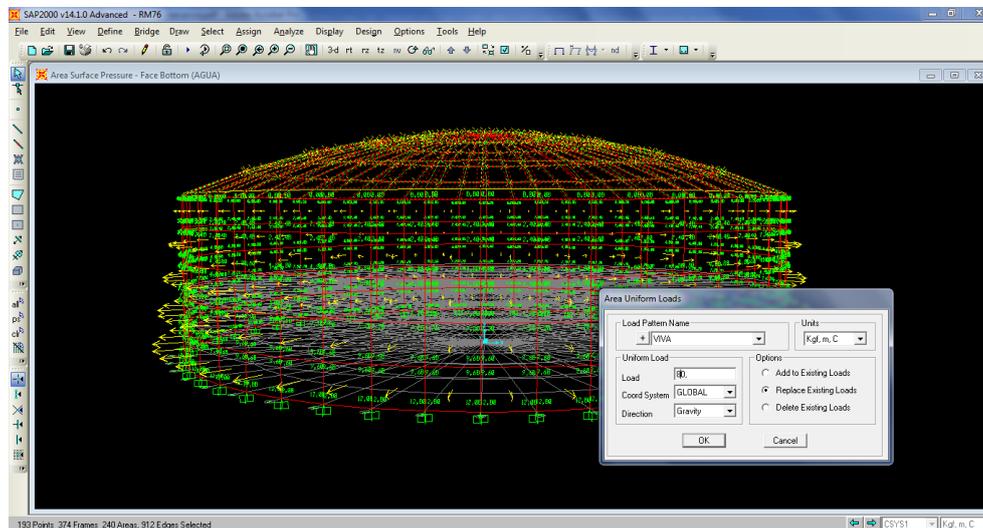
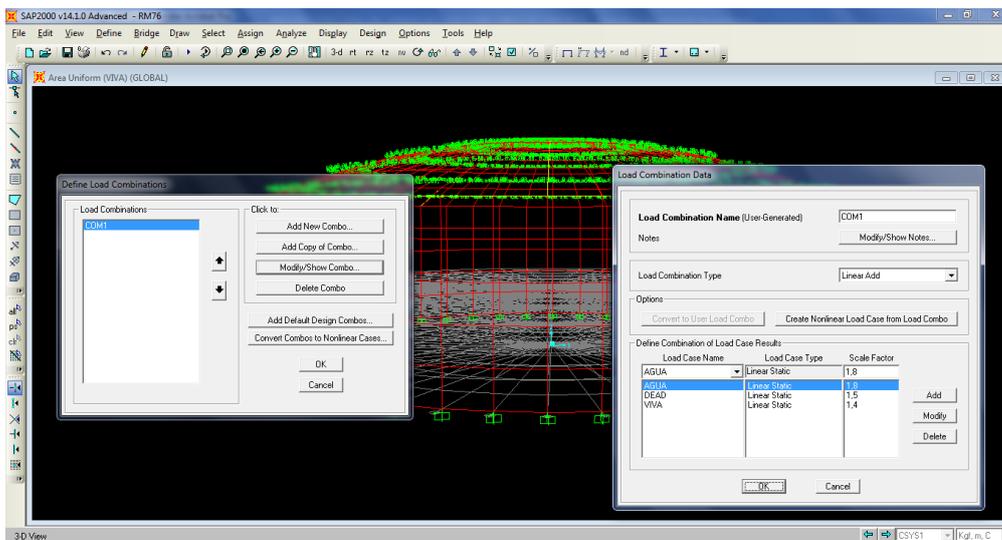


Figura 23. Asignación de la carga viva en domo esférico.

### 10) Definir combinaciones de carga.



Para definir las combinaciones de carga a utilizarse, vamos al menú **Define/Load Combinations**, se selecciona la opción **Add New Combo**, en la que nos mostrara la ventana para generar las combinaciones de carga en función a factores de carga de diseño, tal como se muestra en la figura 24.



