

Trabajo Fin de Máster
Máster Universitario en Ingeniería Industrial

**APLICACIÓN INFORMÁTICA PARA EL
DIMENSIONAMIENTO INTEGRAL DE
TANQUES MEDIANTE LA NORMA API 620.**

Autor: Luis Julio Martínez Barthe

Tutor: Andrés Cubero Moya

**Dep. Ingeniería de la Construcción
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla**

Sevilla, 2018



Proyecto Fin de Carrera
Ingeniería de la Construcción

APLICACIÓN INFORMÁTICA PARA EL DIMENSIONAMIENTO INTEGRAL DE TANQUES MEDIANTE LA NORMA API 620.

Autor:

Luis Julio Martínez Barthe

Tutor:

Andrés Cubero Moya

Profesor asociado

Dep. Ingeniería de la Construcción
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla
Sevilla, 2018

Proyecto Fin de Carrera: APLICACIÓN INFORMÁTICA PARA EL DIMENSIONAMIENTO INTEGRAL
DE TANQUES MEDIANTE LA NORMA API 620.

Autor: Luis Julio Martínez Barthe

Tutor: Andrés Cubero Moya

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2018

El Secretario del Tribunal

RESUMEN

En la industria, a menudo surge la necesidad de almacenar productos bajo presión o a temperaturas criogénicas para mantener licuados diversos gases como el gas natural. La norma americana API 620 cubre el diseño y construcción de tanques de almacenamiento soldados capaces de operar en condiciones de este tipo.

El objetivo de este documento es crear un programa informático que, basándose en la norma anteriormente mencionada, automatice en la medida de lo posible el diseño de este tipo de tanques de una forma fiable.

Índice

| | |
|---|------------|
| Resumen | 7 |
| Índice | 8 |
| Índice de Tablas | 10 |
| Índice de Ilustraciones | 11 |
| 1. Análisis del problema | 12 |
| 2. Análisis de la norma..... | 13 |
| 3. Desarrollo de la herramienta de cálculo | 14 |
| 3.1. Descripción | 14 |
| 3.2. Estructura | 14 |
| 3.3. Descripción del método de cálculo | 15 |
| 3.4. Hojas de Cálculo..... | 15 |
| 3.4.1. <u>PRESENTACIÓN</u> | 15 |
| 3.4.2. <u>INTRODUCCIÓN DE DATOS</u> | 16 |
| 3.4.3. <u>CÁLCULO DEL TECHO</u> | 21 |
| 3.4.4. <u>CÁLCULO DEL CUERPO</u> | 35 |
| 3.4.5. <u>CÁLCULO DEL FONDO</u> | 43 |
| 3.4.6. <u>RESUMEN DE PESOS</u> | 48 |
| 3.4.7. <u>ESTABILIDAD FRENTE AL VIENTO</u> | 49 |
| 3.4.8. <u>ESTABILIDAD FRENTE AL SISMO</u> | 55 |
| 3.4.9. <u>CÁLCULO DE VENTEOS</u> | 82 |
| 3.4.10. <u>CARGAS A LA CIMENTACIÓN</u> | 88 |
| 3.4.11. <u>MATERIALES</u> | 88 |
| 3.4.12. <u>TABLAS</u> | 89 |
| 4. Validación de resultados..... | 90 |
| 4.1. Caso práctico 1..... | 90 |
| 4.1.1. <u>DESCRIPCIÓN</u> | 90 |
| 4.1.2. <u>RESULTADOS OBTENIDOS</u> | 92 |
| 4.1.3. <u>COMPROBACIÓN MEDIANTE EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS CON EL SOFTWARE ANSYS</u> 93 | |
| 4.1.4. <u>COMPROBACIÓN MEDIANTE EL SOFTWARE TANK</u> | 98 |
| 4.2. Descripción caso práctico 2..... | 103 |
| 4.2.1. <u>RESULTADOS OBTENIDOS</u> | 104 |
| 4.2.2. <u>COMPROBACIÓN MEDIANTE EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS CON EL SOFTWARE ANSYS</u> 105 | |
| 4.2.3. <u>COMPROBACIÓN MEDIANTE EL SOFTWARE TANK</u> | 109 |
| Anexo I: Informes..... | 114 |
| Anexo II: Código Macros | 147 |
| Anexo III: Manual de usuario | 152 |

APLICACIÓN INFORMÁTICA PARA EL DIMENSIONAMIENTO INTEGRAL DE TANQUES
MEDIANTE LA NORMA API 620.

LUIS JULIO MARTÍNEZ BARTHE

| | |
|--|------------|
| Anexo iv: informes de cálculo Tank..... | 153 |
| 1. CASO PRÁCTICO 1..... | 153 |
| 1.1. INPUTS..... | 153 |
| 1.2. INTERNAL PRESSURE CALCULATIONS | 156 |
| 1.3. WIND CALCULATIONS | 163 |
| 1.4. SEISMIC ANALYSIS RESULTS..... | 166 |
| 2. CASO PRÁCTICO 2..... | 178 |
| 2.1. INPUTS..... | 178 |
| 2.2. INTERNAL PRESSURE CALCULATIONS | 180 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|---|-----|
| Tabla 1. Espesores mínimos..... | 17 |
| Tabla 2. Espesor mínimo de soldadura para fondos..... | 44 |
| Tabla 3. Espesor de chapa anular de fondo para Anexo R..... | 45 |
| Tabla 4. Espesor de chapa anular de fondo para tanques de acero según Anexo Q..... | 46 |
| Tabla 5. Espesor de chapa anular de fondo para tanques de aluminio según Anexo Q..... | 46 |
| Tabla 6. Coeficiente de modificación F_a | 59 |
| Tabla 7. Coeficiente de modificación F_v | 60 |
| Tabla 8. Factor de importancia..... | 62 |
| Tabla 9. Factores de modificación de fuerza..... | 62 |
| Tabla 10. Criterio de anclaje..... | 67 |
| Tabla 11. Altura de anillo anti desborde..... | 69 |
| Tabla 12. Factor R_w para tanques Anexo Q..... | 74 |
| Tabla 13. Factor R_w para tanques Anexo R..... | 74 |
| Tabla 14. Factores C para venteos..... | 83 |
| Tabla 15. Factores Y para venteos..... | 84 |
| Tabla 16. Factores Q para venteos..... | 84 |
| Tabla 17. Factores F para venteos..... | 85 |
| Tabla 18. Espesores obtenidos caso práctico 1..... | 92 |
| Tabla 19. Comparativa de fuerzas y espesores caso práctico 1..... | 100 |
| Tabla 20. Comparativa de momentos para el cálculo de la estabilidad frente al viento..... | 101 |
| Tabla 21. Comparativa de momentos estabilizantes para el cálculo de la estabilidad frente al viento..... | 101 |
| Tabla 22. Comparativa de momentos desestabilizantes para el cálculo de la estabilidad frente al viento..... | 101 |
| Tabla 23. Comparativa de parámetros para comprobar la estabilidad frente al sismo..... | 102 |
| Tabla 24. Espesores obtenidos caso práctico 2..... | 104 |
| Tabla 25. Comparativa de fuerzas y espesores caso práctico 2..... | 111 |
| Tabla 26. Comparativa de parámetros unión techo cuerpo caso práctico 2..... | 112 |

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

| | |
|---|------------|
| <i>Ilustración 1. Tensiones meridional y circunferencial.....</i> | <i>15</i> |
| <i>Ilustración 2. Sistema de tanques de contención de pared doble.....</i> | <i>18</i> |
| <i>Ilustración 3. Sistema de tanques de contención de pared única.....</i> | <i>19</i> |
| <i>Ilustración 4. Unión techo-cuerpo.....</i> | <i>25</i> |
| <i>Ilustración 5. Configuraciones constructivas.....</i> | <i>27</i> |
| <i>Ilustración 6. Niveles de análisis.....</i> | <i>39</i> |
| <i>Ilustración 7. Soldadura de las chapas laterales del fondo.....</i> | <i>43</i> |
| <i>Ilustración 8. Cargas de viento.....</i> | <i>49</i> |
| <i>Ilustración 9. Silleta de anclaje ejemplo según API 650.....</i> | <i>55</i> |
| <i>Ilustración 10. Clases del terreno.....</i> | <i>60</i> |
| <i>Ilustración 11. Espectro de respuesta.....</i> | <i>61</i> |
| <i>Ilustración 12. Cargas de diseño.....</i> | <i>65</i> |
| <i>Ilustración 13. Altura de anillo anti desborde.....</i> | <i>68</i> |
| <i>Ilustración 14. Silleta de anclaje según AISI E-1.....</i> | <i>73</i> |
| <i>Ilustración 15. Tanque 1.....</i> | <i>92</i> |
| <i>Ilustración 16. Detalle unión techo cuerpo caso práctico 1.....</i> | <i>93</i> |
| <i>Ilustración 17. Modelo caso práctico 1.....</i> | <i>93</i> |
| <i>Ilustración 18. Mallado caso práctico 1.....</i> | <i>94</i> |
| <i>Ilustración 19. Condiciones de contorno caso práctico 1.....</i> | <i>94</i> |
| <i>Ilustración 20. Tensiones obtenidas con los espesores de cálculo.....</i> | <i>95</i> |
| <i>Ilustración 21. Deformaciones obtenidas con los espesores de cálculo.....</i> | <i>95</i> |
| <i>Ilustración 22. Tensiones obtenidas con los espesores adoptados.....</i> | <i>96</i> |
| <i>Ilustración 23. Deformaciones obtenidas con espesores adoptados.....</i> | <i>96</i> |
| <i>Ilustración 24. Tensiones obtenidas con anillo rigidizador y espesores de cálculo.....</i> | <i>97</i> |
| <i>Ilustración 25. Deformaciones obtenidas con anillo rigidizador y espesores de cálculo.....</i> | <i>97</i> |
| <i>Ilustración 26. Modelo TANK caso práctico 1.....</i> | <i>99</i> |
| <i>Ilustración 27. Tanque 2.....</i> | <i>104</i> |
| <i>Ilustración 28. Detalle unión techo cuerpo caso práctico 2.....</i> | <i>105</i> |
| <i>Ilustración 29. Modelo caso práctico 2.....</i> | <i>105</i> |
| <i>Ilustración 30. Mallado caso práctico 2.....</i> | <i>106</i> |
| <i>Ilustración 31. Condiciones de contorno caso práctico 2.....</i> | <i>106</i> |
| <i>Ilustración 32. Tensiones para espesor de cálculo.....</i> | <i>107</i> |
| <i>Ilustración 33. Deformaciones para espesor de cálculo.....</i> | <i>107</i> |
| <i>Ilustración 34. Tensiones para espesores adoptados.....</i> | <i>108</i> |
| <i>Ilustración 35. Deformaciones espesores adoptados.....</i> | <i>108</i> |
| <i>Ilustración 36. Modelo TANK caso práctico 2.....</i> | <i>109</i> |

1. ANÁLISIS DEL PROBLEMA

A menudo, en la industria surge la necesidad de almacenar productos bajo cierta presión debido a su alta volatilidad, como es el caso de algunos derivados del petróleo como la nafta. Al almacenarlos bajo presión su temperatura de vapor aumenta, dificultando así que dichos fluidos se evaporen.

En ocasiones, también se requiere de un sistema de almacenamiento que opere a temperaturas criogénicas para mantener licuados diversos gases como el gas natural.

Más concretamente, se nos presenta la siguiente problemática:

- Diseño de tanques con una presión de diseño inferior a 1 barg, a una temperatura de diseño que no sea menor de -45°C .
- Diseño de tanques con una presión de diseño inferior a 0,5 barg, a una temperatura de diseño no menor a -198°C (temperaturas criogénicas).
- Diseño de tanques con una presión de diseño inferior a 0,5 barg, a una temperatura de diseño comprendida entre $4,44^{\circ}\text{C}$ y $-51,11^{\circ}\text{C}$.
- Diseño de tanques de acero inoxidable a una temperatura de diseño ambiente y presión de diseño inferior a 1 barg.
- Diseño de tanques con techo cónico autosoportado o esférico tipo domo autosoportado.
- Sistemas de tanques dobles, con tanque interior abierto o cerrado.

Después de analizar diversas opciones, se observó que el AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE redactó una norma que cubre el diseño y construcción de tanques que son capaces de almacenar productos con una presión de diseño de hasta 1,03 barg. Dicha norma también cubre la construcción y el diseño de sistemas de tanques que son capaces de almacenar gases licuados a temperaturas criogénicas. Por tanto, se llega a la conclusión de que esta norma resulta válida para la resolución de la problemática expuesta.

2. ANÁLISIS DE LA NORMA

La norma API 620 cubre el diseño y la construcción de tanques de acero al carbono, soldados, de baja presión apoyados sobre cimentación y que poseen un solo eje de revolución vertical.

Está formada por las siguientes secciones:

- Sección 1: Alcance.
- Sección 2: Referencias.
- Sección 3: Definiciones.
- Sección 4: Materiales.
- Sección 5: Diseño.
- Sección 6: Fabricación.
- Sección 7: Inspección, examen y testeo.
- Sección 8: Registro.
- Sección 9: Dispositivos de alivio de presión y vacío.

A estas secciones le siguen una serie de Anexos que describen aspectos como prácticas recomendadas para el uso de precalentamiento, postcalentamiento y alivio de estrés, alcance recomendado del informe del fabricante, requerimientos de ensayos no destructivos y testeo...

Para la resolución de la problemática expuesta en el anterior apartado, nos centraremos en las siguientes secciones y anexos:

- Sección 5.
- Anexo Q: tanques de almacenamiento de baja presión para almacenar gases licuados a -325 °F (-198 °C) o más calientes.
- Anexo R: tanques de almacenamiento de baja presión que operan entre +40 ° F (4,44°C) y -60 ° F (-51 °C).
- Anexo S: tanques de acero inoxidable austenítico.

3. DESARROLLO DE LA HERRAMIENTA DE CÁLCULO

3.1. Descripción

Cuando se aplica la norma API 620 para diseñar tanques de almacenamiento, se puede perder tiempo en tareas que son susceptibles de ser automatizadas, como calcular el espesor de cada una de las virolas del depósito o ver qué área participativa adicional es necesaria para reforzar la unión techo cuerpo.

Por todo lo anterior, surge la necesidad de crear un software informático que, con unos datos de entrada, sea capaz de calcular prácticamente la totalidad de todas las partes de las que se compone un tanque de almacenamiento basado en la norma API 620.

El programa informático desarrollado en este proyecto se ha realizado con Microsoft Excel. Está creado para diseñar tanques de almacenamiento cilindricos verticales con las siguientes características:

- Tanques con una presión de diseño comprendida entre 172 y 1030 mbarg, a una temperatura de diseño que no sea menor de -45°C .
- Anexo Q de la norma API 620: tanques con una presión de diseño comprendida entre -17 mbarg y 482,6 mbarg, a una temperatura de diseño no menor a -198°C (temperaturas criogénicas).
- Anexo R de la norma API 620: tanques con una presión de diseño comprendida entre -17 mbarg y 482,6 mbarg, a una temperatura de diseño comprendida entre $4,44^{\circ}\text{C}$ y $-51,11^{\circ}\text{C}$.
- Anexo S de la norma API 620: tanques de acero inoxidable a una temperatura de diseño de 40°C y presión de diseño comprendida entre 172 y 1030 mbarg.
- Techo cónico autosoportado o esférico tipo domo autosoportado.
- Sistemas de tanques dobles, con tanque interior abierto o cerrado.

El programa se limita únicamente al diseño de las distintas partes estructurales del tanque de almacenamiento. No cubre el dimensionamiento de tubuladuras ni contempla el diseño de otras partes auxiliares como son plataformas o escaleras de acceso a la cubierta. Tampoco detalla el cálculo necesario para el dimensionamiento de la cimentación.

3.2. Estructura

Este documento se ha organizado por apartados, cada uno de los cuáles se corresponde con una hoja de cálculo del programa desarrollado. Cada hoja de cálculo cubre o el diseño de una parte estructural del tanque o un cálculo necesario para su estabilidad, como el cálculo de pernos de anclaje necesarios para soportar las cargas transmitidas por el viento o sismo. En cada apartado se expondrá tanto la parte teórica contemplada en la norma para el dimensionamiento de cada parte estructural, como la descripción de los cálculos que el programa realiza para dimensionar dicha parte estructural.

En el punto 4 se expone una serie de ejemplos para algunos de los casos cubiertos por el alcance de este proyecto, mostrando un análisis realizado con elementos finitos para comprobar que los

resultados obtenidos con esta aplicación informática cumplen los requerimientos de tensión máxima admisible (de tracción o compresión) de la norma API 620.

3.3. Descripción del método de cálculo

Para el cálculo de todas las partes estructurales del tanque se utilizará el análisis del cuerpo libre descrito en la norma API 620. Se trata de un procedimiento de diseño que determina la magnitud y la dirección de las fuerzas que deben ser soportadas por las paredes de un tanque en un nivel seleccionado para el análisis, de manera que se pueda mantener en equilibrio estático la porción del tanque seleccionada (como si se tratase de un cuerpo libre independiente de la parte no seleccionada).

Dicho análisis se realizará desde la parte superior hasta la parte inferior del tanque en niveles sucesivos, determinando así la magnitud y el carácter de las fuerzas meridional y circunferencial que existirán en las paredes bajo diversas condiciones de operación y diseño.

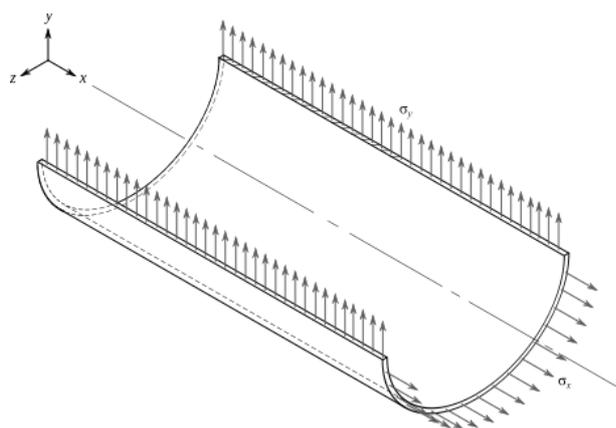


Ilustración 1. Tensiones meridional y circunferencial

Debido a que esta norma utiliza únicamente unidades imperiales, los cálculos se describirán con dichas unidades. El programa se encargará de pasar los resultados al sistema internacional automáticamente.

3.4. Hojas de Cálculo

3.4.1. PRESENTACIÓN

Una vez abierto el programa, nos dirigimos a la hoja de cálculo “PRESENTACIÓN”, donde encontraremos un breve manual de usuario para utilizarlo.

Lo primero que deberemos conocer es el código de colores que encontraremos:

 Celdas a rellenar por el usuario.

 Celdas de cálculo, se rellenan automáticamente.

Las unidades en las que hay que introducir los datos aparecen siempre en la columna de la derecha.

3.4.2. INTRODUCCIÓN DE DATOS

A continuación clickamos en "DATOS", dónde lo primero que deberemos rellenar es el nombre del cliente para el que se realiza el dimensionamiento del tanque. La fecha se rellenará automáticamente. A continuación nos encontraremos varios subapartados:

3.4.2.1. Datos Geográficos

Empezaremos por introducir la localización del tanque. En caso de que esté situado en España se deberá introducir la provincia en la que se encuentre, de forma que se automatizarán todos los procesos de diseño dependientes de la localización (viento, cargas de nieve...). En caso contrario, en la celda correspondiente se deberá introducir que no está situado en España, debiendo introducir una serie de datos en apartados posteriores que se explicarán más adelante.

3.4.2.2. Datos Geométricos

Algunos datos se deberán introducir y otros los dará automáticamente el programa. Son los siguientes:

- *Diámetro interior del tanque:* aquí se deberá introducir el diámetro interior del tanque, en m. Se utilizará el criterio de la API 650 para techos autosportados, por lo que el programa mostrará un aviso de error si el tanque tiene un diámetro superior a 18,28 m.
- *Altura de la pared:* aquí se deberá introducir la altura del tanque, en m.
- *Tipo de techo:* se deberá escoger entre las diferentes opciones que ofrece un desplegable:
 - *Cónico:* se utilizará el criterio de API 650 para acotar el ángulo mitad de vértice del cono. Esta norma establece que el ángulo respecto a la horizontal debe estar comprendido entre 9,5° y 37°. API 620 utiliza para los cálculos el ángulo mitad de vértice, por lo que los equivalentes en nuestro caso serían como mínimo 53° y como máximo 80,5°. El programa muestra esta información en la celda correspondiente a la introducción del ángulo mitad de vértice del techo cónico.
 - *Domo:* se utilizará el criterio de API 650 para acotar el radio de la esfera. Dicho radio debe estar comprendido entre 0,8 y 1,2 veces el diámetro del tanque. Esta información se muestra en la celda correspondiente a la introducción del diámetro del techo domo.
 - *Abierto:* esta opción sólo se deberá escoger para sistemas de tanques dobles en los que el interior esté abierto. El programa muestra esta información si se escoge esta opción, indicando que hay que obviar en este caso las hojas de cálculo correspondientes al viento y al techo.
- *Altura del techo:* esta celda se rellenará automáticamente de la siguiente forma:
 - Si el techo es cónico autosportado:

$$h = \frac{D}{2} / \tan \alpha \quad (2-1)$$

dónde:

h= altura del techo, en m.

APLICACIÓN INFORMÁTICA PARA EL DIMENSIONAMIENTO INTEGRAL DE TANQUES
MEDIANTE LA NORMA API 620.

LUIS JULIO MARTÍNEZ BARTHE

D=diámetro del tanque, en m.

α = ángulo mitad de vértice del cono.

- Si el techo es domo autosoportado:

$$h = R - \sqrt{R^2 - (R - D/2)^2} \quad (2-2)$$

dónde:

h= altura del techo, en m.

D=Diámetro del tanque, en m.

R= Radio de la esfera, en m.

- *Nivel de fluido*: introducir la altura a la que se encontrará el fluido, en m.
- *Número de virolas*: introducir el número de virolas que compondrán la pared del tanque.
- *Espesor de corrosión del fondo*: introducir espesor de corrosión para el fondo, en mm.
- *Espesor de corrosión del cuerpo*: introducir espesor de corrosión para el cuerpo, en mm.
- *Espesor de corrosión del techo*: introducir espesor de corrosión para el techo, en mm.
- *Espesor mínimo inicial del fondo según API 620*: esta celda se rellena automáticamente. Muestra el espesor mínimo del fondo según API 620 (6 mm).
- *Espesor mínimo inicial del cuerpo según API 620*: esta celda se rellena automáticamente. Muestra el espesor mínimo del cuerpo según API 620 de la siguiente forma:

| Radio del tanque (m) | Espesor mínimo (mm) |
|----------------------|---------------------|
| <= 7,62 | 5 |
| 7,62 a 18 | 6 |
| >18 a 30 | 8 |
| >30 | 10 |

Tabla 1. Espesores mínimos

- *Espesor mínimo inicial del techo según API 620*: esta celda se rellena automáticamente. Muestra el espesor mínimo del techo según API 620 de la misma forma que el cuerpo.
- *Eficiencia de junta*: este valor se escogerá de la tabla 5-2 de API 620, que podrá

visualizarse desde un hipervínculo al lado derecho de la celda de cálculo.

3.4.2.3. Datos de operación/diseño

Se nos preguntará una serie de aspectos que determinarán el diseño del tanque:

- *¿El tanque almacena productos que necesitan de aislamiento?:* introducir “SI” o “NO” de un desplegable según proceda. Si la respuesta es “SI” el programa formulará las siguiente preguntas:
 - *¿Almacena Gas licuado?:* introducir “SI” o “NO” de un desplegable según proceda. Si la respuesta es “SI”, aparecerá un mensaje como el siguiente: "Anexo Q. Rellenar datos de aislamiento." Si la respuesta es “NO”, aparecerá el siguiente mensaje: "Anexo R. Rellenar datos de aislamiento." De esta forma el programa sabrá que anexo de API 620 utilizará para el diseño.
 - *¿Es un sistema de tanques de contención de doble pared?:* Este programa cubre el diseño de sistemas de tanques de contención de doble pared y de pared única, siempre que los techos sean autosoportados. Introducir “SI” o “NO” de un desplegable según proceda. Si la respuesta es “SI”, aparecerá un hipervínculo en el que podremos ver la estructura de un sistema de tanques de contención de doble pared. Si la respuesta es “NO” aparecerá un hipervínculo en el que podremos ver la estructura de sistema de tanques de contención de pared única:

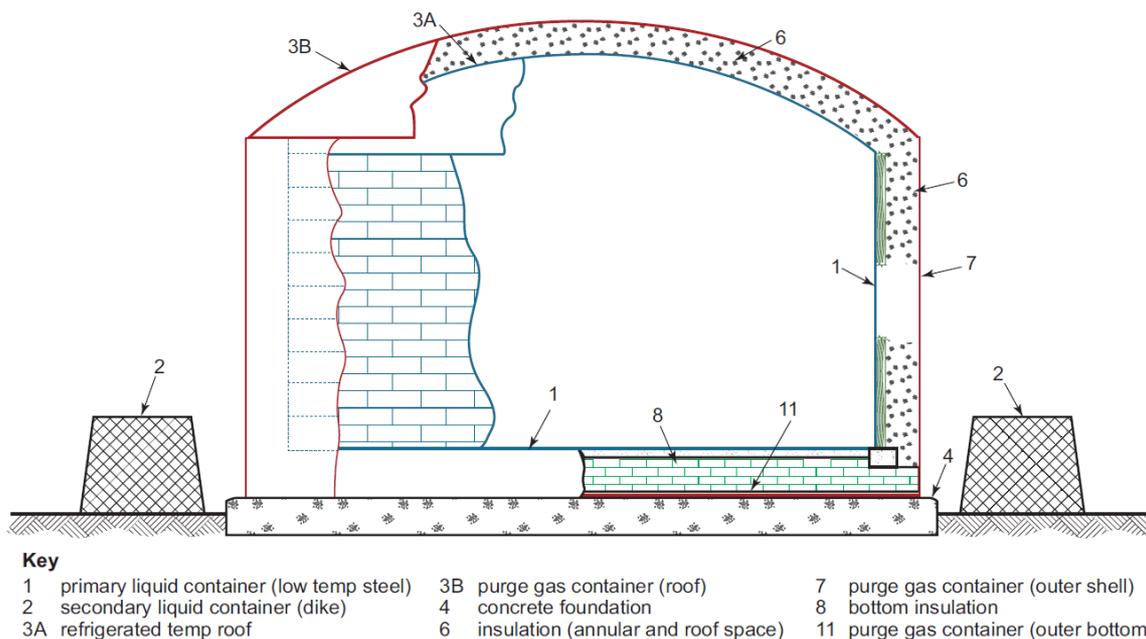


Ilustración 2. Sistema de tanques de contención de pared doble.