**Figura 24.** Definición de las combinaciones de carga.

## 11) Análisis del Modelo Estructural

Luego de haber definido el modelo y cargado la estructura, se procede al análisis estructural, yendo al menú **Analyze/Set Analysis Options**, se mostrará la ventana de opciones de análisis, donde hacemos clic en la opción **XZ Plane**, debido a que estamos realizando un análisis plano mostrado en la figura 25.



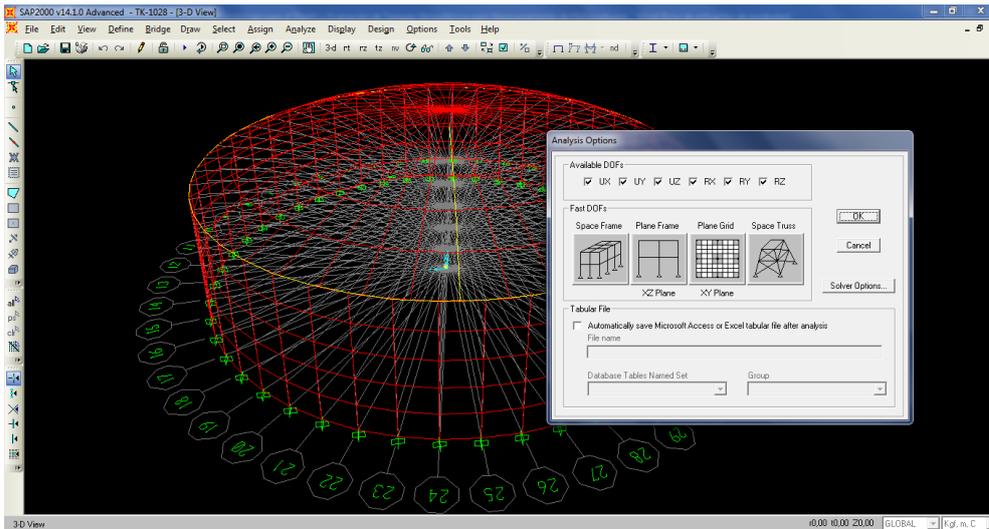
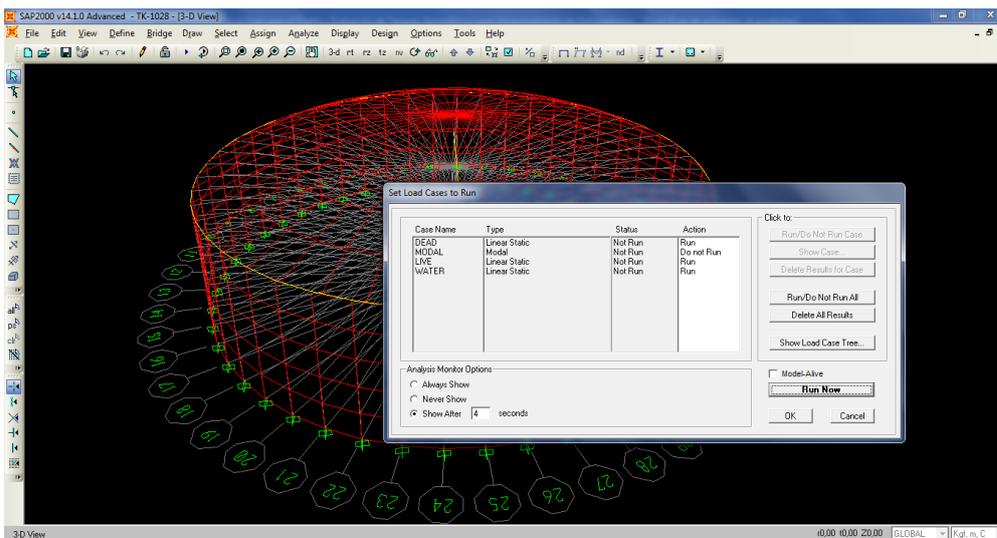


Figura 25. Definición de Analysis Options.

## 12) Análisis de Resultados.

Seguidamente vamos nuevamente al menú **Analyze/ Set Load Case to Run**, donde nos mostrará el cuadro de diálogo, donde debemos definir los casos de análisis que deseamos que se ejecuten en el análisis. La **Modal Load** se desactiva y se da clic el botón **Run Now** como se muestra en la figura 26.



**Figura 26.** Definición de los casos de análisis a correr en el modelo.

### **13) Visualización Gráfica de los Resultados.**

Para visualizar los resultados en forma gráfica, vamos al menú **Display/Show Forces/Stresses/Shell**, tal como se muestra en la figura 27, seguidamente nos muestra la ventana de diagramas de fuerzas en los elementos **Shell**, en la que podemos elegir los resultados de fuerzas anulares (F11) en la figura 28 y verticales (F22) en la figura 29, momentos (M11 y M22) en las figuras 30 y 31 y cortante (V13, V23) en las figuras 32 y 33. Para visualizar con mayor detalle las fuerzas en los elementos, debemos de hacer clic derecho sobre cualquier elemento.

Los diagramas de fuerza resultante, son analizando el caso de carga de AGUA actuando en la envolvente del tanque. La unidad utilizada en el modelo fue: **Kgf, m, °C.**



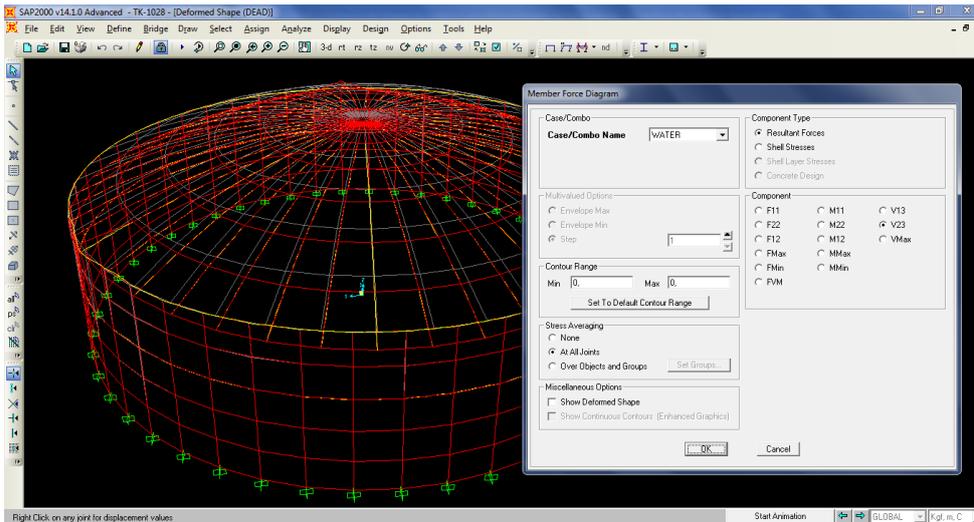


Figura 27. Visualización de los diagramas de fuerza de los miembros.