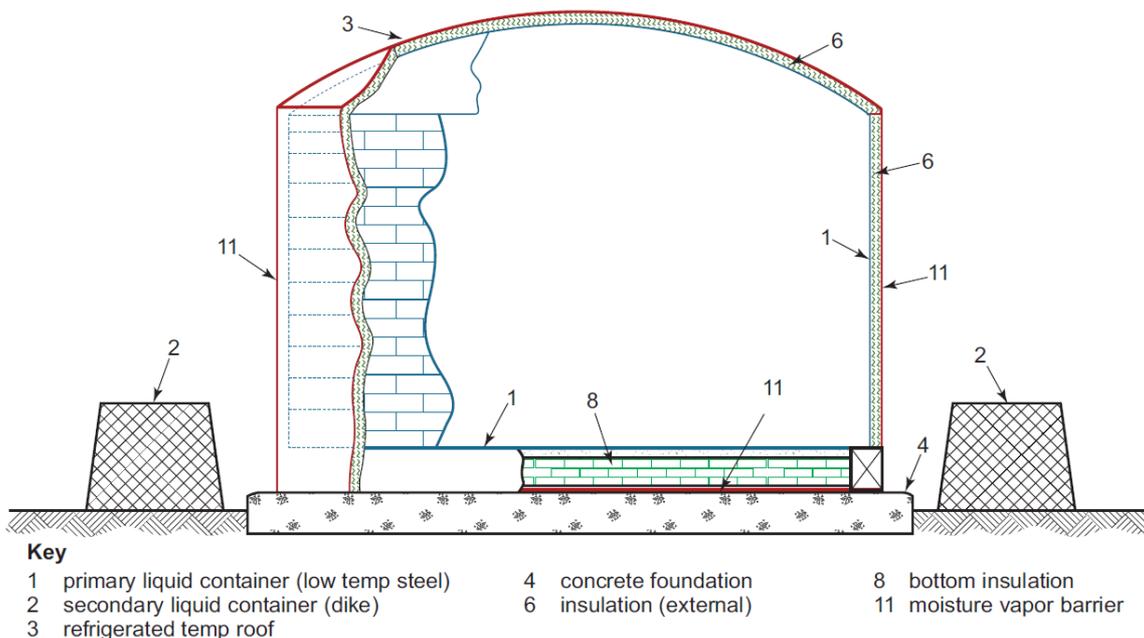


Ilustración 3. Sistema de tanques de contención de pared única.

- Por último, si la respuesta a la anterior pregunta es “SI”, se formulará la siguiente pregunta: ¿Tanque interior o exterior?. Introducir de un desplegable la opción que proceda, ya que esta información resultará importante para apartados posteriores.
- *Temperatura de operación*: introducir la temperatura de operación del tanque, en ° C.
- *Temperatura de diseño*: introducir la temperatura de diseño del tanque, en ° C. El programa mostrará un aviso de error en caso de que se introduzca una temperatura no compatible con el alcance de API 620 o alguno de sus anexos. Con esta temperatura se realizarán los cálculos.
- *Presión de operación*: introducir la presión de operación del tanque, en mbarg.
- *Presión de diseño*: introducir la presión de diseño del tanque, en mbarg. El programa mostrará un aviso de error en caso de que se introduzca una presión no compatible con el alcance de API 620 o alguno de sus anexos. Con esta presión se realizarán los cálculos.
- *Relación operación/diseño*: se rellena automáticamente. Es el cociente entre las presiones de operación y diseño necesario para cálculos posteriores.
- *Densidad específica*: introducir la densidad específica del fluido.

3.4.2.4. Datos del material

Se deberá introducir el material empleado en la construcción de cada una de las partes del tanque:

- *Material del cuerpo*: se deberá escoger de un desplegable el material utilizado para el cuerpo.
- *Material del techo*: se deberá escoger de un desplegable el material utilizado para el techo.
- *Material del fondo*: se deberá escoger de un desplegable el material utilizado para el

fondo.

- *Densidad*: introducir la densidad del material.

3.4.2.5. Propiedades del cuerpo

Una vez introducido el material del cuerpo, se rellenarán automáticamente el límite elástico, la tensión de rotura, la tensión máxima admisible de tracción y la tensión máxima admisible para la prueba hidráulica, en Mpa.

Propiedades del techo

Una vez introducido el material del techo, se rellenarán automáticamente el límite elástico, la tensión de rotura, la tensión máxima admisible de tracción y la tensión máxima admisible para la prueba hidráulica, en Mpa.

Propiedades del fondo

Una vez introducido el material del fondo, se rellenarán automáticamente el límite elástico, la tensión de rotura, la tensión máxima admisible de tracción y la tensión máxima admisible para la prueba hidráulica, en Mpa.

3.4.2.6. Datos del aislante

Si el tanque almacena productos que necesitan permanecer a temperaturas muy bajas, el tanque precisará de aislamiento. En caso de indicarlo así en la celda correspondiente, aparecerán un conjunto de celdas pidiendo la siguiente información:

- *Densidad del aislante*: introducir la densidad del aislante, en Kg/m³.
- *Espesor del aislante en el cuerpo*: introducir espesor del aislante en el cuerpo, en mm.
- *Espesor del aislante en el techo*: introducir espesor del aislante en el techo, en mm.
- *Espesor del aislante en el fondo*: introducir espesor del aislante en el fondo, en mm.

En caso de que se trate de un sistema de tanques doble, el programa indicará que el espesor de aislamiento a introducir será la mitad de la distancia anular entre tanques.

3.4.2.7. Ejecución de macros

Una vez introducidos todos los datos, se le pedirá al usuario que ejecute las siguientes macros en Excel:

- *TECHO*: selecciona en la hoja de cálculo correspondiente al cálculo del techo sólo el tipo de techo introducido.
- *CUERPO*: introduce una tabla con el mismo número de filas que el número de virolas introducido en la hoja de cálculo correspondiente al cálculo del cuerpo, de forma que aparecen los resultados en cada virola automáticamente.
- *FONDO*: selecciona en la hoja de cálculo correspondiente al cálculo del fondo sólo el cálculo del fondo aplicable según los datos introducidos.
- *SISMO*: selecciona en la hoja de cálculo correspondiente al cálculo del sismo sólo el cálculo aplicable según los datos introducidos.

En el Anexo II se muestra el código de VBA de cada una de las anteriores macros.

3.4.3. CÁLCULO DEL TECHO

En este apartado se desarrollaran los pasos a seguir para calcular el espesor del techo y la unión techo cuerpo según la sección 5 de la norma.

3.4.3.1. Aplicación de la norma

3.4.3.1.1. Nomenclatura

La nomenclatura utilizada es la siguiente:

- P : es la presión total, en lbf/in^2 , actuando en un determinado nivel del tanque bajo unas condiciones particulares de operación.

$$P = P_l + P_g \quad (3-1)$$

- P_l : Presión hidrostática en el nivel considerado.
- P_g : Presión de diseño.
- T_1 : Es la fuerza meridional ejercida sobre la pared del tanque, en lbf/in . Es positiva para tracción y negativa para compresión.
- T_2 : Es la fuerza circunferencial ejercida sobre la pared del tanque, en lbf/in . Es positiva para tracción y negativa para compresión.
- R_1 : es el radio de curvatura de la pared del tanque, en pulgadas, en un plano meridional y en el nivel considerado.
- R_2 : es la longitud, en pulgadas, de la normal a la pared del tanque en el nivel considerado, medido desde la pared del tanque a su eje de revolución.
- R_3 : es el radio de la base del cono, en pulgadas, en el nivel considerado.
- W : es el peso total, en lb, de la porción del tanque escogida y su contenido. Estrictamente hablando, el peso total incluiría el peso de todo metal, gas y líquido en la porción del tanque tratada; sin embargo, el peso del gas es insignificante, y el peso del metal puede ser insignificante comparado con el peso del líquido. W recibirá el mismo signo que P cuando actúa en la misma dirección que la presión sobre la cara horizontal del cuerpo libre; se le dará el signo opuesto cuando actúe en la dirección opuesta.
- F : es la suma, en lb, de las fuerzas en todos y cada uno de los vínculos internos o externos, cerchas, columnas, faldones u otros dispositivos o soportes estructurales que actúen en el cuerpo libre. F recibirá el mismo signo que P cuando actúe en la misma dirección que la presión sobre la cara horizontal del cuerpo libre; se le dará el signo opuesto cuando actúe en la dirección opuesta.
- A_t : es el área de la sección transversal, en pulgadas cuadradas, del interior del tanque en el nivel considerado;
- t : es el espesor, en pulgadas, de cada una de las partes estructurales del tanque del tanque, incluida la tolerancia a la corrosión.
- c : es el espesor de corrosión, en pulgadas.
- E : es la eficiencia de junta, según la tabla 5.2 de API 620.
- S_t : es la tensión máxima admisible de tracción, en lbf/in^2 , según API 620.
- S_c : es la máxima tensión admisible de compresión, en lbf/in^2 .

- α : es el ángulo mitad de vértice del techo cónico.

3.4.3.1.2. Cálculo de fuerzas

La norma API 620 establece diferentes ecuaciones para el cálculo de las fuerzas meridional y circunferencial en cada parte estructural del tanque en función de su geometría. En este caso, son de aplicación las siguientes:

- Para techo esférico tipo domo:

$$R_1 = R_2 = R \quad (3-2)$$

$$T_1 = \frac{R}{2} \left(P + \frac{W+F}{A_t} \right) \quad (3-3)$$

$$T_2 = RP - T_1 \quad (3-4)$$

- Para techo cónico:

$$T_1 = \frac{R_3}{2\cos\alpha} \left(P + \frac{W+F}{A_t} \right) \quad (3-5)$$

$$T_2 = \frac{PR_3}{\cos\alpha} \quad (3-6)$$

Como se puede apreciar, en el cálculo de las fuerzas entra en juego el peso, por lo que será necesario un proceso iterativo en el que el espesor escogido para calcular dicho peso será el mínimo establecido por la norma en función del diámetro del tanque. Es importante volver a señalar que en la mayoría de ocasiones, el peso propio del tanque será despreciable frente al peso del líquido o al efecto de la presión interna.

3.4.3.1.3. Cálculo de espesores

Una vez calculadas las fuerzas, API 620 establece diferentes procedimientos para calcular el espesor de las diferentes partes del tanque en función de los valores de las fuerzas meridional y circunferencial. Para un tanque cilíndrico y en ámbitos de operación donde no son aplicables los anexos Q y R, estas fuerzas adquirirán con toda seguridad valores positivos, ya que la presión mínima de diseño para estos casos hará imposible que el tanque opere a vacío. Para esta situación se seguirá el siguiente procedimiento:

- Si las fuerzas T_1 y T_2 son ambas positivas, indicando tracción, la mayor de las dos se usará para calcular el espesor requerido en ese nivel, como se muestra en las siguientes ecuaciones:

$$t = \frac{T_1}{E S_{ts}} + c \text{ o } t = \frac{T_2}{E S_{ts}} + c \quad (3-7)$$

Sin embargo, los Anexos Q y R si pueden operar a vacío, ya que la presión mínima de diseño para dichos anexos es de -17 mbarg. En estos casos los espesores en cada nivel se calculan como sigue:

- Si las fuerzas T_1 y T_2 son ambas negativas y desiguales, indicando compresión, el espesor se calculará siguiendo los siguientes pasos:

LUIS JULIO MARTÍNEZ BARTHE

- Paso 1: se calculan los espesores de la siguiente forma:

$$t = \frac{\sqrt{(T' + 0.8T'')R'}}{1342} + c \quad (3-8)$$

$$t = \frac{\sqrt{T''R''}}{1000} + c \quad (3-9)$$

En ambas ecuaciones, el valor de T' debe ser igual a la mayor de las dos fuerzas coexistentes; el valor de T'' será igual a la más pequeña de las dos fuerzas coexistentes. R' y R'' serán iguales a R1 y R2 respectivamente, si la fuerza de la unidad mayor es circunferencial; por el contrario, R' y R'' serán iguales a R2 y R1, respectivamente, si la fuerza de la unidad mayor es meridional.

- Paso 2: la relación de espesor a radio, $(t - c) / R$, se debe verificar para cada espesor en función del valor de R utilizado en el cálculo, ya sea por la ecuación (3-8) o la ecuación (3-9). Si ambas relaciones de espesor a radio son menores a 0.00667, el mayor de los dos espesores calculados en el Paso 1 será el espesor requerido para la condición bajo consideración; de lo contrario, se debe seguir el Paso 3.
- Paso 3: si uno de los dos ratios espesor a radio es mayor a 0.00667, se calculan los espesores de la siguiente forma:

$$t = \frac{T' + 0.8T''}{15000} + c \quad (3-10)$$

$$t = \frac{T''}{8340} + c \quad (3-11)$$

- Paso 4: la relación de espesor a radio, $(t - c) / R$, se debe verificar para cada espesor usando un valor de R igual a R' como se define en paso 1 en relación con el espesor determinado a partir de la ecuación (3-10) y un valor de R igual a R'' con el espesor determinado a partir de la ecuación (3-11). Si ambas relaciones de espesor a radio son mayores a 0.0175, el mayor de los dos grosores calculados en el Paso 3 será el espesor requerido para la condición bajo consideración; de lo contrario, se debe seguir el Paso 5.
- Paso 5: si uno de los ratios espesor a radio está comprendido entre 0.00667 y 0.0175 y el espesor se ha calculado con las ecuaciones (3-8) o (3-10), se deberá encontrar un espesor que satisfaga la siguiente ecuación:

$$T' + 0.8T'' = \frac{10150(t-c) + 277400(t-c)^2}{R'} \quad (3-12)$$

Por el contrario, si el espesor se ha calculado con las ecuaciones (3-9) o (3-11), se seleccionará un espesor que satisfaga la siguiente ecuación:

$$T'' = \frac{5650(t-c) + 154200(t-c)^2}{R''} \quad (3-13)$$

APLICACIÓN INFORMÁTICA PARA EL DIMENSIONAMIENTO INTEGRAL DE TANQUES
MEDIANTE LA NORMA API 620.

LUIS JULIO MARTÍNEZ BARTHE

- Paso 6: si el espesor no ha sido establecido en ninguno de los pasos anteriores, se seleccionará uno de forma que los valores de S_{cs} calculados con las fuerzas T_1 y T_2 deberán cumplir los siguientes requisitos:

- S_{cs} no deberá superar el valor de S_{cs} , el cual adquirirá los siguientes valores:

- Si la relación espesor a radio es menor que 0.00667:

$$S_{cs} = 1.800.000(t - c)/R \quad (3-14)$$

- Si la relación espesor a radio está entre 0.00667 y 0.0175:

$$S_{cs} = 10150 + 277.400(t - c)/R \quad (3-15)$$

- Si la relación espesor a radio es mayor que 0.0175:

$$S_{cs} = 15.000 \quad (3-15)$$

- Las tensiones de compresión calculadas estarán limitadas por las siguientes inecuaciones:

$$(S_1 + 0.8S_s)/S_{cs} \leq 1.0 \quad (3-16)$$

$$1.8S_s/S_{cs} \leq 1.0 \quad (3-17)$$

Dónde

S_1 : es la mayor tensión, en lbf/in^2

S_s : es la menor tensión, en lbf/in^2

Después de realizar diversas comprobaciones con el programa objeto de este proyecto y teniendo en cuenta su alcance, se ha concluido que los métodos de cálculo de espesor descritos anteriormente son los únicos que aplican entre todos los descritos en la norma API 620.

3.4.3.1.4. Cálculo de unión techo-cuerpo

Cuando el techo de un tanque a presión es cónico o tipo domo y está unido a una pared cilíndrica, se producen fuerzas de compresión circunferenciales y meridionales en la unión que pueden combatirse con una región curvada o con la adición de un área participativa en dicha unión.

El objetivo de este apartado es calcular el área participativa adicional necesaria y seleccionar el tipo de configuración constructiva para incorporarla al tanque.

3.4.3.1.4.1. Nomenclatura

La nomenclatura para este apartado es la siguiente:

- Wh : es el ancho, en pulgadas, de la parte del techo que participa en resistir la fuerza circunferencial que actúa sobre la región de compresión;
- Wc : es el ancho correspondiente, en pulgadas, de pared lateral participante;
- th : es el espesor, en pulgadas, del techo cerca de la unión con la pared lateral, incluido el

LUIS JULIO MARTÍNEZ BARTHE

sobreespesor de corrosión;

- t_c : es el espesor correspondiente, en pulgadas, de las paredes laterales cilíndricas cerca de la unión con el techo;
- R_2 : es la longitud, en pulgadas, de la normal al techo en la unión entre el techo y las paredes laterales, medida desde el techo hasta el eje de revolución vertical del tanque;
- R_c : es el radio horizontal, en pulgadas, de la pared lateral cilíndrica;
- T_1 : es la fuerza meridional en el techo del tanque en su unión con la pared lateral, en lbf / in;
- T_2 : es la fuerza circunferencial en el techo del tanque en su unión con la pared lateral, en lbf / in;
- T_{2s} : es la fuerza circunferencial en la pared lateral cilíndrica en su unión con el techo, en lbf / in;
- α : es el ángulo entre la dirección de T_1 y la vertical, en °.
- Q : es la fuerza circunferencial total, en lb, que actúa en una sección transversal vertical a través de la región de compresión;
- A_c : es el área neta, en pulgadas², de sección transversal vertical requerida en la región de compresión, sin incluir espesores de corrosión.
- S_{ts} : es el valor de tensión máxima admisible para tracción, en lbf / in², como se muestra en la Tabla 5-1;
- E : es la eficiencia de junta en la unión del techo con el cuerpo, según la tabla 5.2 de API 620.

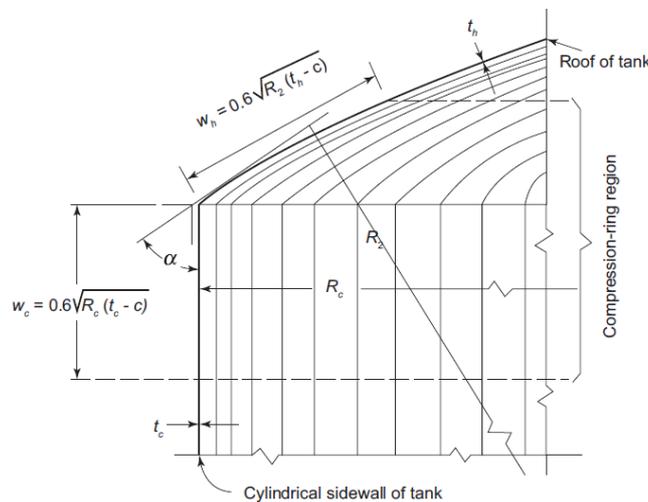


Ilustración 4. Unión techo-cuerpo

3.4.3.1.4.2. Cálculo de área participativa adicional

A continuación se muestran las fórmulas utilizadas para calcular el área participativa adicional:

$$Wh = 0.6 \sqrt{R_2(th - c)} \quad (3-18)$$

APLICACIÓN INFORMÁTICA PARA EL DIMENSIONAMIENTO INTEGRAL DE TANQUES
MEDIANTE LA NORMA API 620.

LUIS JULIO MARTÍNEZ BARTHE

$$Wc = 0.6 \sqrt{R_c(tc - c)} \quad (3-19)$$

$$Q = T_2Wh + T_{2s}Wc - T_1R_c \text{sen}\alpha \quad (3-20)$$

Si el valor de Q es positivo, indicando tracción, se utilizará:

$$A_c = Q/St_sE \quad (3-21)$$

Si el valor de Q es negativo, indicando compresión, se utilizará:

$$A_c = Q/15.000 \quad (3-22)$$

Si la fuerza Q es negativa, indicando compresión, entonces la proyección horizontal del área participativa del techo debe tener un ancho en una dirección radial no inferior a 0,015 veces el radio horizontal de la pared del tanque al nivel de la unión entre el techo y las paredes laterales. Si esto no se cumple, se procederá como se indica a continuación:

La configuración constructiva elegida para incorporar el área participativa adicional al tanque deberá cumplir los siguientes requisitos:

- El ancho horizontal del perfil angular, barra o viga no debe ser menor que 0.015 veces el radio horizontal, R_c , de la pared del tanque en el nivel de la unión del techo y las paredes laterales, excepto cuando la sección transversal que se agregará en dichos perfiles o barras no supere la mitad del área total requerida por las ecuaciones (3-20) o (3-21). El requisito de anchura anterior puede descartarse si la proyección horizontal del área participativa del techo, wh , es igual o superior a $0.015 R_c$ o, si con un perfil angular o barra ubicada fuera del tanque, la suma de la proyección horizontal de wh , y el ancho horizontal del perfil angular, barra o viga añadidos es igual o mayor que $0.015 R_c$.
- El área participativa adicional que habrá que incorporar será la diferencia entre el área participativa neta (calculada en (3-20) o (3-21)) y el área participativa de la pared y el techo.

A continuación se muestra un esquema con diversas configuraciones constructivas permitidas:

LUIS JULIO MARTÍNEZ BARTHE

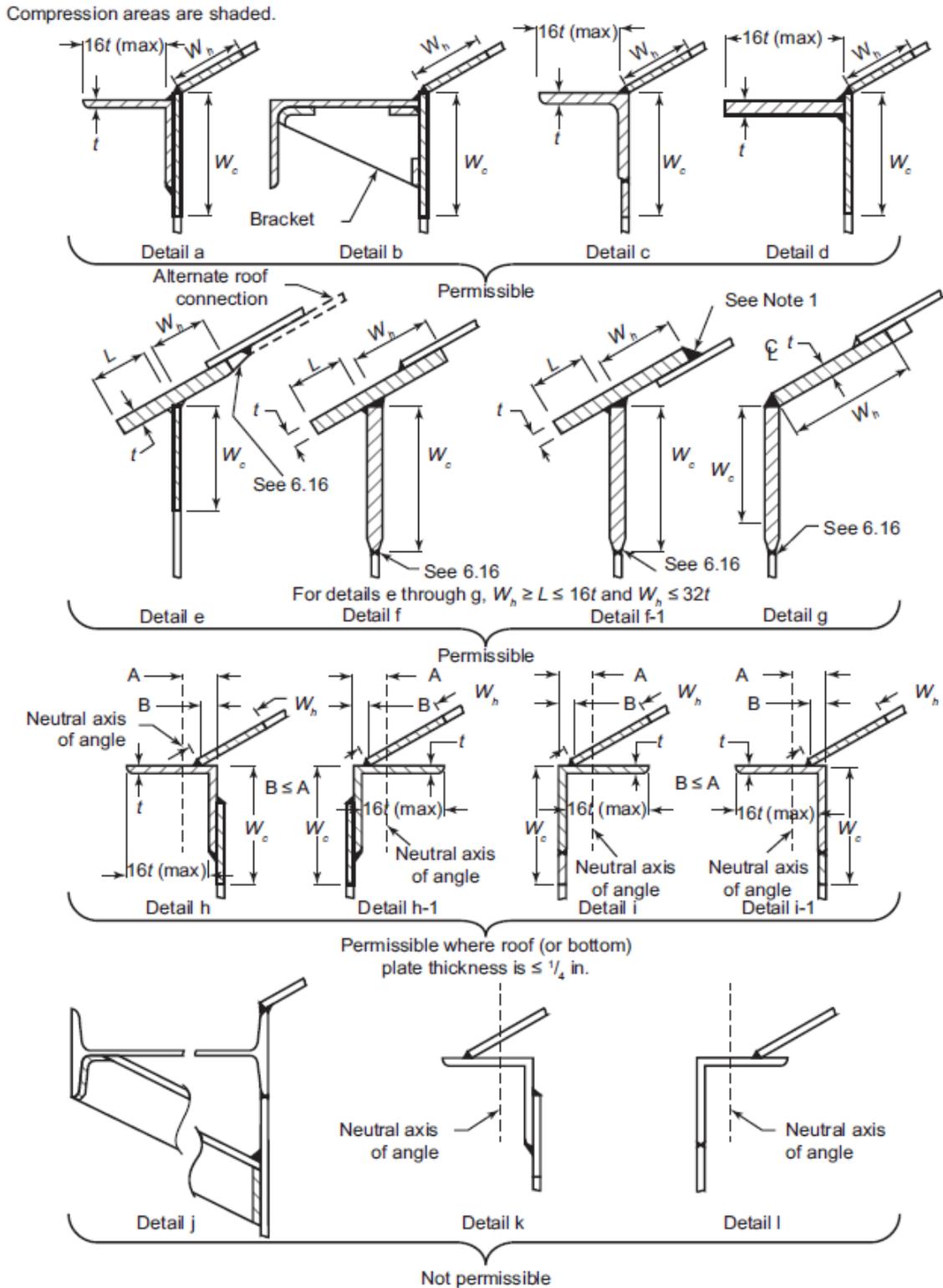


Ilustración 5. Configuraciones constructivas

Como se puede apreciar en la anterior figura, la proyección horizontal de la configuración elegida no puede superar 16 veces su espesor. Si es así, necesitará ser arriostrado cumpliendo los requisitos expuestos en el apartado 5.12.5.8 de la norma.

3.4.3.2. Cálculo de techo autoportante con aplicación informática

Una vez seleccionada la hoja de cálculo “TECHO” y ejecutada la macro “TECHO”, se

mostrarán diversas celdas de cálculo en función de la opción escogida. Como nivel de análisis, el programa utiliza la altura del techo, es decir, se considera el techo por completo.

Es importante señalar que las celdas que utilizan unidades imperiales para los cálculos se encuentran ocultas en la hoja de cálculo.

3.4.3.2.1. Cálculo de espesor para techo cónico. T1 y T2 positivas.

A continuación se explican cada una de las celdas de cálculo:

- *Espesor mínimo*: Una vez seleccionada la hoja de cálculo “TECHO”, lo primero que aparece es el espesor mínimo según la norma, en mm. Se utilizará este espesor en caso de que el espesor de cálculo sea menor.
- *Ángulo del cono*: muestra el ángulo introducido en la hoja “DATOS”, en °.
- *Altura del cono*: muestra la altura calculada en la hoja “DATOS”, en m, según la ecuación (1-1).
- *Área del techo*: muestra el área del techo calculada con los datos introducidos, en m², según la siguiente fórmula:

$$A_t = \frac{\pi R h}{\cos \alpha} \quad (3-23)$$

Dónde:

A_t = área del techo, en m².

h = altura del techo, en m.

R = radio de la sección, en m.

α = ángulo mitad de vértice del cono, en °.

- *Generatriz*: muestra la generatriz del cono, en m, según la siguiente fórmula:

$$G = h / \cos \alpha \quad (3-24)$$

Dónde:

G = generatriz, en m.

h = altura del techo, en m.

α = ángulo mitad de vértice del cono, en °.

- *Material*: muestra el material introducido en la hoja “DATOS” para el techo.
- *Radio de la sección*: muestra el radio según la hoja “DATOS”, en m.
- *Área de la sección*: muestra el área de sección en el nivel de análisis, en m², según la siguiente fórmula:

$$A_s = \pi R^2 \quad (3-25)$$

LUIS JULIO MARTÍNEZ BARTHE

Dónde:

A_s = área de la sección, en m.

R = radio de la sección, en m.

- *Peso de cargas vivas*: si se ha introducido en la hoja “DATOS” que el tanque está fuera de España, habrá que introducir la carga de nieve, en Kg, correspondiente a la zona geográfica según su normativa. Si el tanque está situado en España y se ha introducido la provincia en la que se encuentra en la hoja “DATOS”, esta celda se rellenará automáticamente con las cargas de nieve recogidas en el CTE, transformada en Kg según la siguiente fórmula:

$$C_n = C_{CTE} * 101,4 * A_t \quad (3-26)$$

Dónde:

C_n = carga de nieve, en Kg.

C_{CTE} = carga de nieve según CTE, en KN/m².

A_t = área del techo, en m².

El signo de esta celda es negativo, ya que la presión de operación del tanque es positiva.

- *Peso de plataformas, tuberías...*, F : en esta celda habrá que introducir el peso, en Kg, de todos los componentes auxiliares y accesorios que irán situados en el techo. El signo de esta celda es negativo, ya que la presión de operación del tanque es positiva.
- *Peso de cargas muertas*, W : en esta celda se muestra el peso del techo calculado con el espesor mínimo requerido por la norma, en Kg, según la siguiente fórmula:

$$P_{techo} = \pi GR \frac{t_{min}}{1000} D + A_t t_{ais} D_{ais} + F \quad (3-27)$$

Dónde:

P_{techo} = peso del techo, en Kg.

t_{min} = espesor mínimo del techo, en mm.

D = densidad del acero, en Kg/m³.

t_{ais} = espesor del aislamiento, en mm.

A_t = área del techo, en m².

D_{ais} = espesor del aislamiento, en mm.

F =Peso de plataformas, tuberías, etc., en Kg.

- *Presión del tanque*, P : en esta celda se muestra la presión de diseño introducida en la hoja “DATOS”, en barg.
- *Fuerza meridional* T_1 : en esta celda se muestra la conversión a Kg/cm de la fuerza

meridional calculada en la celda adyacente en unidades imperiales según la ecuación (3-5) (la cual está oculta).

- *Fuerza circunferencial T_2* : en esta celda se muestra la conversión a Kgf/cm de la fuerza circunferencial calculada en la celda adyacente en unidades imperiales según la ecuación (3-6) (la cual está oculta).
- *Tensión máxima admisible, St_s* : muestra la tensión máxima admisible de tracción según API 620, en bar.
- *Espesor T_1* : muestra el espesor calculado para la fuerza meridional, en mm, según la ecuación (3-7).
- *Espesor T_2* : muestra el espesor calculado para la fuerza circunferencial, en mm, según la ecuación (3-8).
- *Espesor máximo*: muestra el espesor máximo de los dos anteriores, en mm.
- *Espesor incluyendo corrosión*: muestra el espesor anterior más el espesor de corrosión especificado en la hoja “DATOS”.
- *Espesor adoptado*: muestra el espesor finalmente adoptado, en mm.
- *Peso*: muestra el peso total del techo utilizando la ecuación (3-27), pero ahora con el espesor finalmente adoptado y teniendo en cuenta las cargas vivas.

3.4.3.2.2. Cálculo de espesor para techo domo. T1 y T2 positivas.

A continuación se explican cada una de las celdas de cálculo:

- *Espesor mínimo*: lo primero que aparece es el espesor mínimo según la norma, en mm. Se utilizará este espesor en caso de que el espesor de cálculo sea menor.
- *Ángulo del domo*: muestra el ángulo que el domo forma con la vertical en la unión techo cuerpo, en °, necesario para apartados posteriores. Se utiliza la siguiente fórmula:

$$\alpha = \arccos\left(\frac{R_c}{R_2}\right) \quad (3-28)$$

Dónde:

α = ángulo del domo, en m.

R_c = radio del depósito, en m.

R_2 = es la longitud, en pulgadas, de la normal al techo en la unión entre el techo y las paredes laterales, medida desde el techo hasta el eje de revolución vertical del tanque, en m.

- *Altura del domo*: muestra la altura calculada en la hoja “DATOS”, en m, según la ecuación (1-2).
- *Área del techo*: muestra el área del techo calculada con los datos introducidos, en m², según la siguiente fórmula:

$$A_t = 2\pi R h \quad (3-29)$$

Dónde:

APLICACIÓN INFORMÁTICA PARA EL DIMENSIONAMIENTO INTEGRAL DE TANQUES
MEDIANTE LA NORMA API 620.

LUIS JULIO MARTÍNEZ BARTHE

A_t = área del techo, en m^2 .

h = altura del techo, en m.

R = radio de la esfera, en m.

- *Perímetro*: muestra el perímetro del casquete esférico, en m, según la siguiente fórmula:

$$P = \pi h \quad (3-30)$$

Dónde:

P = perímetro, en m.

h = altura del techo, en m.

- *Material*: muestra el material introducido en la hoja “DATOS” para el techo.
- *Radio de la sección*: muestra el radio del depósito según la hoja “DATOS”, en m.
- *Área de la sección*: muestra el área de sección en el nivel de análisis, en m^2 , según la ecuación (3-25).
- *Peso de cargas vivas*: si se ha introducido en la hoja “DATOS” que el tanque está fuera de España, habrá que introducir la carga de nieve, en Kg, correspondiente a la zona geográfica según su normativa. Si el tanque está situado en España y se ha introducido la provincia en la que se encuentra en la hoja “DATOS”, esta celda se rellenará automáticamente con las cargas de nieve recogidas en el CTE, transformada en Kg según la siguiente fórmula:

$$C_n = C_{CTE} * 101,4 * A_t \quad (3-31)$$

Dónde:

C_n = carga de nieve, en Kg.

C_{CTE} = carga de nieve según CTE, en KN/ m^2 .

A_t = área del techo, en m^2 .

El signo de esta celda es negativo, ya que la presión de operación del tanque es positiva.

- *Peso de plataformas, tuberías...*, F : en esta celda habrá que introducir el peso, en Kg, de todos los componentes auxiliares y accesorios que irán situados en el techo. El signo de esta celda es negativo, ya que la presión de operación del tanque es positiva.
- *Peso de cargas muertas*, W : en esta celda se muestra el peso del techo calculado con el espesor mínimo requerido por la norma, en Kg, según la siguiente fórmula:

$$P_{techo} = 2\pi R \frac{t_{min}}{1000} D + A_t t_{ais} D_{ais} + F \quad (3-32)$$

Dónde:

P_{techo} = peso del techo, en Kg.

t_{min} = espesor mínimo del techo, en mm.

APLICACIÓN INFORMÁTICA PARA EL DIMENSIONAMIENTO INTEGRAL DE TANQUES
MEDIANTE LA NORMA API 620.

LUIS JULIO MARTÍNEZ BARTHE

D = densidad del acero, en Kg/m^3 .

t_{ais} = espesor del aislamiento, en mm.

A_t = área del techo, en m^2 .

D_{ais} = espesor del aislamiento, en mm.

F = peso de plataformas, tuberías, etc., en Kg.

- *Presión del tanque, P* : en esta celda se muestra la presión de diseño introducida en la hoja “DATOS”, en barg.
- *Fuerza meridional T_1* : en esta celda se muestra la conversión a Kgf/cm de la fuerza meridional calculada en la celda adyacente en unidades imperiales, según la ecuación (3-3) (la cual está oculta).
- *Fuerza circunferencial T_2* : en esta celda se muestra la conversión a Kgf/cm de la fuerza circunferencial calculada en la celda adyacente en unidades imperiales según la ecuación (3-4) (la cual está oculta).
- *Tensión máxima admisible, S_t* : muestra la tensión máxima admisible de tracción según API 620, en bar.
- *Espesor T_1* : muestra el espesor calculado para la fuerza meridional, en mm, según la ecuación (3-7).
- *Espesor T_2* : muestra el espesor calculado para la fuerza circunferencial, en mm, según la ecuación (3-7).
- *Espesor máximo*: muestra el espesor máximo de los dos anteriores, en mm.
- *Espesor incluyendo corrosión*: muestra el espesor anterior más el espesor de corrosión especificado en la hoja “DATOS”.
- *Espesor adoptado*: muestra el espesor finalmente adoptado, en mm.
- *Peso*: muestra el peso total del techo utilizando la ecuación (3-32), pero ahora con el espesor finalmente adoptado y teniendo en cuenta las cargas vivas.

3.4.3.2.3. Cálculo de espesor para techos cónico y domo. T_1 y T_2 negativas.

Si es de aplicación el Anexo Q o el Anexo R, es posible que la presión de operación sea negativa (hasta -17 mbarg). Esto provoca que la presión vaya en el mismo sentido que todas las cargas del techo, provocando que T_1 y T_2 sean de compresión. Por tanto, es necesario implementar un método de cálculo de espesor para este caso. Dicho método es el mismo tanto para el techo domo como para el techo cónico.

Si al introducir los datos de operación, el programa detecta que T_1 y T_2 son negativas, automáticamente mostrará el siguiente mensaje:” ATENCIÓN: T_1 Y T_2 SON NEGATIVAS. PARA CALCULAR EL ESPESOR SE UTILIZA EL MÉTODO DESCRITO EN 5.10.3.5.”

Una vez calculadas las fuerzas T_1 y T_2 , se activarán las siguientes celdas:

- *Cálculo de t_1* : muestra el resultado proveniente de la ecuación (3-8)
- *Cálculo de t_2* : muestra el resultado proveniente de la ecuación (3-9)
- *Espesor a radio t_1* : muestra el resultado proveniente de la siguiente fórmula:

$$ER = (t_1 - c)/R \quad (3-33)$$

Dónde:

ER= ratio espesor a radio.

t_1 = espesor 1, en m.

c= espesor de corrosión, en m.

R= radio de la sección, en m.

- *Espesor a radio t_2* : muestra el resultado proveniente de la siguiente fórmula:

$$ER = (t_2 - c)/R \quad (3-34)$$

Dónde:

ER= ratio espesor a radio.

T_2 = espesor 2, en m.

c= espesor de corrosión, en m.

R= radio de la sección, en m.

A continuación el programa escogerá el máximo de los dos espesores calculados y valorará su ratio espesor a radio. Si dicho ratio es menor que 0.00667, este será el espesor escogido, ya que las celdas de cálculo de espesor del método para T_1 y T_2 positivas se desactivarán automáticamente. Es necesario señalar que tras realizar multitud de pruebas, es muy poco probable que el ratio espesor a radio sea mayor que 0.00667 (ya que para ello deberían alcanzarse espesores muy grandes para radios muy pequeños), pero si llegase a suceder, el programa indica que se continúe con el procedimiento descrito en el apartado 5.10.3.5 de la norma o 2.1.3 de este proyecto.

Existe un rango muy pequeño y poco probable de presiones (aproximadamente entre 0 y 6 mbarg) para las cuáles se dan los casos en que T_1 sea negativa y T_2 sea positiva. No se han implementado en el programa los métodos que la norma expone para este caso, ya que aún implementándolos, resultaría un espesor tan pequeño que acabaría escogiéndose el mínimo establecido. Si se diese este excepcional caso, el programa indica que hemos de dirigirnos al apartado 5.10.3.3 para calcularlo, aunque se acabe escogiendo el mínimo.

3.4.3.2.4. Cálculo de unión techo cuerpo para techos cónico y domo.

Una vez calculado el espesor para T_1 y T_2 positivas, el programa mostrará una serie de celdas con los cálculos necesarios para seleccionar una configuración estructural que aporte el área participativa adicional requerida en la unión. Estas celdas se explican a continuación:

- *Espesor del techo, th* : en esta celda se muestra el espesor del techo en mm.
- *Ángulo del domo, α , o ángulo del techo cónico, α* : es el ángulo entre la dirección de T_1 y la vertical, en °, según la ecuación (3-26) para techo domo o según el ángulo introducido en la

LUIS JULIO MARTÍNEZ BARTHE

hoja de cálculo “DATOS” para techo cónico.

- *Espesor de la última virola de la pared, tc*: muestra el espesor de la última virola de la pared, en mm, calculada en la hoja de cálculo “CUERPO”.
- R_2 : muestra el valor de R_2 , en m, que resulta ser el radio del domo para techo domo. Para techo cónico se usa la siguiente fórmula:

$$R_2 = \left(\frac{Rc}{\cos\alpha} \right) \quad (3-35)$$

Dónde:

R_2 = longitud, en pulgadas, de la normal al techo en la unión entre el techo y las paredes laterales, medida desde el techo hasta el eje de revolución vertical del tanque, en m.

Rc = radio del depósito, en m.

α = ángulo mitad de vértice del cono, en m.

- *wh*: muestra el ancho, transformado a mm, de la parte del techo que participa en resistir la fuerza circunferencial que actúa sobre la región de compresión, según la ecuación (3-18).
- *wc*: muestra el ancho correspondiente, transformado a mm, de pared lateral participante según la ecuación (3-19).
- Q : es la fuerza circunferencial total, transformada a Kgf, que actúa en la sección transversal vertical a través de la región de compresión, según la ecuación (3-20).
- *Ac*: muestra el área neta, en mm^2 , de sección transversal vertical requerida en la región de compresión, sin incluir espesores de corrosión, según la ecuación (3-21) o (3-22) según proceda.
- *Proyección horizontal wh*: muestra la proyección horizontal de wh, en mm, según la siguiente ecuación:

$$Pwh = wh * \text{sena} \quad (3-36)$$

Dónde:

Pwh = es la proyección horizontal de wh, en mm.

Rc = radio del depósito, en m.

α = ángulo mitad de vértice del cono o ángulo del domo, según proceda, en °.

- *Área participativa techo*: muestra el área participativa que aporta el techo, en mm^2 , según la siguiente ecuación:

$$At = wh * th \quad (3-37)$$

Dónde:

At = es el área participativa del techo, en mm^2 .

- *Área participativa pared*: muestra el área participativa que aporta la pared, en mm², según la siguiente ecuación:

$$A_p = w_c * t_c \quad (3-38)$$

Dónde:

A_t = es el área participativa del techo, en mm².

- *Área adicional requerida*: muestra el área participativa adicional requerida, en mm², según la siguiente ecuación:

$$A_r = A_c - (A_t + A_c) \quad (3-39)$$

Dónde:

A_r = es el área adicional requerida, en mm².

Para facilitar la elección de una configuración constructiva que aporte el área participativa adicional requerida y dado la frecuencia con la que se usan los perfiles angulares para este tipo de configuraciones, si éste área resulta ser menor que 9060 mm², el programa seleccionará de un catálogo de perfiles angulares el requerido para cada caso en concreto. Se activarán dos celdas:

- *Perfil angular requerido*: muestra el angular seleccionado en función del área adicional requerida.
- *Peso*: muestra el peso del angular seleccionado, en Kg, según la siguiente ecuación:

$$P = P_a * 2\pi R \quad (3-40)$$

Dónde:

P = es el peso del angular, en Kg.

P_a = es el peso del angular, en Kg/m.

R = es el radio del depósito, en m.

3.4.4. CÁLCULO DEL CUERPO

En este apartado se describirán los métodos expuestos en API 620 para el cálculo del espesor de las diferentes virolas que componen la pared del tanque y para el cálculo de anillos rigidizadores intermedios. A continuación se explicará como se han implementado dichos métodos en la aplicación informática.

3.4.4.1. Aplicación de la norma

3.4.4.1.1. Nomenclatura

La nomenclatura utilizada es la siguiente:

- P : es la presión total, en lbf/in^2 , actuando en un determinado nivel del tanque bajo unas condiciones particulares de operación. Se calcula según la ecuación (3-1).
- T_1 : es la fuerza meridional ejercida sobre la pared del tanque, en lbf/in . Es positiva para tracción y negativa para compresión.
- T_2 : es la fuerza circunferencial ejercida sobre la pared del tanque, en lbf/in . Es positiva para tracción y negativa para compresión.
- R_1 : es el radio de curvatura de la pared del tanque, en pulgadas, en un plano meridional y en el nivel considerado.
- R_2 : es la longitud, en pulgadas, de la normal a la pared del tanque en el nivel considerado, medido desde la pared del tanque a su eje de revolución.
- R_c : radio del cilindro, en pulgadas.
- W : es el peso total, en lb, de la porción del tanque escogida y su contenido. Estrictamente hablando, el peso total incluiría el peso de todo metal, gas y líquido en la porción del tanque tratada; sin embargo, el peso del gas es insignificante, y el peso del metal puede ser insignificante comparado con el peso del líquido. W recibirá el mismo signo que P cuando actúa en la misma dirección que la presión sobre la cara horizontal del cuerpo libre; se le dará el signo opuesto cuando actúe en la dirección opuesta.
- F : es la suma, en lb, de las fuerzas en todos y cada uno de los vínculos internos o externos, cerchas, columnas, faldones u otros dispositivos o soportes estructurales que actúen en el cuerpo libre. F recibirá el mismo signo que P cuando actúe en la misma dirección que la presión sobre la cara horizontal del cuerpo libre; se le dará el signo opuesto cuando actúe en la dirección opuesta.
- A_t : es el área de la sección transversal, en pulgadas cuadradas, del interior del tanque en el nivel considerado;
- t : es el espesor, en pulgadas, de cada una de las partes estructurales del tanque del tanque, incluida la tolerancia a la corrosión.
- c : es el espesor de corrosión, en pulgadas.
- E : es la eficiencia de junta, según la tabla 5.2 de API 620.
- S_t : es la tensión máxima admisible de tracción, en lbf/in^2 , según API 620.

3.4.4.1.2. Cálculo de fuerzas

Al tratarse de paredes cilíndricas, las ecuaciones que son de aplicación según API 620 para el cálculo de fuerzas son las siguientes:

$$R_1 = \infty \quad (4-1)$$

$$R_2 = R_c \quad (4-2)$$

$$T_1 = \frac{R_c}{2} \left(P - \frac{W+F}{A_t} \right) \quad (4-3)$$

LUIS JULIO MARTÍNEZ BARTHE

$$T_2 = PR_c \quad (4-4)$$

Como se puede apreciar, en el cálculo de las fuerzas entra en juego el peso, por lo que será necesario un proceso iterativo en el que el espesor escogido para calcular dicho peso será el mínimo establecido por la norma en función del diámetro del tanque. Es importante volver a señalar que en la mayoría de ocasiones, el peso propio del tanque será despreciable frente al peso del líquido o al efecto de la presión interna.

3.4.4.1.3. Cálculo de espesores

Una vez calculadas las fuerzas, API 620 establece diferentes procedimientos para calcular el espesor de las diferentes partes del tanque en función de los valores de las fuerzas meridional y circunferencial. Para las paredes de un tanque cilíndrico, estas fuerzas adquirirán con toda seguridad valores positivos, ya que aunque se opere a la menor presión que se pueda operar (-17 mbarg), las fuerzas de presión hidrostática del fluido harán que las paredes del tanque siempre estén traccionadas (ya que esta norma no está diseñada para tanques que almacenan solamente gases). Por tanto, para calcular el espesor se seguirá el mismo procedimiento que describe la ecuación (3-7).

3.4.4.1.4. Cálculo de vigas intermedias de rigidización frente al viento

- Según la norma, la máxima altura sin rigidizar que puede tener un tanque (cuando lo requiera) no puede exceder el siguiente valor:

$$H_1 = 6(100t) \sqrt{\frac{(100t)^3}{D^3}} \quad (4-5)$$

Dónde:

H_1 = distancia vertical entre la viga de rigidización intermedia y la parte superior de la pared lateral, en ft.

t = espesor de la última virola de la pared, en pulgadas.

D = diámetro del tanque, en ft.

- Una vez calculada la altura máxima H_1 , se procederá al cálculo de la altura transformada. Este paso se encarga de cambiar el ancho real de cada virola por la que tendría si tuviese el espesor mínimo (el de la virola superior). A continuación se expone el procedimiento:
 - Cambiar el ancho (w) de cada virola de la pared lateral por un ancho transpuesto (Wtr) considerando el espesor de la virola superior, mediante la siguiente relación:

$$Wtr = w \sqrt{\left(\frac{t_{uniform}}{t_{actual}}\right)^5} \quad (4-6)$$

Dónde:

APLICACIÓN INFORMÁTICA PARA EL DIMENSIONAMIENTO INTEGRAL DE TANQUES
MEDIANTE LA NORMA API 620.

LUIS JULIO MARTÍNEZ BARTHE

tuniform= espesor de la virola superior, en pulgadas.

tactual= espesor de la virola objeto de cálculo, en pulgadas.

W= ancho de la virola objeto de cálculo, en ft.

Wtr= ancho transformado, en ft.

La suma del ancho transpuesto de cada virola dará la altura transformada de la pared.

- Si la altura transformada es mayor que H_1 , un anillo rigidizador intermedio será necesario.
 - La viga de viento intermedia debe ubicarse a una altura media de la pared lateral transformada para conseguir una estabilidad igual por encima y por debajo de esta. La ubicación de la viga en la pared lateral real debe estar en la misma virola y posición relativa de la pared lateral transpuesta, utilizando la relación de espesor anterior.
 - Se pueden utilizar otros lugares para la viga siempre que la altura de la pared lateral no rigidizada transformada no exceda de H_1 .
- Si la mitad de la altura de la pared lateral transformada excede la altura máxima, H_1 , una segunda viga intermedia se utilizará para reducir la altura de la pared lateral no rigidizada a una altura inferior al máximo.
- Las vigas intermedias de rigidización frente al viento no se deben unir a la pared lateral a menos de 6 pulgadas de una junta horizontal. Cuando la ubicación preliminar de una viga se encuentre a esta distancia, la viga se ubicará a 6 pulgadas debajo de la junta.
- El módulo de sección mínimo requerido, en pulgadas cúbicas, deberá ser determinado por la siguiente ecuación:

$$Z = 0.0001D^2H_1 \quad (4-7)$$

Dónde:

Z= módulo de sección, en ft^3 .

- Dónde se pueda ubicar un viga de rigidización frente al viento a una altura menor que H_1 se podrá sustituir, para el cálculo de Z, el valor de H_1 por el valor de altura utilizado.

3.4.4.2. Cálculo del cuerpo con aplicación informática

Una vez ejecutada la macro “CUERPO” y seleccionada la hoja de cálculo “CUERPO”, se podrán apreciar dos tablas con el mismo número de filas que virolas se hayan introducido en la hoja de cálculo “DATOS”. La primera tabla se encarga de calcular el espesor de cada una de las virolas que componen el cuerpo y la segunda del cálculo de la viga intermedia de rigidización frente al viento.