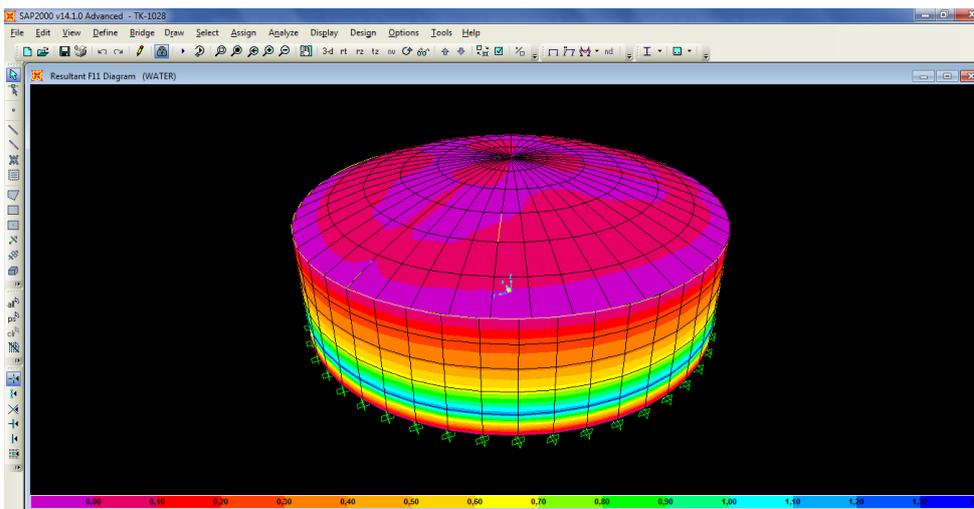
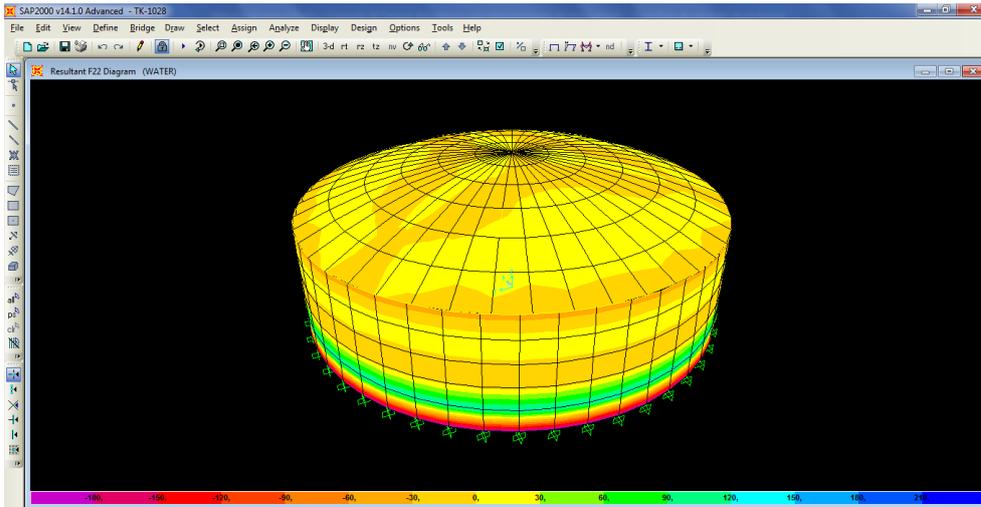


Figura 28. Resultante del diagrama F11.