3.4.4.2.1. Cálculo de espesores

Como nivel de análisis, el programa utiliza la altura de cada virola empezando por la superior. De esta

APLICACIÓN INFORMÁTICA PARA EL DIMENSIONAMIENTO INTEGRAL DE TANQUES
MEDIANTE LA NORMA API 620.

LUIS JULIO MARTÍNEZ BARTHE

forma, se van calculando los espesores de las diferentes virolas teniendo en cuenta todo el peso situado en la virola inmediatamente anterior.

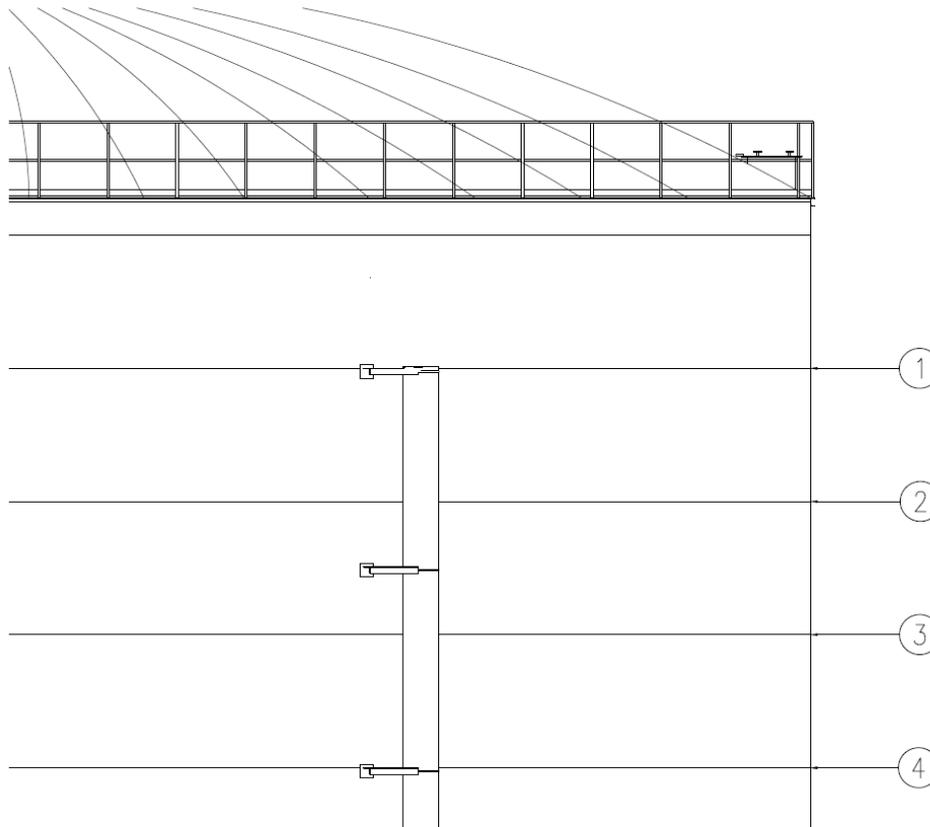


Ilustración 6. Niveles de análisis.

A continuación se explica cada una de las columnas que aparecen en la tabla:

- *Virola*: numera cada una de las virolas objeto de cálculo.
- *Altura de virola*: en cada una de estas celdas se deberá introducir la altura de cada virola, en m.
- *Altura de líquido*: muestra la altura de líquido respecto al nivel del suelo en cada virola, en m.
 - Para la primera virola tenemos que:

$$H_{l1} = \sum_{i=2}^n H_{vi} ; i=1 \dots n \quad (4-8)$$

Dónde:

H_{vi} = altura de cada virola, en m.

H_{l1} = nivel de líquido en la primera virola, en m.

n = nº virolas.

Así, si el nivel de líquido llega a la virola superior, se tendrá en cuenta la columna de líquido

que le afecta para el cálculo del espesor.

- Para el resto de virolas tenemos que:

$$H_{li} = H_{l1} - H_{vi} ; i=1\dots n \quad (4-9)$$

Dónde:

H_{li} = altura del líquido en cada virola, en m.

De esta forma, se contempla la posibilidad poco probable, aunque posible, de que la primera virola no contenga líquido. Si el nivel de líquido se encuentra por debajo de la primera virola, el programa mostrará un mensaje de error, ya que no está diseñado para ello.

- *Material*: muestra el material del cuerpo escogido en la hoja de cálculo “DATOS”.
- *Radio de la sección*: muestra el radio del tanque introducido en la hoja de cálculo “DATOS”, en m. Es el mismo para todas las virolas.
- *Área de la sección*: muestra el área de la sección, en m^2 . Es la misma para todas las virolas.
- *Peso de plataformas, tubuladuras...F*: en estas celdas habrá que introducir el peso de estructuras auxiliares, tubuladuras etc. que haya en cada virola, en Kg. Tendrá signo negativo, ya que genera compresión.
- *Peso del techo*: en estas celdas aparecerá el peso del techo calculado en la hoja de cálculo “DATOS”, en Kg. Tendrá signo negativo, ya que genera compresión.
- *Peso del tanque, W*: esta celda mostrará el peso total del tanque en cada nivel de análisis, de forma que a cada virola se le suma el peso del tanque en la propia virola más el peso de todas las anteriores, según las siguientes ecuaciones:
 - Para la primera virola tenemos que:

$$W_{v1} = (\rho_{mat}\pi DH_{v1} \frac{e_{min}}{1000} + 1000 * G\pi R^2 * (H_{v1} - (H - H_l)) + P_t + F_1 + \frac{e_{ais}}{1000} H_{v1}\pi D\rho_{ais}) \quad (4-10)$$

Dónde:

W_{v1} = peso total efectivo en la primera virola., en Kg.

ρ_{mat} = densidad del material del cuerpo, en Kg/m^3 .

D= diámetro del tanque, en m.

H_{v1} = altura de la primera virola, en m.

e_{min} = espesor mínimo del cuerpo, según la tabla 1, en mm.

G= densidad específica del fluido.

R= radio del tanque, en m.

H= altura del tanque, en m.

APLICACIÓN INFORMÁTICA PARA EL DIMENSIONAMIENTO INTEGRAL DE TANQUES
MEDIANTE LA NORMA API 620.

LUIS JULIO MARTÍNEZ BARTHE

H_l = altura del líquido, en m.

P_t = peso del techo, en Kg.

F_1 = peso de plataformas, tubuladuras etc., en Kg.

e_{ais} = espesor del aislante, en mm.

ρ_{ais} = densidad del aislante, en Kg.

- Para el resto de virolas tenemos que:

$$W_{vi} = (\rho_{mat}\pi D(H - H_{li})\frac{e_{min}}{1000} + 1000 * G\pi R^2 * (H_{l1} - H_{li} + (H_{v1} - (H - H_l)))) + P_t + F + \frac{e_{ais}}{1000}(H - H_{li})\pi D\rho_{ais} \quad (4-11)$$

$i=1 \dots n$

Dónde:

H_{li} = altura del líquido en cada virola, en m.

Como ya se ha comentado anteriormente, se ha considerado signo negativo para los pesos que generarán compresión y signo positivo para los pesos que generarán tracción.

- *Presión del tanque, P*: esta celda mostrará el peso total del tanque en cada nivel de análisis, de forma que a cada virola se le suma el peso del tanque en la propia virola más el peso de todas las anteriores, según las siguientes ecuaciones:

- Para la primera virola tenemos que:

$$P_{v1} = \frac{P}{1000} + 1000 * G\pi R^2 * (H_{v1} - (H - H_l)) / (A_t * 10000) \quad (4-12)$$

Dónde:

P_{v1} = Presión total en la primera virola., en barg.

- Para el resto de virolas tenemos que:

$$P_{vi} = \frac{P}{1000} + 1000 * G\pi R^2 * (H_l - H_{li} + (H_{v1} - (H - H_l))) / (A_t * 10000) ; i=1 \dots n \quad (4-12)$$

Dónde:

P_{vi} = Presión total en cada virola, en barg.

- *Fuerza meridional, T_1* : esta celda mostrará la fuerza meridional total, transformada a kgf/cm, en cada virola, utilizando la ecuación (4-3) para ello.
- *Fuerza circunferencial T_2* : esta celda mostrará la fuerza circunferencial total, transformada a kgf/cm, en cada virola, utilizando la ecuación (4-4) para ello.

- *Tensión máxima admisible, S_t* : muestra la tensión máxima admisible según API 620 en función del material escogido.
- *Espesor T_1* : muestra el espesor calculado para la fuerza meridional, en mm, según la ecuación (3-7).
- *Espesor T_2* : muestra el espesor calculado para la fuerza circunferencial, en mm, según la ecuación (3-7).
- *Espesor máximo*: muestra el espesor máximo de los dos anteriores, en mm.
- *Espesor incluyendo corrosión*: muestra el espesor anterior más el espesor de corrosión especificado en la hoja "DATOS".
- *Espesor adoptado*: muestra el espesor finalmente adoptado, en mm.
- *Peso*: muestra el peso total de cada virola, utilizando la siguiente ecuación.

$$W_{vi} = (\rho_{mat}\pi DH_{v1} \frac{e}{1000} + F_i + \frac{e_{ais}}{1000} H_{vi}\pi D\rho_{ais}) ; i=1\dots n \quad (4-10)$$

En la última celda de la columna se muestra el peso total del cuerpo.

3.4.4.2.2. Cálculo de viga de rigidización frente al viento

Una vez calculados los espesores, nos encontramos en disposición de ver si nuestro tanque necesita una viga intermedia de rigidización. Para ello, el programa implementa el método descrito en el apartado 4.1.4 de la siguientes forma:

- Inicialmente se muestra la siguiente celda:
 - *Altura H_1* : muestra el valor calculado en la ecuación (4-5).
- A continuación se podrá observar una tabla con las siguientes columnas:
 - *Virola*: numera cada una de las virolas objeto de cálculo.
 - W_i : muestra la altura real de cada virola, en m.
 - t_s : muestra el espesor real de cada virola, en mm.
 - W_v : muestra la altura transformada para cada virola, utilizando la ecuación (4-6). En la última celda de esta columna se muestra el sumatorio total de todas las alturas transformadas.
- A continuación el programa compara el sumatorio de las alturas transformadas con el valor de H_1 , y según lo dispuesto en el apartado 4.1.4, mostrará un mensaje indicando si hace falta viga intermedia de rigidización o no. En caso afirmativo, se mostrarán una serie de celdas en las que se calcula la altura a la que se situará la viga de rigidización:
 - *Altura transformada de anillo rigidizador*: muestra la mitad de la altura transformada total, en m.
 - *Espesor real de la virola de ubicación*: en esta celda deberemos introducir el espesor real de la virola de ubicación de la viga según la celda anterior, en mm.
 - *Altura real del anillo rigidizador*: muestra la altura real de la viga, en m.
- En caso de que hagan falta dos anillos rigidizadores, se mostrarán una serie de celdas análogas al apartado anterior, con la única diferencia de que la altura transformada de cada viga será un tercio de la altura total transformada.

- Por último, siempre aparecerá la siguiente celda:
 - *Momento resistente mínimo*: muestra el momento resistente mínimo, transformado a m^3 , según la ecuación (4-7).

3.4.5. CÁLCULO DEL FONDO

En este apartado se explicaran las características principales, método de cálculo e implementación en el programa de los fondos planos que poseen los tanques cilíndricos diseñados con API 620.

3.4.5.1. Aplicación de la norma

Este apartado se dividirá en los siguientes:

- Criterios generales para fondos.
- Fondos para tanques que siguen un criterio de diseño según Anexo R.
- Fondos para tanques que siguen un criterio de diseño según Anexo Q.

3.4.5.1.1. Criterios generales para fondos

La norma API 620 establece una serie de criterios generales que aplican a todos los fondos de los tanques calculados con dicha norma (incluidos los Anexos Q y R). A continuación se enumeran:

- Se considerará que los fondos apoyados directamente sobre cimentación no están sometidos a tensión.
- Todas las chapas inferiores deben tener un espesor nominal mínimo de 1/4 pulg., excluyendo cualquier tolerancia a la corrosión especificada por el cliente.
- Las placas inferiores se ordenarán con un tamaño suficiente para que, cuando se recorten, al menos un ancho de 1 pulgada proyecte más allá del borde exterior de la soldadura que une la parte inferior a la placa de la pared lateral.
- Las placas inferiores se ordenarán con un tamaño suficiente para que, cuando se recorten, al menos un ancho de 1 pulgada proyecte más allá del borde exterior de la soldadura que une la parte inferior a la placa de la pared lateral.
- Las uniones de tres placas en el fondo del tanque no deberán estar a menos de 12 pulgadas entre sí y 12 pulgadas desde la pared lateral.
- Las placas inferiores soldadas debajo de la pared lateral deberán tener los extremos exteriores de las juntas ajustadas y soldadas por solape, tal y como se indica en la siguiente figura:

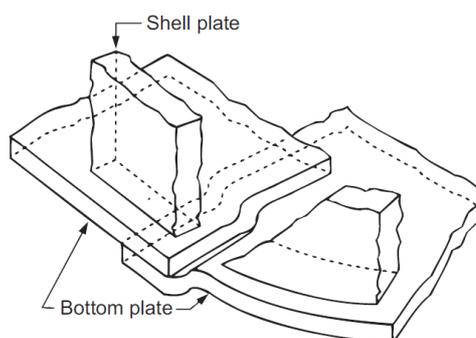


Ilustración 7. Soldadura de las chapas laterales del fondo

APLICACIÓN INFORMÁTICA PARA EL DIMENSIONAMIENTO INTEGRAL DE TANQUES
 MEDIANTE LA NORMA API 620.

LUIS JULIO MARTÍNEZ BARTHE

- Las placas inferiores debajo de la pared lateral cuyo espesor supera 3/8 de pulgada deben ser soldadas a tope. Las soldaduras a tope serán realizadas usando una tira de refuerzo de 1/8 pulg. de grosor como mínimo, o deberán ser soldadas a tope por ambos lados.
- Para grosores nominales de las chapas del fondo menores o iguales a 1/2 pulgada, la unión entre el borde inferior de la virola más baja y la chapa inferior debe ser una soldadura de filete continua colocada a cada lado de la virola de la pared. El tamaño del cordón de soldadura se indica en la siguiente tabla:

| Espesor de la última virola de la pared (mm) | Anchura mínima de la soldadura de filete (mm) |
|--|---|
| 4.76 | 4.76 |
| > 4,76 a 19,05 | 6.35 |
| >19,05 a 31,75 | 7.93 |
| > 31,75 a 38,1 | 9.52 |

Tabla 2. Espesor mínimo de de soldadura para fondos.

- Cuando el material de la pared lateral tenga un límite elástico mínimo especificado mayor a 248 Mpa cada soldadura se realizará con un mínimo de dos pasadas.

3.4.5.1.2. Fondos para tanques que siguen un criterio de diseño según Anexo R

Los recipientes de líquidos primarios y los recipientes de líquidos secundarios deberán tener placas inferiores anulares soldadas a tope con un ancho radial que proporcione al menos 24 pulgadas entre el interior del cuerpo y cualquier junta soldada por solape en el resto del fondo y al menos 2 pulgadas de proyección fuera del cuerpo. Se requiere un ancho radial mayor (L_{min}) de la placa anular cuando se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$L_{min} = \frac{390 t_b}{\sqrt{(H)(G)}} \quad (5-1)$$

Dónde:

t_b = espesor nominal de la chapa anular del fondo, en pulgadas.

H = altura del liquido, en pies.

G = densidad específica del líquido.

El espesor de la chapa anular del fondo vendrá dado por la siguiente tabla:

| Espesor de la primera virola del cuerpo (mm) | Tensión de diseño en la primera virola del cuerpo (Mpa) | | | |
|--|---|--------|--------|--------|
| | 137.89 | 151.68 | 165.47 | 179.26 |
| ≤ 19.05 | 6.35 | 6.35 | 6.35 | 6.35 |
| >19.05 a 25.4 | 6.35 | 6.35 | 6.35 | 7.94 |
| >25.4 a 31.75 | 6.35 | 6.35 | 7.94 | 9.53 |
| >31.75 a 38.1 | 6.35 | 7.14 | 9.53 | 11.11 |

Tabla 3. *Espesor de chapa anular de fondo para Anexo R*

- La tensión de diseño de la primera virola del cuerpo se calculará utilizando la siguiente fórmula:

$$\sigma = [(2.6D) (HG)] / t \quad (5-2)$$

Dónde

D = diámetro nominal del tanque, en pies.

H = altura del líquido, en pies.

- Las soldaduras a tope en las placas anulares no deben estar a menos de 12 pulgadas de cualquier soldadura vertical en la pared del tanque.
- Las uniones soldadas a tope en el fondo del tanque no deben estar a menos de 12 pulgadas una de otra.

3.4.5.1.3. Fondos para tanques que siguen un criterio de diseño según Anexo Q

Los recipientes de líquidos primarios y los recipientes de líquidos secundarios deberán tener placas inferiores anulares soldadas a tope con un ancho radial que proporcione al menos 24 pulgadas entre el interior del cuerpo y cualquier junta soldada por solape en el resto del fondo y al menos 2 pulgadas de proyección fuera del cuerpo. Se requiere un ancho radial mayor (L_{min}) de la placa anular cuando se calcula mediante las siguientes ecuaciones:

- Para tanques de acero se calcula según la ecuación (5-1).
- Para tanques de aluminio:

$$L_{min} = \frac{255 t_b}{\sqrt{(H)(G)}} \quad (5-3)$$

Dónde:

t_b = espesor nominal de la chapa anular del fondo, en pulgadas.

H = altura del líquido, en pies.

G = densidad específica del líquido.

El espesor de las placas inferiores anulares debe estar de acuerdo con las siguientes tablas:

- Espesores mínimos para tanques de acero:

APLICACIÓN INFORMÁTICA PARA EL DIMENSIONAMIENTO INTEGRAL DE TANQUES
 MEDIANTE LA NORMA API 620.

LUIS JULIO MARTÍNEZ BARTHE

| Espesor de la primera virola del cuerpo | Tensión de diseño en la primera virola del cuerpo (Mpa) | | | | | |
|---|---|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 131 | 151.68 | 172.36 | 193.05 | 213.73 | 234.42 |
| ≤ 19.05 | 6.35 | 6.35 | 6.35 | 7.14 | 8.73 | 10.32 |
| >19.05 a 25.4 | 6.35 | 6.35 | 7.14 | 8.73 | 11.11 | 13.49 |
| >25.4 a 31.75 | 6.35 | 6.35 | 8.73 | 11.11 | 13.49 | 16.67 |
| >31.75 a 38.1 | — | 7.14 | 10.32 | 13.49 | 16.67 | 19.84 |

Tabla 4. Espesor de chapa anular de fondo para tanques de acero según Anexo Q

| Espesor de la primera virola del cuerpo | Tensión de diseño en la primera virola del cuerpo (Mpa) | | | | | |
|---|---|-------|-------|--------|--------|--------|
| | 82.73 | 89.63 | 96.5 | 103.42 | 110.31 | 117.21 |
| ≤ 12.05 | 6.35 | 6.35 | 7.14 | 7.14 | 7.94 | 7.94 |
| >12.05 a 19.05 | 8.73 | 9.53 | 10.32 | 11.91 | 12.70 | 13.49 |
| >19.05 a 25.4 | 11.91 | 13.49 | 15.08 | 15.88 | 17.46 | 18.26 |
| >25.4 a 31.75 | 15.88 | 17.46 | 19.05 | 20.64 | 22.23 | 23.02 |
| >31.75 a 38.1 | 19.05 | 20.64 | 23.02 | 24.61 | 26.19 | 28.58 |
| >38.1 a 44.45 | 22.23 | 25.40 | 26.99 | 30.93 | 31.79 | 33.34 |
| >44.45 a 50.8 | 25.40 | 28.58 | 30.96 | 33.34 | 27.78 | 38.10 |

Tabla 5. Espesor de chapa anular de fondo para tanques de aluminio según Anexo Q

- La tensión de diseño de la primera virola se calculará según la ecuación (5-2).
- Las soldaduras a tope en las placas anulares no deben estar a menos de 12 pulgadas de cualquier soldadura vertical en la pared del tanque.
- Las uniones soldadas a tope en el fondo del tanque no deben estar a menos de 12 pulgadas una de otra.
- Placas del fondo inferiores, distintas de las placas inferiores anulares que tienen un 9% o 5% de níquel en tanques primarios o secundarios, deberán tener un espesor mínimo de 3/16 pulgadas, excluyendo cualquier tolerancia de corrosión especificada.
- el tanque para el diseño, en pies; G = diseño de gravedad específica; y t = espesor de diseño del primer curso de la carcasa, excluyendo la tolerancia a la corrosión, en pulgadas.

3.4.5.2. Cálculo del fondo con aplicación informática

Una vez introducidos los datos necesarios en la hoja “DATOS” y ejecutada la macro “FONDO”, el programa mostrará en la hoja de cálculo “FONDO” los resultados que apliquen en cada caso. A continuación se muestran todas las celdas comunes a todas las posibilidades:

- *Espesor de corrosión*: muestra el espesor de corrosión especificado para el fondo en la hoja de cálculo “DATOS”, en mm.
- *Espesor mínimo*: muestra el espesor mínimo, 6.35 mm, más el espesor de corrosión.
- *Espesor adoptado*: muestra el espesor finalmente adoptado, en mm.
- *Espesor de soldadura mínimo entre pared y fondo*: muestra el espesor mínimo de soldadura según la tabla 2.

3.4.5.2.1. Cálculo de fondo estándar

Si no aplican ni el Anexo Q ni el Anexo R, el programa, además de las anteriores, mostrará las siguientes celdas:

- *Diámetro del fondo*: muestra el diámetro del fondo, en m, según la siguiente ecuación:

$$Df = D + (2e_{sol} + 2 * 25,4)/1000 \quad (5-4)$$

Dónde:

Df= diámetro del fondo, en m.

e_{sol}= espesor de soldadura, en mm.

De esa forma, se cumplen las especificaciones del apartado 5.1.1.

- *Peso del fondo*: muestra el peso total del fondo, en Kg, según la siguiente ecuación:

$$Pf = \frac{\pi R_f^2 t b}{1000} \rho_f \quad (5-5)$$

Dónde:

tb= espesor del fondo, en m.

R_f= radio del fondo, en m.

ρ_f= densidad del fondo, en Kg/m³.

3.4.5.2.2. Cálculo de fondo para un tanque diseñado según Anexo R

Cuando el tanque se diseñe según el Anexo R, el programa, además de las mencionadas en 3.4.5.2.1, mostrará las siguientes celdas:

- *Tensión de diseño de la primera virola*: muestra la tensión de diseño de la primera virola según la ecuación (5-2), transformada a Mpa, necesaria para escoger el espesor de la chapa anular del fondo.
- *Espesor de la chapa anular*: muestra el espesor de la chapa anular del fondo, en mm, según la tabla 3.
- *Ancho radial de la chapa anular*: muestra el ancho radial, en mm, según la ecuación (5-1).
- *Proyección interior mínima*: si la celda anterior es menor a 600 mm (24 pulgadas), esta celda mostrará el valor de 600. Si el ancho radial resulta mayor, esta celda mostrará el ancho radial anteriormente calculado.
- *Proyección exterior*: esta celda mostrará la proyección exterior mínima que se requiere según el apartado 5.1.2, es decir, 50 mm (2 pulgadas).
- *Anchura total de la chapa anular*: muestra la anchura total de la chapa anular (incluyendo el

espesor de la virola con la que está en contacto).

- *Peso de la chapa anular del fondo*: muestra el peso de la chapa anular según la siguiente ecuación:

$$Pf = \left(\frac{(t_b * L_{tot})}{1000^2} + 2\pi \left(R + \frac{50}{1000} \right) \right) \rho_f \quad (5-6)$$

Dónde:

L_{tot}= anchura total, en mm.

t_b= espesor de la chapa anular, en m.

R= radio del depósito, en m.

ρ_f= densidad del fondo, en Kg/m³.

- *Peso total*: muestra el peso total del fondo, incluyendo el peso de la chapa anular:

$$Pf = \left(\frac{(t_b * L_{tot})}{1000^2} + 2\pi \left(R + \frac{50}{1000} \right) \right) \rho_f + \pi \left(R - \frac{L_{tot}}{1000} \right)^2 e_f \quad (5-7)$$

Dónde:

e_f= espesor del fondo, en mm.

t_b= espesor de la chapa anular, en m.

R= radio del depósito, en m.

ρ_f= densidad del fondo, en Kg/m³.

3.4.5.2.3. Cálculo de fondo para un tanque diseñado según Anexo Q

En este caso, el programa distingue si el tanque está fabricado en aluminio o no. Por lo demás, se mostrarán las mismas celdas que se describen en 3.4.5.2.2.

3.4.6. RESUMEN DE PESOS

Este apartado tiene como objetivo obtener una visión global de pesos y obtener el peso total del tanque, por lo que no contendrá Aplicación de la norma. Los datos obtenidos en esta hoja de cálculo resultarán determinantes para cálculos posteriores.

3.4.6.1. Peso del techo

Este apartado contendrá las siguientes celdas:

- *Peso del techo*: muestra el peso total del techo (ya sea cónico o domo) calculado en el apartado 3.2, excluyendo solamente las cargas vivas. Si se trata de un tanque interior abierto, esta celda mostrará el valor 0.
- *Peso unión techo cuerpo*: en esta celda deberemos introducir el peso de la

configuración constructiva escogida para la unión techo cuerpo.

- *Peso total*: muestra la suma de las dos celdas anteriores.

3.4.6.2. Peso del cuerpo

- *Peso total*: muestra el sumatorio de los pesos de cada virola, calculados según la ecuación (4-10).

3.4.6.3. Peso del fondo

Este apartado estará formado por las siguientes celdas:

- *Peso del fondo*: muestra el peso total del fondo (sin incluir el peso de la chapa anular en caso de que el tanque esté diseñado con el Anexo Q o el Anexo R).
- *Peso de chapa anular*: si el tanque está diseñado con el Anexo Q o el Anexo R, esta celda mostrará el peso de la chapa anular. En caso contrario, esta celda mostrará el valor 0.
- *Peso total*: muestra la suma de las dos celdas anteriores.

3.4.6.4. Peso total

Muestra el sumatorio de todos los pesos anteriores.

3.4.7. ESTABILIDAD FRENTE AL VIENTO

Con el objetivo de obtener los momentos de vuelco a los que se verá sometido el tanque expuesto a los efectos del viento, ver si son necesarios anclajes y calcularlos, se ha implementado el método descrito en el apartado 5.11 de la norma API 650, ya que dicho método nos facilita esta información.

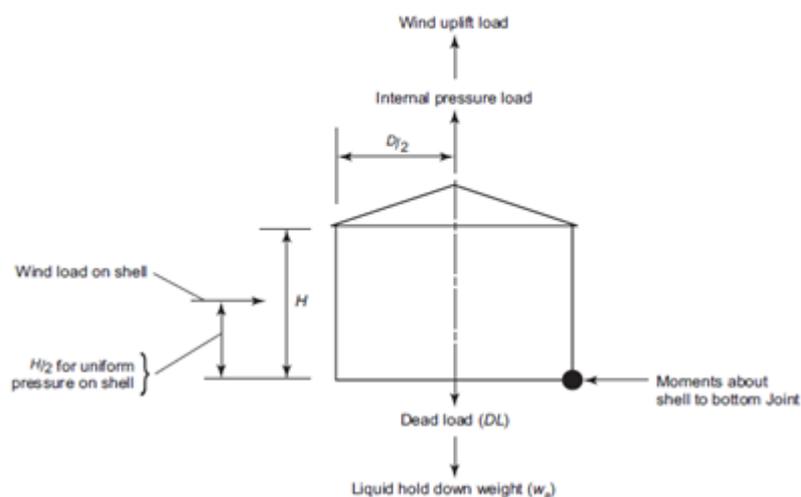


Ilustración 8. Cargas de viento

3.4.7.1. Aplicación de la norma

3.4.7.1.1. Nomenclatura

- *Mdl*: momento de vuelco en la unión cuerpo-fondo debido al peso de la envolvente corroída, en Kgm.
- *Mdlr*: Momento unión cuerpo-fondo debido al peso nominal de la chapa de cubierta corroída, en Kgm.
- *Mf*: momento en la unión cuerpo-fondo debido a la altura del líquido, en Kgm.
- *Mpi*: momento en la unión cuerpo-fondo debido a la presión interna de diseño, en Kgm.
- *Mw*: momento de vuelco en la unión cuerpo-fondo, en Kgm.
- *Pdi*: presión de diseño interna, en bar.
- *Pwr*: presión dinámica de la cubierta, en KPa.
- *Pws*: presión dinámica del cuerpo, en KPa.
- *V*: velocidad de diseño del viento, en km/h.
- *Wr*: peso del techo corroído, en kg.
- *Wsr*: peso del cuerpo corroído del tanque, en kg.
- *Wf*: peso del líquido, en N.
- *Arp*: área proyectada del techo, en m²
- *Acp*: área envolvente del cuerpo del tanque para viento m²
- *R*: radio del tanque, en m.
- *H*: altura total del tanque, en m.
- *Fc*: factor de corrección del viento.
- *Wul*: empuje vertical en techo, en Kg.
- *Wls*: empuje horizontal en el tanque, en Kg.
- *U*: carga transmitida por el viento, en N.
- *N*: n° de pernos (4 como mínimo).
- *Fp*: relación entre presión de operación y diseño.
- *th*: espesor corroído del techo, en mm.

3.4.7.1.2. Cálculo de momentos estabilizantes y desestabilizantes

Los tanques que no estén anclados deberán cumplir las siguientes restricciones:

$$0.6Mw + Mpi < Mdl/1.5 + Mdlr \quad (7-1)$$

$$Mw + Fp(MPi) < (Mdl + Mf)/2 + Mdlr \quad (7-2)$$

LUIS JULIO MARTÍNEZ BARTHE

$$Mws + Fp (MPi) < Mdl /1.5 + Mdlr \quad (7-3)$$

Para calcular cada una de las componentes de las restricciones anteriores, es necesario introducir varios conceptos:

- La presión dinámica que el viento ejerce sobre el techo se calcula como sigue:

$$Pwr = 1,44 * \left(\frac{v}{190}\right)^2 \quad (7-4)$$

Calculada sobre el área proyectada:

$$At = \pi R^2 \quad (7-5)$$

- La presión dinámica que el viento ejerce sobre el cuerpo se calcula de la siguiente manera:

$$Pwr = 0.86 * \left(\frac{v}{190}\right)^2 \quad (7-6)$$

Calculada sobre el área proyectada:

$$At = 2RH \quad (7-7)$$

Si la velocidad del viento supera los 190 Km/h, ambas presiones se calcularán de la siguiente forma:

$$Pw = \left(\frac{v}{190}\right)^2 \quad (7-8)$$

Por tanto, se tendrá el siguiente empuje vertical en el techo, en Kg:

$$Wul = Pwr * Arp * 100 \quad (7-9)$$

Y, por consiguiente, el empuje horizontal, en Kg:

$$Wls = Pwr * Acp * 100 \quad (7-10)$$

Una vez calculadas las presiones dinámicas y los empujes, los momentos de vuelco debido a la presión del viento y la presión interior (desestabilizantes) se calculan a continuación:

$$Mw = Wls * \frac{H}{2} + Wul * R \quad (7-11)$$

$$Mpi = Pdi * \pi * R^3 * 100 \quad (7-12)$$

Los momentos estabilizantes se calculan de la siguiente manera:

$$Mdl = Wsr * R \quad (7-13)$$

$$Mdlr = Wr * R \quad (7-14)$$

$$Mf = Wf * R \quad , \quad (7-15)$$

3.4.7.1.3. Cálculo de anclajes

Si alguna de las tres condiciones anteriores no se cumple, el tanque requerirá de anclajes. Para dimensionar dichos anclajes se sigue el siguiente procedimiento:

- La carga por perno deberá ser la siguiente:

$$tb = U/N \quad , \quad (7-16)$$

Dónde U se calcula según la tabla 5.21a de la norma API 650:

$$U = [(Fp Pdi + Pwr - 0.08th) * D^2 * 785] + [4 Mwh/D] - Wr \quad (7-17)$$

Y Mwh, en Nm:

$$Mwh = Pws * D * H^2/2 \quad (7-18)$$

3.4.7.2. Cálculo del viento con aplicación informática

El método descrito anteriormente se ha implementado de la siguiente forma:

3.4.7.2.1. Datos

En primer lugar aparecerán una serie de datos de partida:

- *Velocidad del viento*: muestra la velocidad del viento, en km/h, según la ubicación geográfica. Si el tanque no está situado en España, la celda cambiará de color y habrá que introducir la velocidad del viento normalizada de la zona de ubicación del tanque.
- *Factor de corrección*: muestra el valor obtenido según la ecuación (7-8).
- *Altura del cuerpo*: muestra la altura del cuerpo, en m.
- *Diámetro*: muestra el diámetro del tanque, en m.
- *Presión de diseño*: muestra la presión de diseño, en Kpa.
- *Altura del techo*: muestra la altura del techo, en m, en función del tipo de techo escogido.
- *Relación entre presión de operación y diseño, Fpi*: muestra el cociente entre la presión de operación y diseño.
- *Densidad específica del fluido*: muestra la densidad específica del fluido.

3.4.7.2.2. Momentos desestabilizantes

En este apartado se calculan los momentos desestabilizantes:

- Pwr : muestra la presión dinámica en el techo, en Kpa.
- Pws : muestra la presión dinámica en la pared, en Kpa.
- *Área proyectada del techo sobre la que incide el viento, Arp* : muestra el resultado de la ecuación (7-5), en m^2 .
- *Área proyectada del tanque sobre la que incide el viento, Acp* : muestra el resultado de la ecuación (7-7), en m^2 .
- *Empuje vertical en techo, Wul* : muestra el resultado de la ecuación (7-9), en Kg.
- *Empuje horizontal en tanque, Wls* : muestra el resultado de la ecuación (7-10), en Kg.
- *Punto de aplicación de carga horizontal*: muestra la mitad de la altura de la pared, en m.
- *Momento de vuelco cuerpo-fondo debido a la presión del viento, Mw* : muestra el resultado de la ecuación (7-11), en Kgm.
- *Momento alrededor de la junta cuerpo-fondo por presión interior, Mpi* : muestra el resultado de la ecuación (7-12), en Kgm.

3.4.7.2.3. Momentos estabilizantes

Para el cálculo de los momentos estabilizantes se muestran las siguientes celdas:

- *Peso del techo corroído, Wr* : indica el peso corroído del techo, en Kg.
- *Peso de la envolvente corroída, Wsr* : indica el peso corroído del cuerpo, en Kg.
- *Peso del fluido, Wf* : muestra el peso del fluido, en Kg.
- *Peso total del tanque corroído*: muestra el sumatorio de las tres celdas anteriores, en Kg.
- *Momento alrededor de junta cuerpo-fondo por peso de la envolvente corroída, Mdl* : muestra el resultado de la ecuación (7-13), en Kgm.
- *Momento alrededor de junta cuerpo-fondo por peso del techo corroído, $Mdlr$* : muestra el resultado de la ecuación (7-14), en Kgm.
- *Momento alrededor de junta cuerpo-fondo por peso del fluido, Mf* : muestra el resultado de la ecuación (7-15), en Kgm.

3.4.7.2.4. Comprobaciones

En este subapartado se indica si se cumplen las restricciones (7-1), (7-2) y (7-3). En caso de que alguna no se cumpla, se requerirá anclar el tanque y aparecerá el subapartado 7.3.5.

3.4.7.2.5. Cálculo de anclaje para viento

Se procederá ahora calcular la carga que aguantará cada perno:

- *Carga transmitida por el viento, U* : muestra el resultado de la ecuación (7-17), en N.
- *Momento transmitido por el viento, Mwh* : muestra el resultado de la ecuación (7-18), en Nm.

APLICACIÓN INFORMÁTICA PARA EL DIMENSIONAMIENTO INTEGRAL DE TANQUES
MEDIANTE LA NORMA API 620.

LUIS JULIO MARTÍNEZ BARTHE

- *n° de pernos, N*: en esta celda deberemos introducir el n° de pernos (mínimo de 4).
- *Carga por cada perno, tb*: muestra el resultado de la ecuación (7-16), en N.

3.4.7.2.6. Datos del perno

- *Material*: se escogerá el material A193 B7.
- *Tensión máxima admisible del tornillo*: según la norma, la tensión máxima admisible del perno debe reducirse a 5/9 del límite elástico (402 Mpa según API 620).
- *Área resistente necesaria*: muestra el área resistente necesaria del perno según la siguiente ecuación:

$$Ar = tb/402 \quad (7-18)$$

- *Perno necesario*: en el programa se ha introducido un catálogo de pernos, por lo que automáticamente se selecciona el perno adecuado según la ecuación (7-18). En caso de que el perno resultante sea menor a M24, se seleccionará un perno M24. La instalación del perno en el tanque se puede realizar con una silleta de anclaje tal y como muestra la siguiente figura:

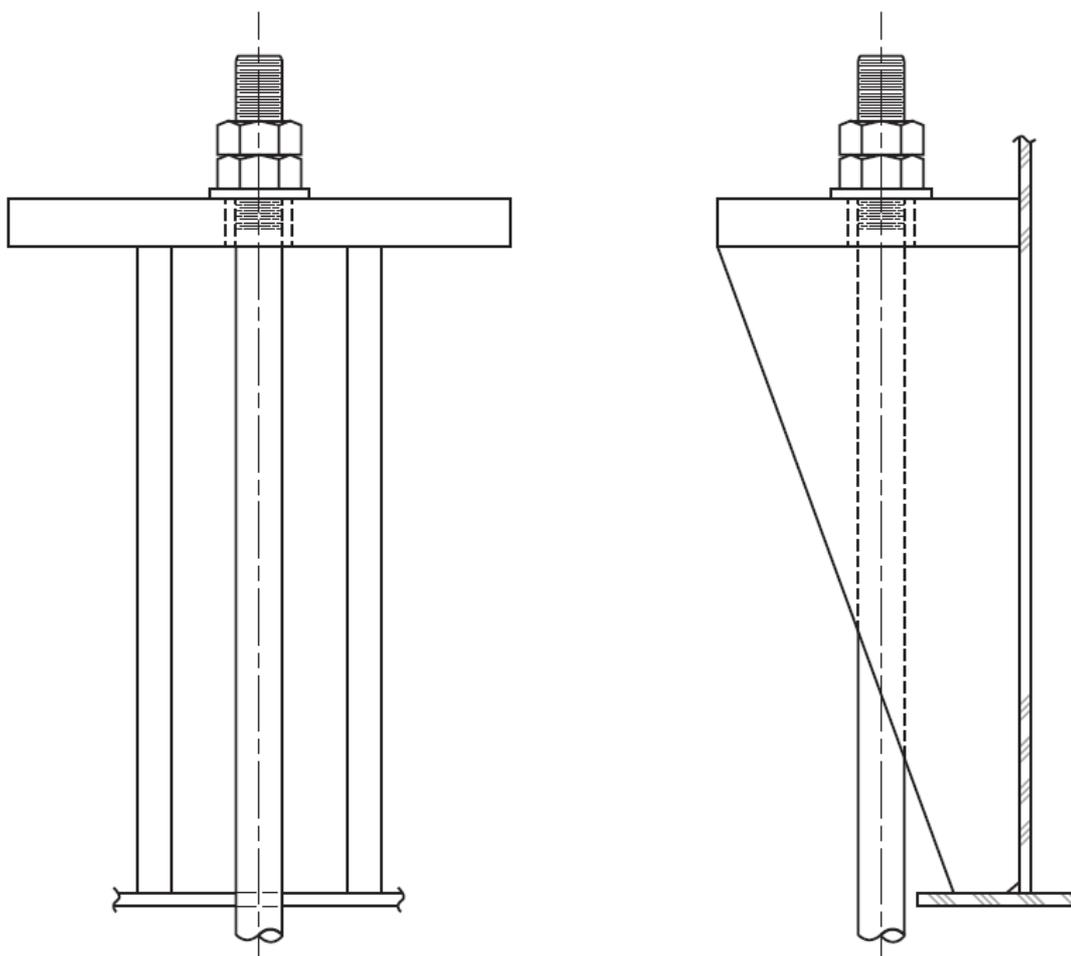


Ilustración 9. Silleta de anclaje ejemplo según API 650.

En caso de que el tanque sea interior, no aplica el cálculo desarrollado en este apartado.

3.4.8. ESTABILIDAD FRENTE AL SISMO

El objetivo de este capítulo es comprobar la estabilidad del tanque en caso de verse sometido a los efectos sísmicos de la zona donde se ubica. Para ello se seguirá el anexo L de API 620. En dicho Anexo se especifica que para tanques diseñados con API 620 se seguirá el procedimiento de análisis frente al sismo descrito en el anexo E de la norma API 650, incluyendo algunas consideraciones especiales para tanques diseñados con el Anexo Q o R.

3.4.8.1. Aplicación de la norma

3.4.8.1.1. Nomenclatura

- A : coeficiente de aceleración lateral, en % g.
- A_c : parámetro de espectro de aceleración convectiva, en % g.
- A_i : parámetro de espectro de aceleración impulsiva, en % g.
- A_v : coeficiente vertical de aceleración sísmica, en % g.
- D : diámetro del tanque, en m.

APLICACIÓN INFORMÁTICA PARA EL DIMENSIONAMIENTO INTEGRAL DE TANQUES
MEDIANTE LA NORMA API 620.

LUIS JULIO MARTÍNEZ BARTHE

- F : fuerza lateral de diseño, en N.
- Fa : coeficiente de amplificación del terreno.
- Fc : tensión sísmica longitudinal admisible, en MPa.
- Fty : límite elástico mínimo del acero, en MPa.
- Fv : coeficiente de velocidad.
- Fve : fuerza sísmica vertical, en N.
- Fy : límite elástico del material, en MPa.
- Fyb : límite elástico mínimo del acero de la placa del fondo, en MPa.
- G : gravedad específica de diseño del líquido.
- Ge : gravedad específica incluyendo el efecto sísmico vertical.
- H : altura total del tanque, en m.
- Hi : altura de cada virola, en m.
- Hw : altura del nivel de líquido dentro del depósito, en m.
- I : factor de importancia.
- J : ratio de anclaje.
- Ks : coeficiente de ajuste del espectro de aceleración amortiguada 5%.
- L : ancho mínimo de la chapa anular, en m.
- Ls : ancho del anillo anular para proporcionar la fuerza resistente, en m
- Mrw : porción de momento de vuelco total actuando en la base de la pared del tanque, en Nm.
- Ms : momento de vuelco total actuando en todas las secciones transversales del tanque.
- nA : número de anclajes mínimos
- Nc : fuerza circunferencial en la pared del tanque debido al modo convectivo, en N/mm.
- Nh : fuerza hidrostática circunferencial debido a presión del producto, en N/mm.
- Ni : fuerza circunferencial en la pared del tanque debido al modo impulsivo, en N/mm.
- $Nvir$: número de virolas que componen el cuerpo del tanque.
- PAB : carga de diseño de anclajes, en N.
- Pf : fuerza soportada por vuelco basado en la máxima compresión longitudinal en la base del cuerpo, en N/m.
- Q : factor de escala para espectro de aceleración, según ASCE 7.
- Rwc : factor de modificación de fuerza para modo convectivo.
- Rwi : factor de modificación de fuerza para modo impulsivo.
- SI : parámetro de respuesta, amortiguado 5%, período 1 s, en % g.
- So : parámetro de respuesta, amortiguado 5%, período 0 s, en % g.
- Sp : aceleración de cálculo de la zona, en % g.

APLICACIÓN INFORMÁTICA PARA EL DIMENSIONAMIENTO INTEGRAL DE TANQUES
MEDIANTE LA NORMA API 620.

LUIS JULIO MARTÍNEZ BARTHE

- S_s : parámetro de respuesta, amortiguado 5%, período 0.2 s, en % g.
- t_a : espesor del anillo anular bajo cuerpo, en mm.
- t_{adopt} : espesores adoptados en las virolas que componen el cuerpo del tanque, en mm.
- T_c : período para comportamiento convectivo, en seg.
- T_L : período local para períodos largos, en seg.
- T_o : coeficiente definido en la nomenclatura de la norma API 650, Apéndice E.
- T_s : coeficiente definido en la nomenclatura de la norma API 650, Apéndice E.
- T_s : espesor de la 1ª virola del depósito, situada en la parte inferior, en mm.
- T_u : espesor uniforme del tanque, en mm.
- V : esfuerzo cortante en la base, en N.
- V_c : esfuerzo cortante por componente convectivo del peso efectivo de bailoteo, en N.
- V_i : esfuerzo cortante por componente impulsiva del peso efectivo del tanque y contenidos, en N.
- V_s : esfuerzo cortante admisible, en N.
- W_a : fuerza resistente de los contenidos por unidad de longitud circunferencial, en N/m.
- w_{AB} : carga de levantamiento de diseño sobre anclajes por unidad de longitud, en N/m.
- W_c : peso eficaz convectivo del líquido, en N.
- W_{eff} : peso efectivo de tanque que contribuye a la respuesta del sismo, en N.
- W_f : presión del peso de la placa del fondo por unidad de área, en kPa.
- W_f : presión del peso de la placa del fondo por unidad de longitud circunferencial, en N/m.
- W_{fd} : peso total de la cimentación del tanque, en N.
- W_g : peso del producto aplicado directamente sobre la cimentación, en N.
- W_i : peso eficaz impulsivo del líquido, en N.
- W_{int} : carga de diseño del producto por unidad de longitud circunferencial, en N/m.
- W_p : peso total del tanque, en N.
- W_r : peso de la cubierta fija más accesorios y 10% de carga de nieve, en N.
- W_{rs} : peso de cubierta, incluyendo cargas vivas, en N/m.
- W_s : peso total del cuerpo del tanque y accesorios, en N.
- W_t : peso del tanque y cubierta actuando en la base del cuerpo, en N/m.
- W_{tot} : presión total en el fondo por unidad de área, en kPa.
- X_c : altura desde el fondo al centro acción fuerzas laterales (convectivo en anillo), en m.
- X_{cs} : altura desde el fondo al centro acción fuerzas laterales (convectivo en losa), en m.
- X_i : altura desde fondo al centro de acción fuerzas laterales (impulsivo en anillo), en m.
- X_{is} : altura desde el fondo al centro acción fuerzas laterales (impulsivo en losa), en m.

- XR : altura desde la coronación al centro de gravedad de la cubierta, en m.
- XS : altura desde el fondo al centro de gravedad del cuerpo del tanque, en m.
- Y : distancia desde la superficie del líquido al punto analizado, en m.
- Z_i : altura desde el fondo al centro de gravedad de cada virola, en m.
- M : coeficiente de fricción ante deslizamiento.
- σ_s : tensión circunferencial en la pared del tanque debido al sismo, en MPa.
- σ_T : tensión circunferencial total en la pared del tanque, en MPa.

3.4.8.1.2. Datos de diseño

En zonas con un alto grado de sismicidad los movimientos sísmicos son un tema muy relevante dentro del diseño de tanques verticales de almacenamiento. Estos movimientos provocan dos tipos de reacciones sobre el tanque:

- Cuando la alta frecuencia relativa amplificada provoca un movimiento lateral del terreno sobre el que está situado el tanque. La cantidad de líquido que el tanque contiene se mueve al unísono con el cuerpo del tanque.
- Cuando la baja frecuencia relativa amplificada provoca un movimiento de la masa del líquido contenido, ocasionando oleaje dentro del tanque.

El movimiento lateral de las masas, genera fuerzas que actúan en el centro de gravedad del tanque, ocasionando la inestabilidad del conjunto, que multiplicado por el brazo de palanca respecto del fondo, originan un momento de vuelco, produciendo una compresión longitudinal, provocando la deformación del cuerpo. Por lo que el tanque será diseñado para resistir este fenómeno.

El Apéndice E de la norma API 650 está basado en el método (ASD) “Diseño de la tensión Admisible” con la combinación de cargas dadas en este mismo apéndice. Los requerimientos de los movimientos del suelo en este apéndice derivan del ASCE 7 que está basado en considerar el máximo de los movimientos sísmicos del terreno, definido como el movimiento con una probabilidad del 2% de exceder al evento que suceda dentro de un período de 50 años.

Los procedimientos de diseño contenidos en este apéndice se basan en métodos de análisis de espectros de respuestas afectados por el factor de reducción correspondiente al sistema y consideran dos modos de vibración del tanque y su contenido: impulsivo y convectivo.

- *Modo impulsivo*: es el modo de vibración del sistema tanque-líquido en donde el líquido se mueve de forma solidaria con el tanque.
- *Modo convectivo*: el líquido experimenta un movimiento oscilatorio respecto a un eje horizontal que coincide con el diámetro del tanque.

Los análisis a realizar son principalmente tres:

- *Fuerza cortante en la base (base shear)*.
- *Estabilidad del tanque contra el vuelco (Overturning moment)*: se calcula el momento de vuelco y se determina el requerimiento de pernos de anclaje (número y tamaño).
- *Anillo anti desborde o altura por encima del nivel de operación del producto para contener el oleaje (free board)*: es fundamental garantizar que el mismo se mantiene dentro del tanque

APLICACIÓN INFORMÁTICA PARA EL DIMENSIONAMIENTO INTEGRAL DE TANQUES
 MEDIANTE LA NORMA API 620.

LUIS JULIO MARTÍNEZ BARTHE

en todo momento.

Para realizar cada uno de los análisis mencionados anteriormente, es necesario calcular una serie de parámetros que se definen a continuación:

- *SUG (SEISMIC USE GROUP)*: Esta agrupación se divide en tres y debe ser definida por el usuario o comprador del tanque. el *SUG* nos indica el impacto que tendría una fuga de producto en caso de falla del tanque.
- *Site ground motion*: Para determinar cualitativa y cuantitativamente las aceleraciones espectrales laterales se pueden aplicar los siguientes métodos descritos en el punto E.4 de API 650:
 - El “mapped ASCE 7 method” que se basa en el establecimiento de parámetros de cálculo (estadísticos) de acuerdo a la norma sísmica indicada. Sólo es aplicable para tanques a ser instalados dentro de EE.UU. o donde esta normativa sea aplicable.
 - El “site-specific spectral response” que no es otra cosa que las respuestas sísmicas concretas del emplazamiento del tanque, basados en las consideraciones prescritas en ASCE 7.
 - El método descrito en el punto E.4.3 “Sites not defined by ASCE 7” establece los criterios a aplicar cuando el emplazamiento aplican regulaciones que son contradictorias al código sísmico indicado.