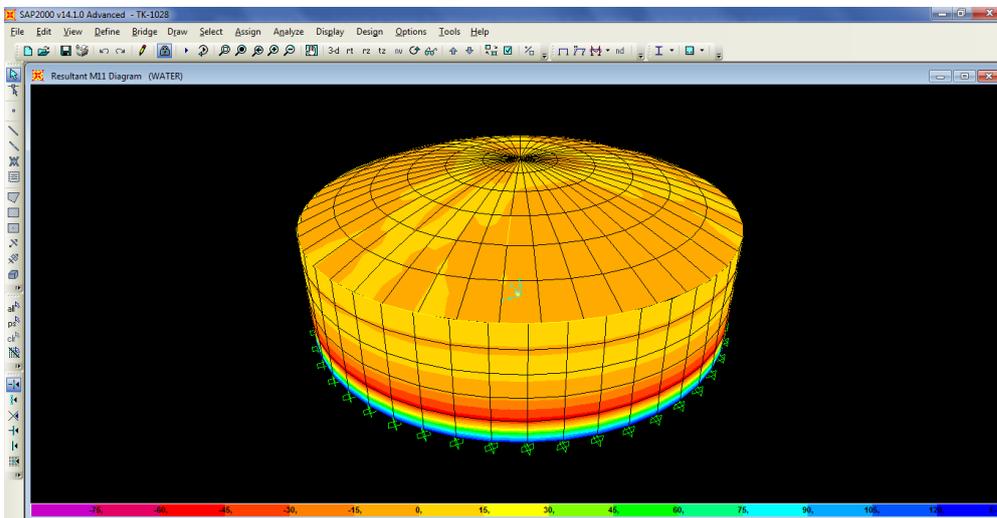
MÍN = 60,851 MÁX = 1287,354





**Figura 29.** Resultante del diagrama **F22**.

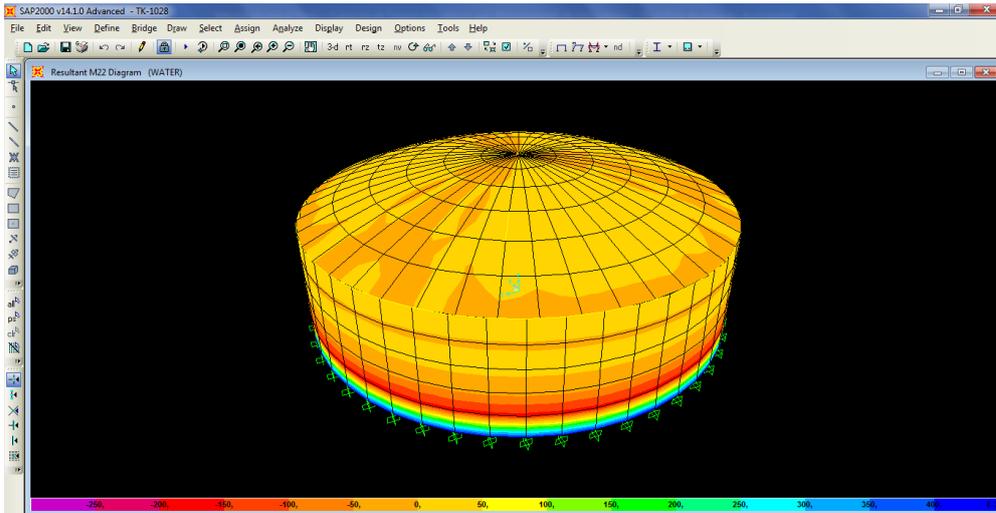
MÍN = 202,835    MÁX = 202,878



**Figura 30.** Resultante del diagrama **M11**.

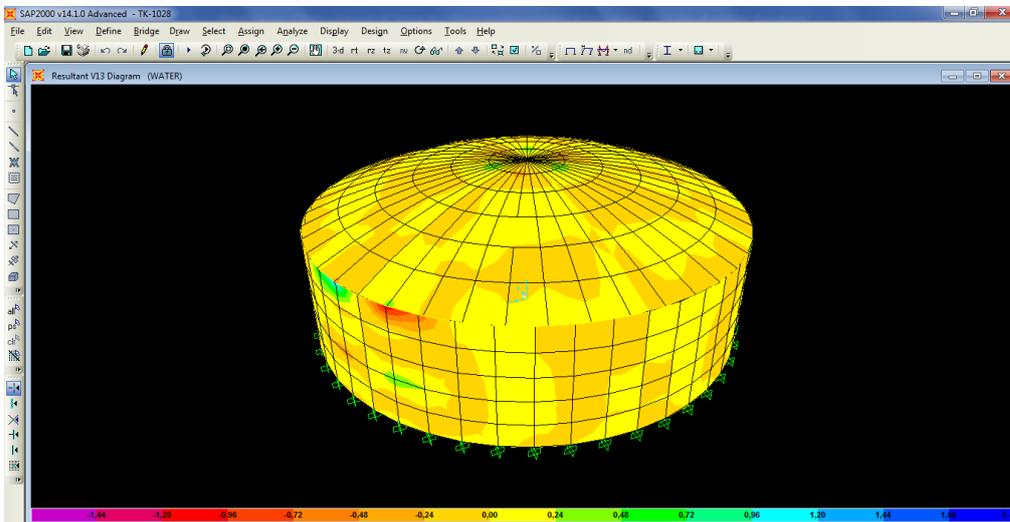
MÍN = 0,084    MÁX = 0,128