El programa objeto de este proyecto está orientado al cálculo de tanques que no están situados en EEUU, por lo que seguiremos el método descrito en el apartado E.4.3 de la norma.

- Atendiendo a las aceleraciones de cálculo especificadas en la NCSE-02 (ab), escogeremos el valor de S_p . Una vez seleccionado este valor, podemos calcular los valores de S_s , S_1 y S_0 :

$$S_s = 2.25 * S_p \quad (8-1)$$

$$S_1 = 1.25 * S_p \quad (8-2)$$

$$S_0 = 1.25 * S_p \quad (8-3)$$

- Las aceleraciones máximas de respuesta espectral para la aceleración máxima del terreno se modificó por los coeficientes de sitio apropiados, F_a y F_v , de la Tabla E.1 y E.2 de la norma:

| Clase del terreno | $S_s \leq 0.25$ | $S_s = 0.50$ | $S_s = 0.75$ | $S_s = 1.0$ | $S_s \geq 1.25$ |
|-------------------|-----------------|--------------|--------------|-------------|-----------------|
| A | 0.8 | 0.8 | 0.8 | 0.8 | 0.8 |
| B | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| C | 1.2 | 1.2 | 1.1 | 1 | 1 |
| D | 1.6 | 1.4 | 1.2 | 1.1 | 1 |
| E | 2.5 | 1.7 | 1.2 | 0.9 | 0.9 |
| F | * | * | * | * | * |

* Si la clase del terreno es F, se requiere un estudio geotécnico del terreno y análisis dinámico de respuesta para determinar F_a

Tabla 6. Coeficiente de modificación F_a .

APLICACIÓN INFORMÁTICA PARA EL DIMENSIONAMIENTO INTEGRAL DE TANQUES
MEDIANTE LA NORMA API 620.

LUIS JULIO MARTÍNEZ BARTHE

| Clase del terreno | $S_s \leq 0.1$ | $S_s = 0.2$ | $S_s = 0.3$ | $S_s = 0.4$ | $S_s \geq 0.5$ |
|-------------------|----------------|-------------|-------------|-------------|----------------|
| A | 0.8 | 0.8 | 0.8 | 0.8 | 0.8 |
| B | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| C | 1.7 | 1.6 | 1.5 | 1.4 | 1.3 |
| D | 2.4 | 2 | 1.8 | 1.6 | 1.5 |
| E | 3.5 | 3.2 | 2.8 | 2.4 | 2.4 |
| F | * | * | * | * | * |

* Si la clase del terreno es F, se requiere un estudio geotécnico del terreno y análisis dinámico de respuesta para determinar F_v .

Tabla 7. Coeficiente de modificación F_v .

Las clases del terreno se definen como sigue:

SITE CLASS DEFINITIONS

The Site Classes are defined as follows:

- A Hard rock with measured shear wave velocity, $\bar{v}_s > 1500$ m/s (5000 ft/sec)
- B Rock with 760 m/s $< \bar{v}_s \leq 1500$ m/s (2500 ft/sec $< \bar{v}_s \leq 5000$ ft/sec)
- C Very dense soil and soft rock with 360 m/s $< \bar{v}_s \leq 760$ m/s (1200 ft/sec $< \bar{v}_s \leq 2500$ ft/sec) or with either $N > 50$ or $\bar{s}_u > 100$ kPa (2000 psf)
- D Stiff soil with 180 m/s $\leq \bar{v}_s \leq 360$ m/s (600 ft/sec $\leq \bar{v}_s \leq 1200$ ft/sec) or with either $15 \leq N \leq 50$ or 50 kPa $\leq \bar{s}_u \leq 100$ kPa (1000 psf $\leq \bar{s}_u \leq 2000$ psf)
- E A soil profile with $\bar{v}_s < 180$ m/s (600 ft/sec) or with either $N < 15$, $\bar{s}_u < 50$ kPa (1000 psf), or any profile with more than 3 m (10 ft) of soft clay defined as soil with $PI > 20$, $w \geq 40\%$, and $\bar{s}_u < 25$ kPa (500 psf)
- F Soils requiring site-specific evaluations:
 - 1) Soils vulnerable to potential failure or collapse under seismic loading such as liquefiable soils, quick and highly sensitive clays, collapsible weakly cemented soils. However, since tanks typically have an impulsive period of 0.5 secs or less, site-specific evaluations are not required but recommended to determine spectral accelerations for liquefiable soils. The Site Class may be determined as noted below, assuming liquefaction does not occur, and the corresponding values of F_a and F_v determined from Table E.1 and Table E.2.
 - 2) Peats and/or highly organic clays ($H_S > 3$ m [10 ft] of peat and/or highly organic clay, where H = thickness of soil).
 - 3) Very high plasticity clays ($H_S > 8$ m [25 ft] with $PI > 75$).
 - 4) Very thick, soft/medium stiff clays ($H_S > 36$ m [120 ft])

Ilustración 10. Clases del terreno

- Una vez determinadas F_a y F_v , y conociendo el factor de escala para el espectro de aceleración Q (el cuál, según la norma, para lugares fuera de EEUU se puede estimar igual a 1), podemos calcular S_{ds} y S_{d1} :

$$S_{ds} = Q * F_a * S_s \quad (8-4)$$

$$S_{d1} = Q * F_v * S_1 \quad (8-5)$$

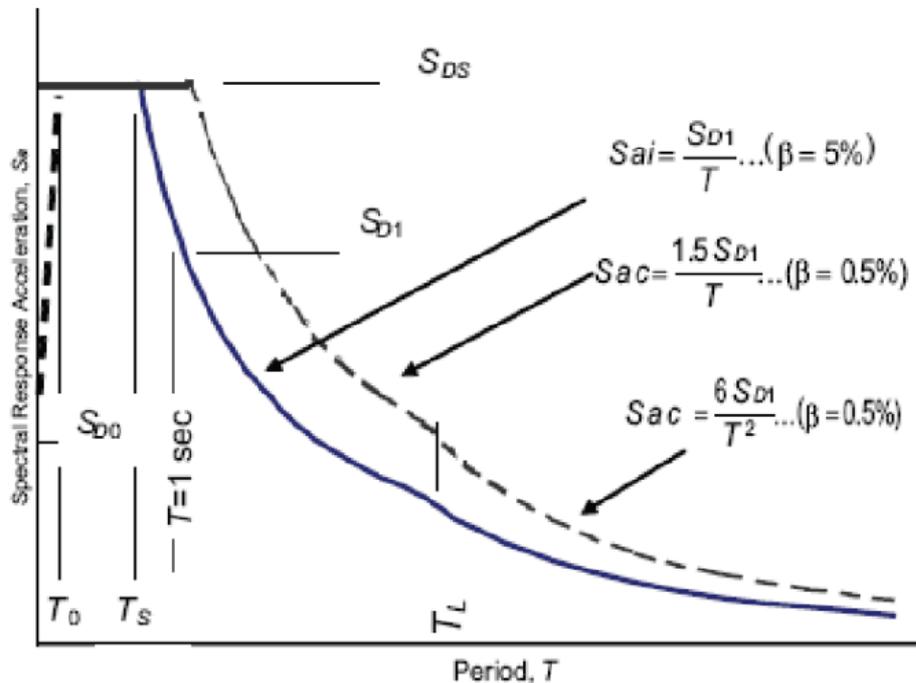


Ilustración 11. Espectro de respuesta.

- Para la determinación del período de vibración estructural se tendrán en cuenta las siguientes consideraciones:
 - El método de diseño es independiente del período natural impulsivo del tanque, ya que para este caso se tiene en cuenta la aceleración espectral máxima.
 - Este método si depende del período natural para comportamiento convectivo del líquido, \$T_c\$, y del período de transición local que depende del período más largo del movimiento del terreno, \$T_L\$. Por tanto tenemos que:

$$K_s = \frac{0.578}{\sqrt{\tanh\left(\frac{3.68 \cdot Hw}{D}\right)}} \quad (8-6)$$

El período del primer modo de la ola de chapoteo se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$T_c = 1.8 * K_s * \sqrt{D} \quad (8-7)$$

Y el valor de \$T_L\$ se aproximará a:

$$T_L = 4 \quad (8-8)$$

- Una vez calculados los períodos de vibración, necesitamos conocer las respuestas de las aceleraciones espectrales que luego nos servirán para poder obtener los cortantes en la base del tanque, y con ello verificar nuestro diseño. Los valores que calcularemos según el apartado E.4.6 son: el parámetro de la aceleración espectral impulsiva (\$A_i\$) y la aceleración espectral convectiva (\$A_c\$).

$$A_i = S_d s \left(\frac{I}{R_{wi}} \right) \quad (8-9)$$

$$A_i \geq 0.007 \quad (8-10)$$

Si $S_L \geq 0.6$

$$A_i \geq 0.5 * S_1 * \left(\frac{I}{R_{wi}} \right) \quad (8-11)$$

Para A_c tenemos que:

- Cuando $T_c \leq T_L$

$$A_c = K * S_{d1} * \left(\frac{1}{T_c} \right) * \left(\frac{I}{R_{wc}} \right) \leq A_i \quad (8-12)$$

- Cuando $T_c > T_L$

$$A_c = K * S_{d1} * \left(\frac{T_L}{T_c^2} \right) * \left(\frac{I}{R_{wc}} \right) \leq A_i \quad (8-13)$$

Dónde I es el factor de importancia y viene definido por la siguiente tabla:

| Grupo sísmico | Factor de importancia |
|---------------|-----------------------|
| I | 1 |
| II | 1.25 |
| III | 1.5 |

Tabla 8. Factor de importancia.

Y R_{wi} y R_{wc} son los factores de modificación de fuerza para los modos impulsivo y convectivo respectivamente, y también vienen definidos por la siguientes tabla (a menos que la reglamentación de la zona especifique sus valores) en función de si el tanque se encuentra anclado o no:

| Sistema de anclaje | R_{wi} (impulsivo) | R_{wc} (convectivo) |
|-----------------------|----------------------|-----------------------|
| Auto-anclado | 3.5 | 2 |
| Mecánicamente anclado | 4 | 2 |

Tabla 9. Factores de modificación de fuerza.

- Es preciso calcular el peso efectivo convectivo e impulsivo del producto:
 - Si $D/H_w \geq 1.333$:

$$W_i = \frac{\tanh(0.866 \frac{D}{H_w})}{0.866 \frac{D}{H_w}} W_p \quad (8-14)$$

- Si $D/H_w < 1.333$:

$$W_i = \left(1 - \frac{0.218D}{H_w}\right) W_p \quad (8-15)$$

- El peso efectivo convectivo es:

$$W_c = \frac{0.230D}{H_w} \tanh\left(\frac{3.67H_w}{D}\right) W_p \quad (8-16)$$

Dónde W_p es el peso total del tanque (descrito en apartados anteriores), en N.

- Los puntos de aplicación son los siguientes:

- Cálculo del punto de aplicación del momento de vuelco actuante en la losa:

- Altura desde el fondo al centro de acción de fuerzas laterales (impulsivo en losa):

- Si $D/H_w \geq 1.333$:

$$X_{is} = 0.375 \left[1 + 1.333 \left(\left(\frac{\frac{0.866D}{H}}{\tanh\left(\frac{0.866D}{H}\right)} \right) - 1 \right) \right] H_w \quad (8-17)$$

- Si $D/H_w < 1.333$:

$$X_{is} = \left(0.5 + \frac{0.060D}{H}\right) H_w \quad (8-18)$$

- Altura desde el fondo al centro de acción de fuerzas laterales (convectivo en losa):

$$X_{CS} = \left[1 - \frac{\cosh\left(\frac{3.67H}{D}\right) - 1.937}{\frac{3.67H}{D} \sinh\left(\frac{3.67H}{D}\right)} \right] H_w \quad (8-19)$$

- Centro de acción de fuerzas eficaces laterales:

LUIS JULIO MARTÍNEZ BARTHE

- Altura desde el fondo al centro de acción de fuerzas laterales (impulsivo en anillo):

- Si $D/H_w \geq 1.333$:

$$X_i = 0.375 * H_w \quad (8-20)$$

- Si $D/H_w < 1.333$:

$$X_i = \left(0.5 - \frac{0.094D}{H_w}\right) * H_w \quad (8-21)$$

- Altura desde el fondo al centro de acción de fuerzas laterales (convectivo en anillo):

$$X_c = \left(1 - \frac{\cosh\left(\frac{3.67H_w}{D}\right) - 1}{3.67 \frac{H_w}{D} \sinh\left(\frac{3.67H_w}{D}\right)}\right) H_w \quad (8-22)$$

3.4.8.1.3. Cargas de diseño

Una vez calculados todos los coeficientes anteriores, se pueden calcular tanto el cortante que actúa en en la base como los diferentes momentos de vuelco.

3.4.8.1.3.1. Cortante en la base

La fuerza cortante en la base se calculará como sigue:

$$V = \sqrt{V_i^2 + V_c^2} \quad (8-23)$$

Dónde

$$V_i = A_i * (W_s + W_r + W_f + W_i) \quad (8-24)$$

$$V_c = A_c * W_c \quad (8-25)$$

3.4.8.1.3.2. Momentos de vuelco

Los momentos de vuelco se calculan de la siguiente forma:

$$M_{rw} = \sqrt{[A_i(W_i X_i + W_s X_s + W_r X_r)]^2 + [A_c(W_c X_c)]^2} \quad (8-26)$$

$$M_s = \sqrt{[A_i(W_i X_i + W_s X_s + W_r X_r)]^2 + [A_c(W_c X_c)]^2} \quad (8-27)$$

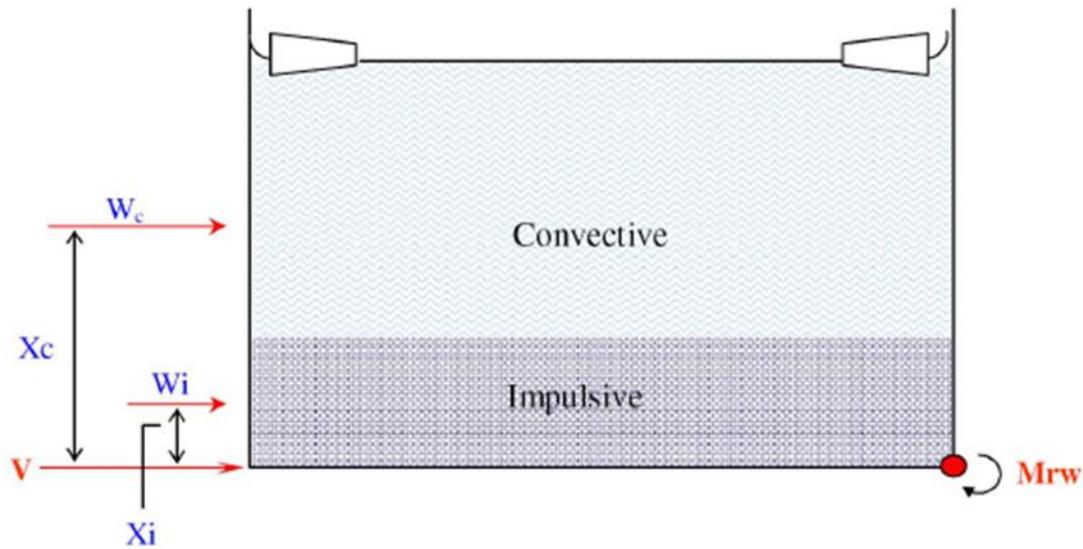


Ilustración 12. Cargas de diseño.

Dónde Mrw se utiliza para calcular los anclajes y para verificar la compresión de las chapas de la pared y Ms para diseñar la cimentación.

3.4.8.1.3.3. Cargas verticales

Cuando se especifique en los requerimientos de compra del tanque, las aceleraciones verticales debidas al sismo deberán ser consideradas. Estas cargas verticales deberán considerarse como ascendentes o descendentes y combinadas con los efectos de aceleraciones laterales, según el caso más desfavorable:

$$Fv = \pm Av * Weff \quad (8-28)$$

Dónde

$$Av = 0.47 * S_{ds} \quad (8-29)$$

3.4.8.1.3.4. Cargas dinámicas circunferenciales debidas al líquido

Las tensiones dinámicas de tracción en el cuerpo debidas al movimiento sísmico del líquido se determinarán mediante las siguientes fórmulas:

- Si $D/H_w \geq 1.333$:

$$Ni = 8.48 * Ai * G * D * H \left[\frac{Y}{H} - 0.5 \left(\frac{Y}{H} \right)^2 \right] \tanh\left(\frac{0.866D}{H}\right) \quad (8-30)$$

- Si $D/H_w < 1.333$, e $Y < 0.75D$:

LUIS JULIO MARTÍNEZ BARTHE

$$N_i = 5.22 * A_i * G * D^2 \left[\frac{Y}{0.75D} - 0.5 \left(\frac{Y}{0.75D} \right)^2 \right] \quad (8-31)$$

- Si $D/H_w < 1.333$, e $Y > 0.75D$:

$$N_i = 2.6 * A_i * G * D^2 \quad (8-32)$$

$$N_c = \frac{0.98Ac * G * d^2 \cosh\left[\frac{3.68(H-Y)}{D}\right]}{\cosh\left[\frac{3.68H}{D}\right]} \quad (8-33)$$

$$N_h = 4.9 * (H_w - 0.3) * D * G \quad (8-34)$$

- Cuando el cliente especifique que no se debe considerar la aceleración vertical, la tensión circunferencial combinada se definirá por las siguientes ecuaciones el (esfuerzo de tracción dinámico circunferencial se combinará directamente con a tensión hidrostática de diseño para determinar la tensión total):

$$\sigma_T = \sigma_H \pm \sigma_S = \frac{N_h \pm \sqrt{N_i^2 + N_c^2}}{t} \quad (8-35)$$

- Cuando el cliente especifique que si se debe considerar la aceleración vertical:

$$\sigma_T = \sigma_H \pm \sigma_S = \frac{N_h \pm \sqrt{N_i^2 + N_c^2 + \left(Av * \frac{N_h}{2.5}\right)^2}}{t} \quad (8-36)$$

3.4.8.1.4. Resistencia a cargas de diseño

A la hora de determinar si el tanque presenta la estabilidad suficiente para soportar las cargas de diseño, el apéndice E utiliza el método de los esfuerzos admisibles.

Siempre que se hable de tanques auto-soportados, nos referiremos a tanques que no requieren dispositivos de anclaje (pernos o fajas). Aquellos tanques que no sean capaces de soportar las condiciones de diseño por sí mismos y requieran dispositivos de anclaje, los llamaremos mecánicamente soportados.

3.4.8.1.4.1. Verificación de anclajes

La resistencia al momento del vuelco del diseño (ringwall) en la base del cuerpo puede ser proporcionada por:

- El peso del cuerpo del tanque, la reacción del peso de la cubierta sobre el cuerpo, W_{rs} , y por el peso de una parte de los contenidos del tanque adyacente al cuerpo para tanque no anclados.

APLICACIÓN INFORMÁTICA PARA EL DIMENSIONAMIENTO INTEGRAL DE TANQUES
 MEDIANTE LA NORMA API 620.

LUIS JULIO MARTÍNEZ BARTHE

- Dispositivos anclados mecánicamente.

Podremos decir que un tanque es auto-soportado siempre y cuando se cumplan los siguientes requisitos:

- La fuerza resistente provista por el tanque es adecuada para la estabilidad del mismo; es decir, el factor J –que se indicará más adelante- está comprendido entre los límites admisibles.
- El ancho de la chapa anular usada para determinar la fuerza resistente es como máximo el 3,5% del diámetro del tanque.
- El esfuerzo de compresión inducido en la envolvente está comprendido dentro de los esfuerzos admisibles indicados en el punto E.6.2.2.
- El espesor de la chapa anular no supera el espesor de la primera virola de la envolvente.
- Los requerimientos de flexibilidad de tuberías están cubiertos (cargas en tubuladuras).

Para los tanques no anclados, una parte de los contenidos pueden ser utilizados para resistir el vuelco. El anclaje provisto depende de una supuesta anchura de un anillo anular de fondo elevado por el momento de vuelco.

La fuerza resistente al vuelco del anillo que levanta la cimentación se determina como:

$$w_a = 99 * t_a \sqrt{F_y * H_w * G_e} \leq 201.1 H_w * D * G_e \quad (8-37)$$

Si el valor de w_a excede el límite de $201.1 * H * D * G_e$, el valor del ancho mínimo requerido para el anillo anular inferior, L, medido desde el interior del cuerpo se ajustará a $0.035 * D$ y el valor de w_a igual a $201.1 * H * D * G_e$.

Puede existir un valor del ancho del anillo, L_s , para proporcionar la fuerza de resistencia de los contenidos por unidad de longitud circunferencial necesaria para el auto-anclaje, medido desde el interior del cuerpo.

$$w_a = 5742 * H * G_e * L_s \quad (8-38)$$

Para poder determinar si el tanque es estable o no sin dispositivos de fijación mecánica, debemos calcular el factor J y compararlo con la siguiente tabla:

| J | Criterio |
|-----------------------|--|
| $J \leq 0.785$ | No calculado el levantamiento bajo el momento de diseño sísmico de vuelco. El tanque está auto-anclado. |
| $0.785 < J \leq 1.54$ | El tanque está levantado, pero es estable para la carga de diseño siempre que los requisitos de compresión del cuerpo sean satisfechos. El tanque está auto-anclado. |
| $J > 1.54$ | El tanque no es estable y no puede ser auto-anclado para la carga de diseño. Modificar el anillo anular si $L < 0.035 * D$ y/o agregar anclaje mecánico. |

Tabla 10. Criterio de anclaje.

Dónde J se calcula como sigue:

$$J = \frac{Mrw}{D^2 * [wt * (1 - 0.4 * Av) + wa - 0.4 * wint]} \quad (8-39)$$

Y wt:

$$wt = \left[\frac{Ws}{\pi * D} + Wrs \right] \quad (8-40)$$

3.4.8.1.4.2. Requerimientos de chapa anular

El ancho de la chapa bajo el cuerpo (sea de mayor espesor que el resto del fondo o no) debe ser comprobado para poder absorber la inestabilidad por los efectos sísmicos.

Se deberán cumplir los siguientes requisitos:

- El espesor, ta , utilizado en la expresión de wa no excederá el espesor de la virola inferior del cuerpo, ts , menos el sobreespesor de corrosión.
- Cuando la chapa de fondo es más delgada que el resto del fondo del tanque, la mínima proyección del ancho de la chapa anular, L , sobre el fondo puede ser mayor de 0.45 m y no necesita ser mayor que $0.035 * D$, determinado por la siguiente ecuación:

$$L = 0.01723ta \sqrt{Fy / (HGe)} \quad (8-41)$$

3.4.8.1.4.3. Anillo anti desborde

Uno de los efectos que sufre el líquido almacenado es el fenómeno de oleaje. Para evitar que el líquido pueda derramarse, se debe determinar la altura del anillo anti desborde.

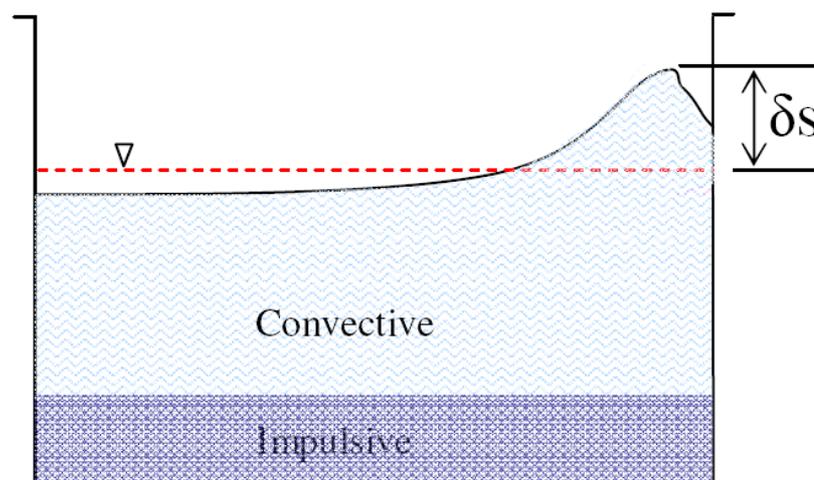


Ilustración 13. Altura de anillo anti desborde.

La altura del anillo anti desborde vendrá definida por la siguiente ecuación:

$$\delta s = 0.42 * D * Af \quad (8-42)$$

Dónde Af se define como sigue:

- Para SUG I Y II:

- Cuando $T_c \leq 4$

$$Af = K * S_{d1} * I * \left(\frac{1}{T_c}\right) = 2.5 * K * Q * Fa * S_o * I * \left(\frac{T_s}{T_c}\right) \quad (8-43)$$

- Cuando $T_c > 4$

$$Af = K * S_{d1} * I * \left(\frac{1}{T_c^2}\right) = 2.5 * K * Q * Fa * S_o * I * \left(\frac{4 * T_s}{T_c^2}\right) \quad (8-44)$$

- Para SUG III:

- Cuando $T_c \leq T_L$

$$Af = K * S_{d1} * \left(\frac{1}{T_c}\right) = 2.5 * K * Q * Fa * S_o * \left(\frac{T_s}{T_c}\right) \quad (8-45)$$

- Cuando $T_c > T_L$

$$Af = K * S_{d1} * \left(\frac{1}{T_c^2}\right) = 2.5 * K * Q * Fa * S_o * \left(\frac{T_L * T_s}{T_c^2}\right) \quad (8-46)$$

La altura mínima del anillo anti desborde vendrá dada por la siguiente tabla:

| S_{DS} | SUG I | SUG II | SUG III |
|---------------------|-------|--------------------|----------------|
| $S_{DS} < 0.33g$ | (a) | (a) | δs (c) |
| $S_{DS} \geq 0.33g$ | (a) | $0.7 \delta s$ (b) | δs (c) |

Tabla 11. Altura de anillo anti desborde.

- (a): Se recomienda una altura de $0.7\delta s$ por consideraciones económicas, pero no es obligatorio.
- (b): se requiere una altura igual a $0.7\delta s$ a menos que se proporcione una de las siguientes

alternativas:

- Se proporciona una contención secundaria para controlar el derrame del producto.
 - El techo y el cuerpo del tanque están diseñados para contener el líquido que se derrama.
- (c): se requiere una altura igual a δs a menos que se proporcione una de las siguientes alternativas:
- Se proporciona una contención secundaria para controlar el derrame del producto.
 - El techo y el cuerpo del tanque están diseñados para contener el líquido que se derrama.

3.4.8.1.4.4. Resistencia al deslizamiento

Para tanques auto-soportados de fondo plano, la fuerza cortante en la base debe ser resistida por la fuerza de fricción que se genera entre el fondo del tanque y el suelo. Para comprobar si esto se cumple, la API 650 establece la siguiente ecuación:

$$V_s = \mu * (W_s + W_r + W_f + W_p) * (1 - 0.4 * Av) \quad (8-47)$$

Esta ecuación establece la fuerza resistente necesaria para evitar el desplazamiento.

Siempre y cuando la fuerza cortante en la base, V , no exceda la fuerza V_s , los tanques auto-soportados no requieren anclaje lateral adicional. Si, por el contrario, la fuerza resistente fuera menor que el cortante en la base, se deberán proveer anclajes laterales para contener al tanque en un evento de estas características.

Para el caso de tanques soportados mecánicamente, no se necesita anclaje lateral adicional para contener el desplazamiento.

3.4.8.1.4.5. Tanques mecánicamente anclados

Cuando el tanque necesita ser soportado mecánicamente, la porción de producto que contribuye a la resistencia contra el levantamiento no debe ser considerada, diseñando los anclajes para la condición más desfavorable.

El cálculo de la carga que deben resistir los anclajes se realiza de acuerdo a las siguientes ecuaciones:

$$W_{AB} = \left(\frac{1,273 M_{rw}}{D^2} - w_t * (1 - 0,4 * Av) \right) \quad (8-48)$$

$$P_{AB} = W_{AB} * \left(\frac{\pi * D}{n_A} \right) \quad (8-49)$$

Los esfuerzos admisibles de las partes que componen el anclaje no deberán superar las siguientes restricciones:

- Para pernos y fajas no podrá superar el 80% del límite elástico.
- Para otras partes, el 133% del esfuerzo admisible según ASME.

APLICACIÓN INFORMÁTICA PARA EL DIMENSIONAMIENTO INTEGRAL DE TANQUES
MEDIANTE LA NORMA API 620.

LUIS JULIO MARTÍNEZ BARTHE

- El esfuerzo admisible para el cuerpo en los puntos de anclaje estará limitado a 170 Mpa.

Cuando se requiere anclaje mecánico, el conjunto de accesorios de fijación del anclaje y los accesorios del cuerpo del tanque serán diseñados para la carga de diseño de los accesorios de anclaje, PA. Esta carga de diseño será la menor de la carga entre el mínimo límite elástico especificado multiplicado por la raíz del área nominal del anclaje o 3 veces PAB.

Para que el tanque mecánicamente anclado sea estable, debe cumplir los siguientes requisitos:

- Esfuerzo longitudinal de compresión en la pared menor o igual al admisible.
- Esfuerzo circunferencial en la pared menor o igual al admisible.

Si el tanque anclado es inestable se debe tomar las siguientes medidas:

- Aumentar el espesor de la placa anular, sin exceder el espesor del primer anillo de la pared.
- Aumentar el espesor del primer anillo de la pared.
- Modificar dimensiones del tanque, aumentando el diámetro y disminuyendo la altura.

3.4.8.1.5. Máxima tensión de compresión longitudinal de membrana en virolas

3.4.8.1.5.1. *Tanques auto-anclados*

Cuando $J < 0,785$, la tensión de compresión longitudinal máxima del cuerpo en su parte inferior cuando no hay elevación calculada, se determinará por la siguiente fórmula:

$$\sigma_c = \left(w_t(1 + 0.4 * A_v) + \frac{1,273 * M_{rw}}{D^2} \right) * \frac{1}{1000 * t_s} \quad (8-50)$$

Cuando $J > 0,785$, la tensión de compresión longitudinal máxima del cuerpo en su parte inferior cuando hay elevación calculada, se determinará por la siguiente fórmula:

$$\sigma_c = \left(\frac{w_t(1+0.4*A_v)+w_a}{0.607-0.18667*J^{2,3}} - w_a \right) * \frac{1}{1000*t_s} \quad (8-51)$$

3.4.8.1.5.2. *Tanques mecánicamente anclados*

La máxima tensión de compresión longitudinal en virolas en el fondo del cuerpo será determinada por la siguiente fórmula:

$$\sigma_c = \left(w_t(1 + 0.4 * A_v) + \frac{1,273 * M_{rw}}{D^2} \right) * \frac{1}{1000 * t_s} \quad (8-52)$$

LUIS JULIO MARTÍNEZ BARTHE

3.4.8.1.5.3. *Tensión de compresión longitudinal admisible de membrana en el cuerpo del tanque.*

La máxima tensión real de compresión longitudinal de virola, σ_c , debe ser menor que la tensión sísmica admisible, F_c , considerando el efecto de la presión interna debida a los contenidos del líquido. Además, dicha tensión real de la virola de fondo debe ser inferior al doble del límite elástico mínimo del acero para evitar la plastificación del material.

• Si $\frac{G*H_W*D^2}{t_s^2} \geq 44$

$$F_c = \frac{83*t_s}{D} < 0.5 * F_{ty} \quad (8-53)$$

• Si $\frac{G*H_W*D^2}{t_s^2} < 44$

$$F_c = \frac{83*t_s}{2.5*D} + 7.5 * \sqrt{G * H_W} < 0.5 * F_{ty} \quad (8-54)$$

• Si $\frac{G*H_W*D^2}{t_s^2} < 10^6$

$$F_c = \frac{10^6*t_s}{2.5*D} + 600 * \sqrt{G * H_W} < 0.5 * F_{ty} \quad (8-55)$$

3.4.8.1.6. *Requerimientos para pernos de anclaje*

Cuando al realizar la verificación de los puntos anteriores vemos que no se cumplen los requerimientos indicados, el tanque tendrá que ser anclado. En este caso, lo especificado en el punto 5.12 del código API 650 debe ser seguido (desarrollado en el punto 7.2.2 de este documento).

En este caso, U será calculada como sigue (tabla 5.21a del código):

$$U = [(F_p P_{di} - 0.08th) * D^2 * 785] + \left[4 \frac{Mrw}{D}\right] - Wr * (1 - 0,4 * Av) \quad (8-56)$$

Se comparará el valor de la ecuación (8-49) con el de la ecuación (8-56) y se seleccionará el mayor de los dos para escoger el perno.

Cuando los pernos de anclaje son requeridos, el espaciamento entre ellos no deberá superar los 3m. Las silletas para pernos de anclaje deben ser diseñadas para soportar las cargas inducidas. Un procedimiento aceptable es el propuesto en la especificación AISI E-1, Volumen II, parte VII, “Anchor bolt chairs”.

LUIS JULIO MARTÍNEZ BARTHE

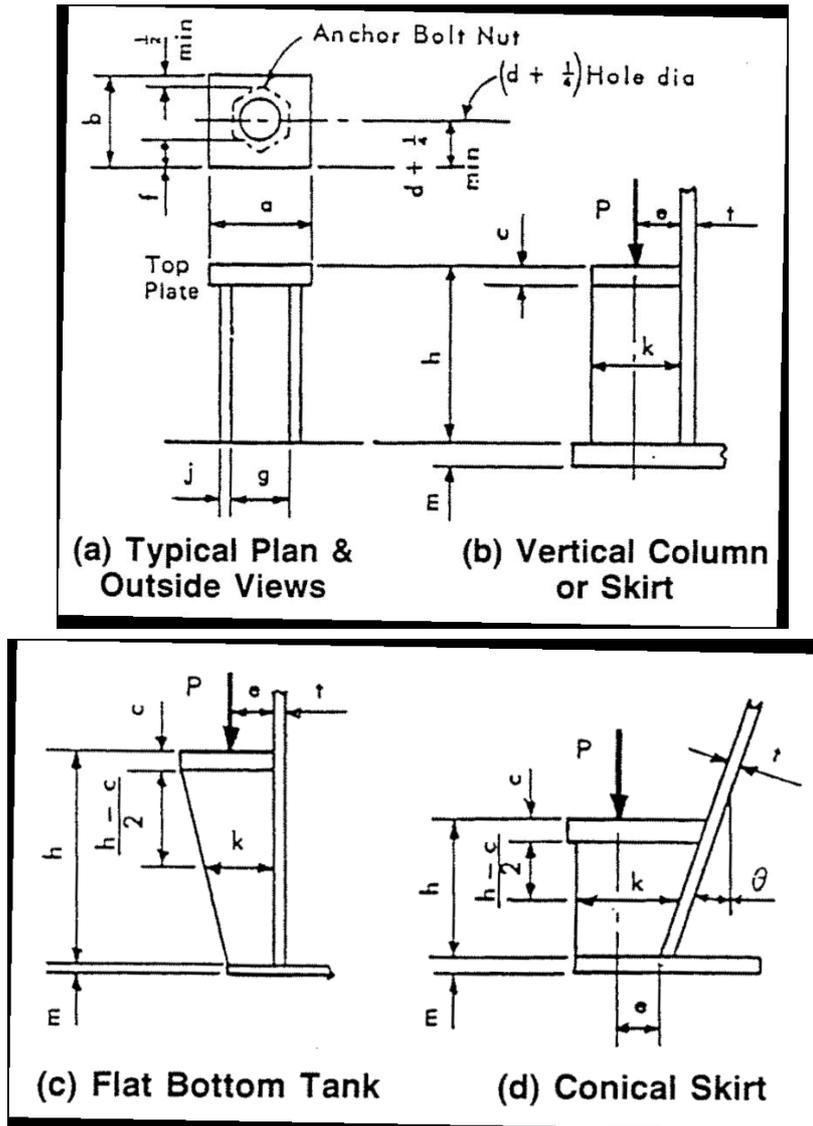


Ilustración 14. Silleta de anclaje según AISI E-1.

El tamaño mínimo de pernos de anclaje es M24, excluyendo la corrosión permisible si estuviere especificado.

3.4.8.1.7. Requerimientos de estabilidad para sismo en tanques diseñados con Anexo Q o R de API 620

3.4.8.1.7.1. Nomenclatura adicional

- h_s : altura adicional requerida del cuerpo por encima del anillo anti desborde, en mm.
- W_{ns} : es el peso efectivo del aislamiento en el cuerpo, en N.
- W_{nr} : peso efectivo del aislamiento actuando en el techo, en N.
- X_{ns} : altura desde el fondo al centro de acción para la carga del aislamiento en el cuerpo, en m.
- X_{nsr} : altura desde el fondo al centro de acción para la carga del aislamiento en el techo, en m.

APLICACIÓN INFORMÁTICA PARA EL DIMENSIONAMIENTO INTEGRAL DE TANQUES
 MEDIANTE LA NORMA API 620.

LUIS JULIO MARTÍNEZ BARTHE

3.4.8.1.7.2. *Factor de reducción de fuerza*

El factor de modificación de respuesta para tanques de almacenamiento de líquidos deberá ser menor o igual a los valores que se muestran en las siguientes tablas:

| Sistema de anclaje | Rwi , (impulsivo) | Rwc , (convectivo) |
|------------------------------|-------------------|--------------------|
| Tanque interior: | | |
| Acero (nickel, o inoxidable) | | |
| Auto-anclado | 1.5 | 1 |
| Mecánicamente anclado | 1.75 | 1 |
| Aluminio | | |
| Auto-anclado | 1.25 | 1 |
| Mecánicamente anclado | 1.5 | 1 |
| Tanque exterior (Vacío): | | |
| Auto-anclado | 2 | - |
| Mecánicamente anclado | 2 | - |

**Estos valores aplican al evento CLE. Para evento OLE utilizar $R_w=1$.*

Tabla 12. Factor R_w para tanques Anexo Q

| Sistema de anclaje | Rwi , (impulsivo) | Rwc , (convectivo) |
|--------------------------|-------------------|--------------------|
| Tanque interior: | | |
| Auto-anclado | 2.25 | 1.5 |
| Mecánicamente anclado | 2.5 | 1.5 |
| Tanque exterior (Vacío): | | |
| Auto-anclado | 2 | - |
| Mecánicamente anclado | 2 | - |

Tabla 13. Factor R_w para tanques Anexo R.

Los tanques internos y externos puede que no compartan una base común. En tal caso, los factores de reducción de fuerza se escogerán independientemente para cada uno de ellos. Sin embargo, si los tanques interno y externo comparten una base común, la carga sísmica se calculará utilizando los valores de modificación de respuesta menores en ambos tanques y deberá realizarse un análisis dinámico para determinar el efecto combinado.

3.4.8.1.7.3. *Chapas anulares de fondo*

El espesor estará determinado por API 650, anexo E (con cargas modificadas según los requisitos de este anexo) más corrosión a menos que se requiera un aumento de espesor para cumplir con el Anexo R o el Anexo Q. El ancho de la placa anular deberá ser por API 650, Anexo E (con cargas modificadas por los requisitos de este anexo) a menos que se requiera un aumento de ancho para conformidad con el Anexo R o el Anexo Q.

3.4.8.1.7.4. *Cargas de aislamiento*

Para tanques diseñados y construidos con un tanque externo que contiene aislamiento de relleno en el espacio anular entre los tanques, el peso del aislamiento debe dividirse por igual a la

pared interna y externa del tanque para cargas laterales sísmicas a menos que se realiza un análisis más riguroso para determinar la distribución. El aislamiento dentro del espacio anular no deberá ser utilizado para calcular la resistencia al vuelco. El aislamiento en el techo o la plataforma suspendida si se podrá considerar para resistir el vuelco.

Para tanques de pared simple con aislamiento o tanques de pared doble con el aislamiento adherido a la superficie de la chapa, el peso del aislamiento debe incluirse en el peso del tanque, W_t , utilizado para resistir el vuelco. El peso del aislamiento también se incluirá en la definición de los términos, W_t y W_{rs} .

La ecuación (8-19) se verá modificada de la siguiente forma:

$$V_i = A_i * (W_s + W_r + W_f + W_i + W_{ns} + W_{nr}) \quad (8-57)$$

Las ecuaciones (8-21) y (8-22) también se verán modificadas:

$$M_{rw} = \sqrt{[A_i(W_i X_i + W_s X_s + W_r X_r + W_{ns} X_{ns} + W_{nr} X_{nr})]^2 + [A_c(W_c X_c)]^2} \quad (8-58)$$

$$M_{rw} = \sqrt{[A_i(W_i X_i + W_s X_s + W_r X_r + W_{ns} X_{ns} + W_{nr} X_{nr})]^2 + [A_c(W_c X_{cs})]^2} \quad (8-59)$$

3.4.8.1.7.5. Cargas adicionales en techo

Cuando $S_{DS} > 0.33g$, el tanque está clasificado como SUG III y cargas de equipos tales como bombas, tuberías y plataformas soportadas directamente por el techo exceden el 25% del peso combinado del techo y la cubierta, $W_r + W_s$, se realizará un análisis dinámico para determinar la carga efectiva del techo y la aceleración del techo amplificada para el diseño del techo, los soportes y la estructura.

3.4.8.1.7.6. Disposiciones especiales para tanques que requieren diseños de niveles de rendimiento

Esta sección es aplicable a tanques refrigerados construidos según API 620, Anexo Q o Anexo R con métodos de diseño complementarios que abordan un sismo de nivel operativo (OLE), a veces denominado OBE, un nivel de contingencia al terremoto (CLE), a veces conocido como SSE, y un terremoto de nivel de réplica (ALE) cuando es requerido por API 625, regulaciones o el cliente.

A continuación se explican cada uno de estos eventos:

- OLE: el sistema de tanques permanecerá operativo y solo se requerirán reparaciones menores. El sistema de tanques debe ser capaz de soportar múltiples eventos con este movimiento de tierra sin daño significativo. Aplicable a tanque interior.
- CLE: el contenedor de líquido primario sobrevivirá y contendrá el líquido (con sólo pequeñas fugas permitidas). El sistema de tanques puede no ser reparable después de este evento. Se trata de un evento singular en la vida de diseño del sistema de tanques. Aplicable a tanque interior.
- ALE: se supone que el contenedor de líquido interior está dañado por el evento CLE y la contención secundaria del sistema contiene el líquido. La contención secundaria está destinada a sobrevivir a múltiples réplicas del ALE con daños menores y fugas. Aplicable a

tanque exterior.

El nivel de líquido operativo máximo se aplicará a todo el diseño sísmico, incluida la determinación del anillo anti desborde.

El sismo vertical debe ser considerado.

Factores de ajuste alternativos a las relaciones de amortiguación están permitidos siempre que se basen en datos geotécnicos locales y análisis racionales.

3.4.8.1.7.6.1. *Operating level earthquake (OLE)*

Si se utiliza API 650 para definir el movimiento de suelo OLE en tanques interiores, se realizarán las siguientes modificaciones:

- S_s , 10% de terremoto PE50 de los datos del USGS, respuesta espectral 5 por ciento amortiguada en períodos cortos (0.2 seg), en % g;
- S_1 , 10% de terremoto PE50 de los datos del USGS, respuesta espectral 5 por ciento amortiguada en un período de un segundo, en % g.
- El factor de escala, Q, no aplica en este caso.
- Las ecuaciones (8-9) y (8-10) no aplican.
- La ecuación (8-8) se verá modificada de la siguiente forma:

$$A_i = K_i * F_a * S_s$$

- Las ecuaciones (8-11) y (8-12) se verán modificadas de la siguiente forma:

- Cuando $T_c \leq T_L$

$$A_c = K * S_{d1} * \left(\frac{1}{T_c}\right) \leq A_i$$

- Cuando $T_c > T_L$

$$A_c = K * S_{d1} * \left(\frac{T_L}{T_c^2}\right) \leq A_i$$

- A menos que lo permitan específicamente las reglamentaciones, las fuerzas de diseño OLE no se ajustarán por un factor de importancia, I, o factor de reducción de fuerza, R. Tampoco se reducirán por el multiplicador 0.7 (1 / 1.4) comúnmente aplicado para convertir eventos de nivel de contingencia a métodos ASD.
- A menos que se defina de otra manera por los requisitos reglamentarios, la relación de amortiguación para las aceleraciones espectrales impulsivas deberá ser 5%.
- La relación de anclaje para un tanque interno autosoportado, J, no debe exceder el valor de 1.0.

- El anillo anti desborde del tanque interior tomará el siguiente valor:

$$\delta_s = 0.42A_f + h_s$$

Dónde el valor mínimo de h_s es 300 mm.

Se pueden utilizar métodos alternativos de cálculo de altura del anillo anti desborde si lo aprueba el organismo regulador de la zona. La altura calculada no debe ser inferior al 80% del valor requerido por estas disposiciones.

- La fuerza de deslizamiento calculada en la base del tanque no debe exceder el valor de V_s . El coeficiente de fricción máximo, μ , deberá ser $(\tan 30^\circ / 1.5)$ donde 1.5 es el factor de seguridad contra el deslizamiento. Los anclajes no se pueden usar para resistir el deslizamiento. Si la fuerza de deslizamiento excede el valor permitido, el tanque debe ser reconfigurado. Cuando el evento OLE está definido por la evaluación de riesgos de la planta del cliente, y cuando un nivel reducido de la seguridad contra la operabilidad es consistente con la evaluación de riesgos de la planta, el factor de seguridad puede reducirse a 1.25.
- El aislamiento del fondo del tanque debe estar diseñado para resistir las presiones combinadas de la carga del producto, el momento de vuelco y la carga sísmica vertical.

3.4.8.1.7.6.2. Contingency level earthquake (CLE)

El movimiento del terreno que se aplicará para cumplir con los criterios de desempeño de CLE se basará en las regulaciones del gobierno local.

Para utilizar API 650 en la definición del movimiento CLE, se realizarán las siguientes modificaciones:

- El factor de escala, Q , no aplica en este caso.
- El factor de reducción de fuerza, R_w , se tomará de las tablas 11 o 12 según aplique.
- El factor de importancia, I , deberá tomarse igual a 1.
- El coeficiente de rozamiento, μ , necesario para calcular V_s , será igual a $\tan 30^\circ$.
- Los anclajes no se pueden usar para resistir el deslizamiento. Si la fuerza de deslizamiento excede el valor permitido, el tanque debe ser reconfigurado.
- La relación de amortiguación para la interacción suelo-estructura no debe exceder el 20%.

3.4.8.1.7.6.3. Aftershock level earthquake (ALE)

Este caso de diseño solo será aplicable cuando las reglamentaciones o los documentos del proyecto requieran específicamente esta comprobación.

A menos que se haya definido lo contrario por las reglamentaciones locales vigentes, el movimiento de tierra del terremoto de nivel de réplica (ALE) se definirá con los valores espectrales reducidos en un 50%.

Si el tanque exterior no está diseñado como una contención secundaria (es decir, sirve como límite de presión) y no está construido con material API 620, entonces no hay diseño o evaluación

APLICACIÓN INFORMÁTICA PARA EL DIMENSIONAMIENTO INTEGRAL DE TANQUES MEDIANTE LA NORMA API 620.

LUIS JULIO MARTÍNEZ BARTHE

para ALE. En caso contrario, el tanque exterior, la base y los anclajes se diseñarán para el ALE asumiendo que el tanque interno ya no existe y que todo el líquido está contenido en el tanque exterior. Se adoptarán las siguientes medidas:

- La contención secundaria se diseñará para ALE mientras contenga líquido utilizando un factor de importancia igual a 1.0 y los valores de modificación de respuesta según las tablas 11 o 12.
- A menos que se defina de otra manera por los requisitos reglamentarios, la relación de amortiguación para las aceleraciones espectrales impulsivas deberá ser 5%.
- El aislamiento de la base se puede usar para alterar la respuesta del tanque a los movimientos del terreno si tiene las siguientes características:
 - Los tanques interno y externo están aislados sobre una base común para evitar un diferencial excesivo de desplazamientos entre ellos.
 - El anclaje, las tuberías internas y externas, el aislamiento y otros equipos conectados están diseñados para la mayor deformación diferencial.
 - Un espectro de respuesta específico de la zona es obligatorio y debe incluir los períodos a largo plazo necesarios para definir la respuesta del sistema.
 - Todas las conexiones de tuberías externas al sistema están diseñadas para los desplazamientos reales calculados (sin modificaciones I o R).

3.4.8.2. Cálculo de estabilidad frente al sismo con aplicación informática

Para implementar en el programa los procedimientos descritos en los apartados 8.2.1, 8.2.2, 8.2.3, 8.2.4 y 8.2.5 se ha creado una hoja de cálculo. Una vez introducidos todos los datos de diseño en la hoja “DATOS” y ejecutada la macro “SISMO”, el programa mostrará el cálculo de sismo que aplique según los datos introducidos.

Cada cálculo estará compuesto por los siguientes apartados:

3.4.8.2.1. Datos generales del tanque

Se mostrarán los datos de diseño más relevantes en el cálculo de la estabilidad frente al sismo:

- *Diámetro del tanque.*
- *Altura del tanque.*
- *Relación diámetro/altura.*
- *Gravedad específica del líquido.*
- *Límite elástico del material usado.*
- *Espesor de la primera virola.*

3.4.8.2.2. Resumen de pesos

Muestra el peso de las diferentes partes estructurales del tanque calculado en apartados anteriores.

3.4.8.2.3. Resumen de pesos

En este apartado se muestran todos los datos de diseño necesarios para calcular la estabilidad del tanque frente al sismo. Se podrán encontrar las siguientes celdas (de ahora en adelante en este

APLICACIÓN INFORMÁTICA PARA EL DIMENSIONAMIENTO INTEGRAL DE TANQUES
MEDIANTE LA NORMA API 620.