**Figura 31. Resultante del diagrama M22.**

MÍN = 0,278      MÁX = 0,427



**Figura 32. Resultante del diagrama V13.**

MÍN = 0,002      MÁX = 0,002



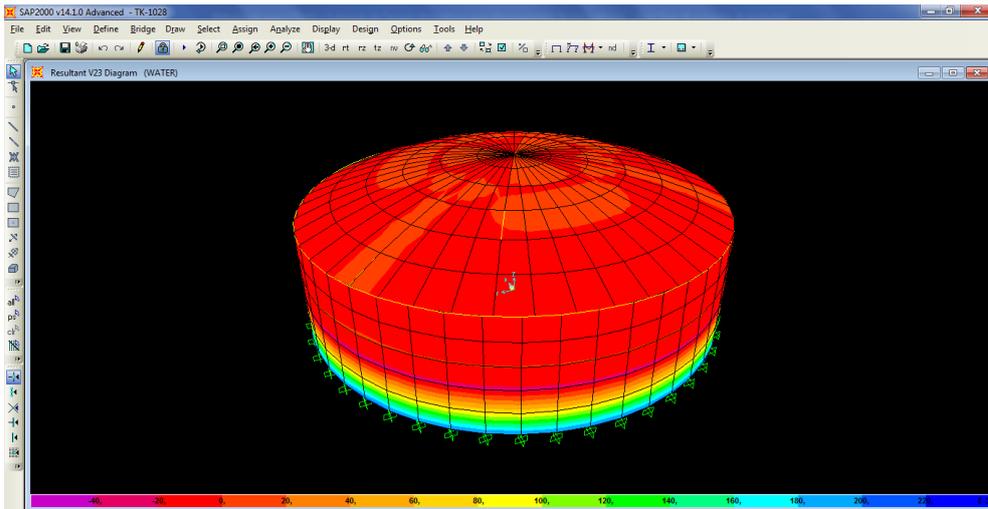


Figura 33. Resultante del diagrama V23.

MÍN = 0,060      MÁX = 0,211

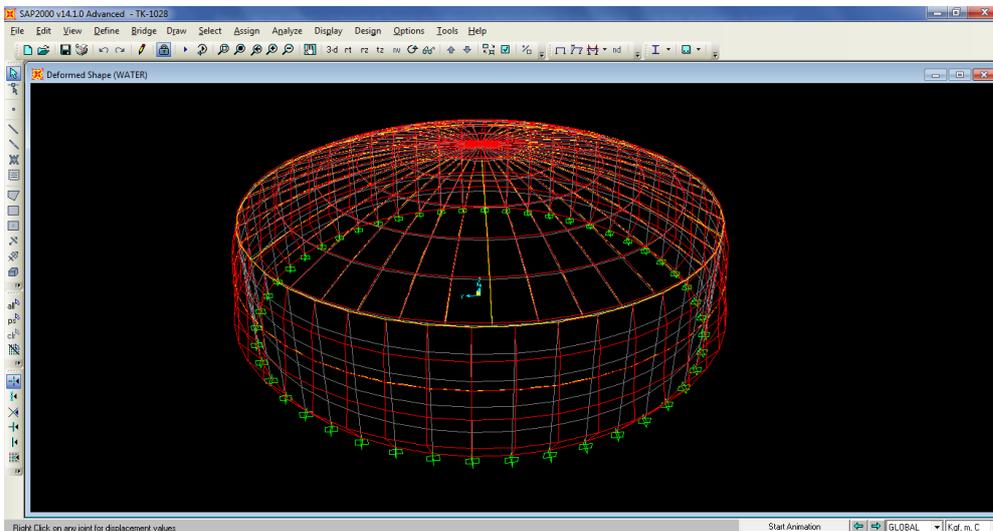


Figura 34. Deformada por la carga de AGUA en la envolvente.