LUIS JULIO MARTÍNEZ BARTHE

apartado, para abreviar, se indicará la celda y a continuación la ecuación con la que se corresponde):

- *Aceleración de cálculo de la zona, S_p* : en esta celda, el usuario deberá introducir la aceleración de cálculo de la zona. Si el tanque está situado en España, aparecerá un hipervínculo con las aceleraciones de cálculo provenientes de NCSE-02.
- *Parámetro de respuesta con un amortiguamiento del 5% para un periodo de 0.2 s, S_s* : (8-1).
- *Parámetro de respuesta con un amortiguamiento del 5% para un periodo de 1 s, S_1* : muestra el resultado de la ecuación (8-2).
- *Parámetro de respuesta con un amortiguamiento del 5% para un periodo de 0 s, S_0* : (8-3)
- *Clasificación de la zona*: se deberá escoger de un desplegable la clasificación de la zona. Si no se tiene información de la zona considerada, se escoger
- *Coefficiente de amplificación del terreno para un periodo de 0.2 segundos, F_a* : se mostrará automáticamente el valor que proceda de la tabla 6.
- *Coefficiente de amplificación del terreno para un periodo de 1 segundo, F_v* : se mostrará automáticamente el valor que proceda de la tabla 7.
- *Factor de modificación de respuesta para modo impulsivo, R_{wi}* : se mostrará automáticamente el valor que proceda de la tabla 9.
- *Factor de modificación de respuesta para modo convectivo, R_{wc}* : se mostrará automáticamente el valor que proceda de la tabla 9.
- *SUG*: se deberá escoger de un desplegable.
- *Factor de importancia, I* : se mostrará automáticamente el valor que proceda de la tabla 8.
- *Periodo local, T_L* : (8-8)
- *Factor de escala para espectro de aceleración, Q* .
- *Parámetro de aceleración de respuesta espectral en periodos cortos (0.2s), S_{ds}* : (8-4).
- *Coefficiente de ajuste del espectro de aceleración amortiguada al 5%, K_s* : (8-6).
- *Periodo natural para comportamiento convectivo, T_c* : (8-7).
- *Aceleración espectral impulsiva, A_i* : (8-9), (8-10), (8-11).
- *Coefficiente de ajuste del espectro de aceleración para un amortiguamiento del 0.5% (impulsivo)-5% (convectivo), K* .
- *Aceleración espectral convectiva, A_c* : (8-12), (8-13).
- *Parámetro de aceleración vertical de sismo, A_v* : (8-29).

3.4.8.2.4. Cálculo de pesos

Se mostrará los pesos calculados en apartados anteriores, transformados a N:

- *Peso del contenido del tanque, W_p* .
- *Peso del techo, W_r* .
- *Peso total de las virolas del tanque y cualquier accesorio, W_s* .
- *Peso del Fondo, W_f* .

- *Peso total, W_{eff}* : suma de todos los pesos anteriores.

3.4.8.2.5. Cálculo del punto de aplicación del momento actuante en la losa

- *Altura desde el fondo al centro de acción de fuerzas laterales (impulsivo en losa), X_{is}* : (8-17),(8-18).
- *Altura desde el fondo al centro de acción de fuerzas laterales (convectivo en losa), X_{cs}* : (8-19)

3.4.8.2.6. Cálculo de puntos de aplicación

- *Peso eficaz impulsivo del líquido, W_i* : (8-14),(8-15)
- *Peso eficaz impulsivo del líquido, W_c* : (8-16)
- *Altura desde el fondo al centro de acción de fuerzas laterales (impulsivo en anillo) , X_i* : (8-20),(8-21).
- *Altura desde el fondo al centro de acción de fuerzas laterales (convectivo en anillo), X_c* : (8-22).

3.4.8.2.7. Efecto sísmico vertical.

- *Fuerza sísmica vertical de diseño, $F_v (+)$* : (8-28)
- *Fuerza sísmica vertical de diseño, $F_v (-)$* : (8-28)

3.4.8.2.8. Cargas dinámicas circunferenciales debidas al líquido

- *Fuerza dinámica circunferencial en la pared del tanque debido al modo impulsivo, calculada en el centro de acción de fuerzas laterales, N_i* : (8-30), (8-31), (8-32).
- *Fuerza dinámica circunferencial en la pared del tanque debido al modo convectivo, calculada en el centro de acción de fuerzas laterales, N_c* : (8-33)
- *Fuerza hidrostática circunferencial debido a presión del producto, N_h* : (8-34)
- *$\sigma_t (+)$* : (8-34) u (8-36) según aplique.
- *$\sigma_t (-)$* : (8-34) u (8-36) según aplique.
- *Esfuerzo tangencial máximo sobre las virolas que componen el cuerpo del tanque debido al movimiento del líquido*: esta celda muestra el máximo de las dos celdas anteriores.
- *Límite elástico del material*: se muestra el límite elástico del material, necesario para la comprobación que viene a continuación.
- *¿El cuerpo aguanta el máximo esfuerzo tangencial?*: en esta celda, si el esfuerzo tangencial máximo es menor al límite elástico, se mostrará "SI". Mostrará "NO" en caso contrario.

3.4.8.2.9. Cálculo del momento de vuelco

- *Momento de vuelco en el perímetro de la base del cuerpo, M_{rw}* : (8-26)

- *Momento de vuelco en la base de la losa, Ms: (8-27)*

3.4.8.2.10. Fuerzas cortantes en la base

- *Cortante de diseño en la base debido a la componente impulsiva, Vi: (8-24)*
- *Cortante de diseño en la base debido a la componente convectiva, Vc: (8-25)*
- *Resistencia al deslizamiento, $\mu=0,4$, situación más desfavorable, Vs: (8-47)*
- *Cortante total en la base del depósito, V: (8-23)*

3.4.8.2.11. Resistencia a las cargas de diseño

- *Espesor de fondo excluyendo corrosión, ta: muestra el espesor corroído del fondo.*
- *Fuerza resistente de los contenidos por unidad de longitud circunferencial, wa: (8-37)*
- *Carga de diseño del producto por unidad de longitud circunferencial. Para esta comprobación consideraremos el tanque vacío para estar del lado de la seguridad, wint.*
- *Carga del techo, incluidas cargas vivas, Wrs.*
- *Peso del tanque y cubierta actuando en la base del cuerpo por unidad de longitud circunferencial, wt: (8-40)*
- *Ratio de anclaje, J: (8-39)*
- *Tensión de compresión longitudinal en el cuerpo, Sigmac: (8-50),(8-51)*
- *Tensión sísmica de compresión longitudinal admisible, Fc: (8-55)*

3.4.8.2.12. Anillo anti desborde

- *Aceleración espectral, Af: (8-43),(8-44)*
- *Altura de anillo anti desborde, δs : (8-42)*
- *¿El depósito está provisto de una contención secundaria para controlar el derrame del producto?: en esta celda habrá que introducir “NO” si el tanque no dispone de un cubeto de contención.*

En función de la respuesta anterior, el programa mostrará un mensaje adaptándose a la tabla 10.

3.4.8.2.13. Comprobaciones

En este apartado se mostrarán todas las comprobaciones necesarias para verificar si el tanque es estable frente al efecto sísmico introducido. A continuación se enumeran:

- *¿ $J \leq 1,54$?: Si se muestra “NO”, será necesario el anclaje del tanque. Aparecerán una serie de celdas debajo para dimensionar los pernos.*
- *¿ $F_c > \sigma_c$?: Si se muestra “NO”, será necesario rediseñar los espesores del tanque.*
- *¿ $t_a < t_{virola_inferior}$?: Si se muestra “NO”, será necesario rediseñar los espesores del tanque.*
- *¿ $V < V_s$?: Si se muestra “NO”, será necesario rediseñar el tanque.*

En caso de que sea necesario el uso de anclajes, el programa mostrará el siguiente apartado:

3.4.8.2.14. Cálculo de anclajes para sismo

- *Carga de levantamiento de diseño sobre anclajes por unidad de longitud*, wab : (8-48)
- *Nº de anclajes (separados cada 3 metros)*, Na : se dividirá el perímetro del tanque entre 3.
- *Carga que se lleva cada perno*, Pab : se comparará el valor de la ecuación (8-49) con el de la ecuación (8-56)/ na y se seleccionará el mayor de los dos para escoger el perno.
- *Material del perno*: A 193 B7
- *Tensión máxima admisible*: muestra el valor de F_y según la tabla 5.21a de API 650.
- *Área resistente requerida por el anclaje*, $Aanc$: muestra el valor resultante de la siguiente ecuación:

$$Ar = \frac{Pab}{0.8 Fy} \quad (8-60)$$

- *Perno requerido*: selecciona de un catálogo de pernos introducido en el programa, el perno con el área resistente resultante. Si el área resulta mayor que el máximo contenido en el catálogo, se mostrará un mensaje indicando aumentar el nº de pernos.

3.4.8.2.15. Cálculo de estabilidad para tanques API 620 diseñados con Anexo Q o Anexo R

En caso de que el tanque se haya diseñado con el Anexo Q o R, el programa mostrará las celdas que se han mostrado en los apartados anteriores, pero con las modificaciones del apartado 8.2.6 implementadas.

3.4.9. CÁLCULO DE VENTEOS

Los venteos de presión y vacío para controlar la evaporación se emplean cuando es necesario o deseable reducir la evaporación de los contenidos de un tanque a la atmósfera. Estos venteos son generalmente designados como control de evaporación.

3.4.9.1. Aplicación de la norma

La normativa API 2000 ofrece una guía para los cálculos de los requerimientos de caudales de entrada y salida de aire, tanto en condiciones normales como de emergencia:

- Caudal normal de entrada de aire debido al máximo caudal de descarga del líquido;

$$\dot{V}_{IP} = \dot{V}_{Pe} \quad (9-1)$$

Dónde:

\dot{V}_{Pe} = máximo caudal de descarga del líquido, en m^3/h .

APLICACIÓN INFORMÁTICA PARA EL DIMENSIONAMIENTO INTEGRAL DE TANQUES
 MEDIANTE LA NORMA API 620.

LUIS JULIO MARTÍNEZ BARTHE

- Caudal normal de entrada debido a la condensación de vapores causadas por un máximo decremento en el temperatura

El máximo caudal durante un enfriamiento viene dado por

$$\dot{V}_{IT} = C * V_{tk}^{0.7} * R_i \quad (9-2)$$

Dónde:

C es un factor que depende de la presión de vapor, de la temperatura media de almacenamiento y de la de latitud, dado por la tabla 13.

| LATITUD | FACTORES C | | | |
|------------|--|------|--|------|
| | Presión de vapor similar a la del hexano | | Presión de vapor mayor a la del hexano | |
| | Tª media de almacenamiento | | | |
| | <25 | >=25 | <25 | >=25 |
| <=42º | 4 | 6.5 | 6.5 | 6.5 |
| >42º a 58º | 3 | 5 | 5 | 5 |
| >58º | 2.5 | 4 | 4 | 4 |

Tabla 14. Factores C para venteos

V_{tk} es el volumen del tanque, en m³/h.

R_i es el factor de reducción por aislamiento, que viene dado por la siguiente ecuación (si es un tanque de pared simple):

$$R_i = \frac{1}{1 + \frac{h \cdot lin}{\lambda in}} \quad (9-3)$$

Dónde:

h es el coeficiente de película interior, en W/m²K. API 2000 ofrece un valor comúnmente usado de 4 W/m²K

lin es el espesor del aislamiento, en m.

λin es la conductividad térmica del aislamiento

Si se trata de un tanque de pared doble se utilizará el siguiente factor de reducción por aislamiento:

$$R_c = 0.25 + 0.75 * \frac{A_c}{A} \quad (9-4)$$

Dónde:

A es el área total del tanque, en m².

A_c es el área del tanque exterior, en m².

- Caudal normal de salida de aire resultado de la máxima entrada de líquido en el tanque:

$$\dot{V}_{OP} = \dot{V}_{Pf} \quad (9-5)$$

APLICACIÓN INFORMÁTICA PARA EL DIMENSIONAMIENTO INTEGRAL DE TANQUES
 MEDIANTE LA NORMA API 620.

LUIS JULIO MARTÍNEZ BARTHE

Dónde:

\dot{V}_{Pf} es el máximo caudal de entrada de líquido, en m³/h.

Si el líquido contenido en el tanque es un líquido volátil:

$$\dot{V}_{OP} = 2 * \dot{V}_{Pf} \quad (9-6)$$

- Caudal normal de salida resultado de la expansión y evaporación.

$$\dot{V}_{OT} = Y * V_{tk}^{0.9} * R_i \quad (9-7)$$

Dónde:

Y es el factor de latitud, dado por la tabla 14.

| LATITUD | FACTOR-Y |
|------------|----------|
| <=42° | 0.32 |
| >42° a 58° | 0.25 |
| >58° | 0.2 |

Tabla 15. Factores Y para venteos.

V_{tk} es el volumen del tanque, en m³.

R_i es el factor de reducción por aislamiento, ($R_i=1$ para tanques sin aislamiento)

- Caudal de venteo de emergencia resultado de la exposición al fuego

$$q = 906.6 \cdot \frac{Q \cdot F}{L} \cdot \left(\frac{T}{M}\right)^{0.5} \quad (9-8)$$

Dónde

Q es el calor recibido de una exposición al fuego y viene dado por la tabla 15, expresado en vatios;

| Área de mojado (Atws) m ² | Presión de diseño (Kpa) | Factor Q (W) |
|---|----------------------------|-----------------|
| <18.6 | ≤103.4 | 29012784.09 |
| ≥18.6 and <93 | ≤103.4 | 7201946.538 |
| ≥93 and <260 | ≤103.4 | 5005474.229 |
| ≥260 | >7 a ≤103.4 | 6584168.076 |
| ≥260 | ≤7 | 4129700 |

Tabla 16. Factores Q para venteos.

APLICACIÓN INFORMÁTICA PARA EL DIMENSIONAMIENTO INTEGRAL DE TANQUES
 MEDIANTE LA NORMA API 620.

LUIS JULIO MARTÍNEZ BARTHE

A_{TWS} se calcula según la siguiente ecuación:

$$A_{TWS} = \pi * D * 9.14 \quad (9-9)$$

F es el factor medioambiental y viene dado en la tabla 16;

| Diseño del tanque | Conductancia térmica | | Espesor del aislamiento | | Factor F |
|------------------------|----------------------|-----------------------------|-------------------------|-----|----------|
| | m ² ·K/W | Btu/(h·ft ² ·°F) | cm | in. | |
| Tanque sin aislamiento | — | — | 0 | 0 | 1.0 |
| Tanque aislado | 22.7 | 4 | 2.5 | 1 | 0.3 |
| | 11.4 | 2 | 5.1 | 2 | 0.15 |
| | 5.7 | 1 | 10.2 | 4 | 0.075 |
| | 3.8 | 0.67 | 15.2 | 6 | 0.05 |
| | 2.8 | 0.5 | 20.3 | 8 | 0.0375 |
| | 2.3 | 0.4 | 25.4 | 10 | 0.03 |
| | 1.9 | 0.33 | 30.5 | 12 | 0.025 |

Tabla 17. Factores F para venteos.

L es el calor latente de vaporización del líquido almacenado a la temperatura de ebullición, expresado en julios por kilogramo;

T es la temperatura de ebullición, expresado en kelvin;

M es la masa molecular relativa del vapor.

A continuación se calcularán los máximos requerimientos para cada caso:

- Máximo caudal de entrada de aire para requerimientos normales:

$$\dot{V}_{I,normal} = \dot{V}_{IP} + \dot{V}_{IT} \quad (9-10)$$

- Máximo caudal de salida de aire para requerimientos normales:

$$\dot{V}_{O,normal} = \dot{V}_{OP} + \dot{V}_{OT} \quad (9-11)$$

- Máximo caudal de salida de aire para requerimientos de emergencia:

$$\dot{V}_{O,emergency} = \dot{V}_{OP} + \dot{V}_{OT} + q \quad (9-12)$$

3.4.9.2. Cálculo de venteos con aplicación informática

La implementación de la norma API 2000 para el cálculo de venteos mediante la aplicación informática se ha realizado de la siguiente manera:

3.4.9.2.1. Datos del tanque

En primer lugar aparecerán una serie de celdas con las características principales del tanque y de alguno de sus componentes:

- *Diámetro del tanque:* se mostrará el diámetro del tanque introducido en la hoja “DATOS”.
- *Altura del tanque:* se mostrará el diámetro del tanque introducido en la hoja “DATOS”.
- *Tª de diseño:* se mostrará la temperatura de diseño introducida en la hoja “DATOS”.
- *Latitud:* se deberá introducir la latitud a la que se encuentra el tanque o el sistema de tanques.
- *Espesor aislamiento:* si el tanque está diseñado con los Anexos Q o R, se mostrará el espesor del aislamiento introducido en la hoja “DATOS”.
- *Conductividad térmica del aislamiento:* se deberá introducir la conductividad térmica del aislamiento usado en el tanque o sistema de tanques.
- *Coeficiente de película:* según API 200, el valor de $4 \text{ W/m}^2\text{K}$ es comúnmente usado.

3.4.9.2.2. Datos del fluido

- *Líquido volátil:* se deberá seleccionar de un desplegable “SI” o “NO” según proceda.
- *Calor latente vaporización, L:* se deberá introducir el calor latente de vaporización del fluido contenido en el tanque.
- *Temperatura de ebullición, t:* se deberá introducir la temperatura de ebullición del fluido contenido en el tanque a la presión de diseño.
- *Presión de vapor del fluido a la Tª de operación:* se deberá introducir la presión de vapor del fluido a la temperatura de diseño.
- *¿Presión de vapor menor o igual a la del hexano a la misma Tª?:* se deberá seleccionar de un desplegable “SI” o “NO” según proceda. Se podrá encontrar al lado una tabla con las presiones de vapor del hexano para facilitar la respuesta a esta pregunta.

3.4.9.2.3. Capacidad de flujo requerida debido al llenado y a la descarga

3.4.9.2.3.1. Exhalación requerida debida al llenado

- *Caudal de llenado del tanque, V_{pf} :* se deberá introducir el caudal de llenado del tanque, en Nm^3/h .
- *Caudal de salida de aire, V_{op} :* mostrará el resultado de las ecuaciones (9-5) o (9-6), según proceda.

3.4.9.2.3.2. Inhalación requerida debida a la descarga

- *Caudal de descarga del tanque, V_{ip} :* se deberá introducir el caudal de vaciado del tanque, en Nm^3/h .
- *Caudal de entrada de aire, V_{op} :* mostrará el resultado de las ecuación (9-1).

3.4.9.2.4. Capacidad de flujo requerida debido a la inhalación y a la exhalación
térmica

3.4.9.2.4.1. Exhalación térmica

- *Factor Y*: selecciona el valor que proceda de la tabla 14 en función de los datos introducidos.
- *Volumen del tanque, V_{tk}* : se muestra el volumen del tanque, en m^3 , según la ecuación:

$$V_{tk} = \pi * D^2 * H / 4 \quad (9-13)$$

- *Factor de reducción debido al aislamiento, R_i* : mostrará el valor de 1 si el tanque no está aislado, el resultado de la ecuación (9-3) si es un tanque aislado o la ecuación (9-4) si es un sistema de tanque doble. Aparecerán dos celdas indicando el valor de A y de Ac .
- *Caudal de salida de aire, V_{ot}* : muestra el resultado de la fórmula (9-7).

3.4.9.2.4.2. Inhalación térmica

- *Factor C*: selecciona el valor que proceda de la tabla 13 en función de los datos introducidos.
- *Volumen del tanque, V_{tk}* : muestra el resultado de la ecuación (9-13).
- *Factor de reducción debido al aislamiento, R_i* : mostrará el valor de 1 si el tanque no está aislado, el resultado de la ecuación (9-3) si es un tanque aislado o la ecuación (9-4) si es un sistema de tanque doble. Aparecerán dos celdas indicando el valor de A y de Ac .
- *Caudal de entrada de aire, V_{it}* : muestra el resultado de la ecuación (9-2).

3.4.9.2.5. Capacidad de flujo requerida para exposición de fuego externo (venteo
de emergencia)

- *Area de mojado, A_{tws}* : muestra el resultado de la ecuación (9-9)
- *Factor Q*: seleccionará el valor de la tabla 15 según aplique.
- *Factor F*: se deberá introducir el valor seleccionado de la tabla 16.
- *Masa molecular del vapor, M*: se deberá introducir la masa molecular de vapor del fluido que contenga el tanque, en g/mol.
- *Caudal de aire expulsado, q*: muestra el resultado de la ecuación (9-8).

3.4.9.2.6. Máximos requerimientos para cada caso

En este apartado se realizará una comparativa con los caudales calculados, de forma que se seleccionará el mayor de ellos como caudal de diseño:

- *Máximo caudal de entrada de aire para requerimientos normales*: muestra el resultado de la ecuación (9-10).
- *Máximo caudal de salida de aire para requerimientos normales*: muestra el resultado de la ecuación (9-11).

- *Máximo caudal de salida de aire para requerimientos de emergencia:* muestra el resultado de la ecuación (9-12).
- *Caudal de diseño:* muestra el mayor de los tres, en Nm^3/h .

3.4.10. CARGAS A LA CIMENTACIÓN

Una vez diseñado el tanque, nos encontramos en disposición de describir un conjunto de cargas que serán necesarias para diseñar la cimentación:

3.4.10.1. Carga del fluido

- *Peso puntual del fluido:* muestra el peso total del fluido, calculado en apartados anteriores, en KN.
- *Presión ejercida por el fluido:* muestra el peso del fluido dividido por el área de la base del tanque, en Kpa.

3.4.10.2. Carga del tanque

- *Peso puntual del tanque:* muestra el peso total del tanque, en KN, calculado en apartados anteriores.
- *Peso del tanque distribuido a lo largo de su perímetro:* muestra el peso del tanque distribuido a lo largo de su perímetro, en KN/m.

3.4.10.3. Viento

- *Fuerza vertical:* muestra el empuje vertical, calculado en la hoja “VIENTO”, en KN.
- *Fuerza horizontal:* muestra el empuje horizontal, calculado en la hoja “VIENTO”, en KN.
- *Momento de vuelco cuerpo-fondo debido a la presión del viento, M_w :* muestra el momento mencionado, en KNm.
- *Momento alrededor de la junta cuerpo-fondo por presión interior, M_{pi} :* muestra el momento mencionado, en KNm.

3.4.10.4. Sismo

- *Fuerza vertical:* mostrará, si el cliente lo ha requerido, la fuerza vertical generada por el sismo en función del tipo de tanque diseñado, en KN.
- *Fuerza cortante:* mostrará la fuerza cortante generada por el tanque, en función del tipo de tanque diseñado, en KN.
- *Momento de vuelco transmitido a la losa:* mostrará el momento de vuelco transmitido a la losa, en función del tipo de tanque diseñado, en KNm.

3.4.11. MATERIALES

Esta hoja de cálculo se ha creado con la intención de poder mostrar automáticamente (mediante diversas funciones implementadas en Excel) en las diferentes hojas de cálculo del programa todos los datos que API 620 ofrece de cada material. Concretamente, se han implementado

las siguientes tablas de la norma:

- Tabla 5-1.
- Tabla Q-3, Anexo Q.
- Tabla S-2, Anexo S (dónde las propiedades del acero inoxidable austenítico varían con la T^a).

3.4.12. TABLAS

Esta hoja de cálculo se ha creado con la intención de ahorrar tiempo al usuario en el diseño del tanque o sistema de tanques, ya que, mediante diversas funciones implementadas en Excel, se muestran automáticamente una serie de datos (en todas las hojas de cálculo desarrolladas en este programa) seleccionados de las tablas que aquí se encuentran.

Se podrán encontrar las siguientes tablas:

- Espesor mínimo de la primera virola, según API 620.
- Catálogo de perfiles angulares.
- Sobrecarga de nieve y viento según CTE.
- Tamaño de la soldadura de filete entre la pared y el fondo, según API 620.
- Catálogo de pernos.
- Tablas necesarias para el cálculo de la estabilidad frente al sismo.
- Tablas necesarias para el cálculo de venteos.

4. VALIDACIÓN DE RESULTADOS

Una vez descrita la herramienta de cálculo utilizada, nos encontramos en disposición de comprobar que los resultados que ofrece el programa son válidos. Para ello, se describirán varios casos prácticos, se efectuará el diseño con la aplicación informática descrita y se realizarán las siguientes comprobaciones de los resultados que ésta ofrezca:

- Análisis mediante el método de elementos finitos con ANSYS de cada uno de los diseños, de forma que, utilizando los espesores ofrecidos por el programa, se pueda comprobar que las tensiones en el tanque rondan la tensión máxima admisible descrita en API 620.
- Comparativa con el software de INTERGRAPH TANK, el cuál, en alguno de los diseños, puede ofrecer una comparativa de los resultados.

4.1. Caso práctico 1

4.1.1. DESCRIPCIÓN

Nuestro cliente, Talleres Huelva Sur S.L., nos encarga el diseño de dos tanques de almacenamiento de nafta liviana y un sistema de tanques de almacenamiento de amoniaco líquido cuyas características son las siguientes:

Tanque 1:

- Emplazamiento:
 - Huelva
- Dimensiones y geometría:
 - Diámetro interior: 15 m
 - Altura del cuerpo: 16 m
 - N° de virolas: 8
 - Dimensión de cada virola: 2 m
 - Sobreespesores de corrosión: 1,5 mm.
 - Eficiencia de junta: 1
- Tipo de techo:
 - Esférico tipo domo
 - Radio: 15 m

APLICACIÓN INFORMÁTICA PARA EL DIMENSIONAMIENTO INTEGRAL DE TANQUES
MEDIANTE LA NORMA API 620.

LUIS JULIO MARTÍNEZ BARTHE

- Condiciones de operación y diseño:
 - T^a de operación: AMB
 - T^a de diseño: AMB
 - Presión de operación: 450 mbarg
 - Presión de diseño: 500 mbarg
- Material:
 - Fondo: ASTM A516 Gr 70.
 - Cuerpo: ASTM A516 Gr 70.
 - Techo: ASTM A516 Gr 70.
 - Densidad: 7850 Kg/m³.
- Fluido: Nafta ligera
 - Densidad específica: 0,77.
 - Altura de nivel de líquido: 15 m.
 - Masa molecular: 16 g/mol.
 - Presión de vapor a 20 ° C: 0.1 Kpa.
 - Temperatura de ebullición: 180 °C.
 - Calor de vaporización: 0.36 MJ/Kg.

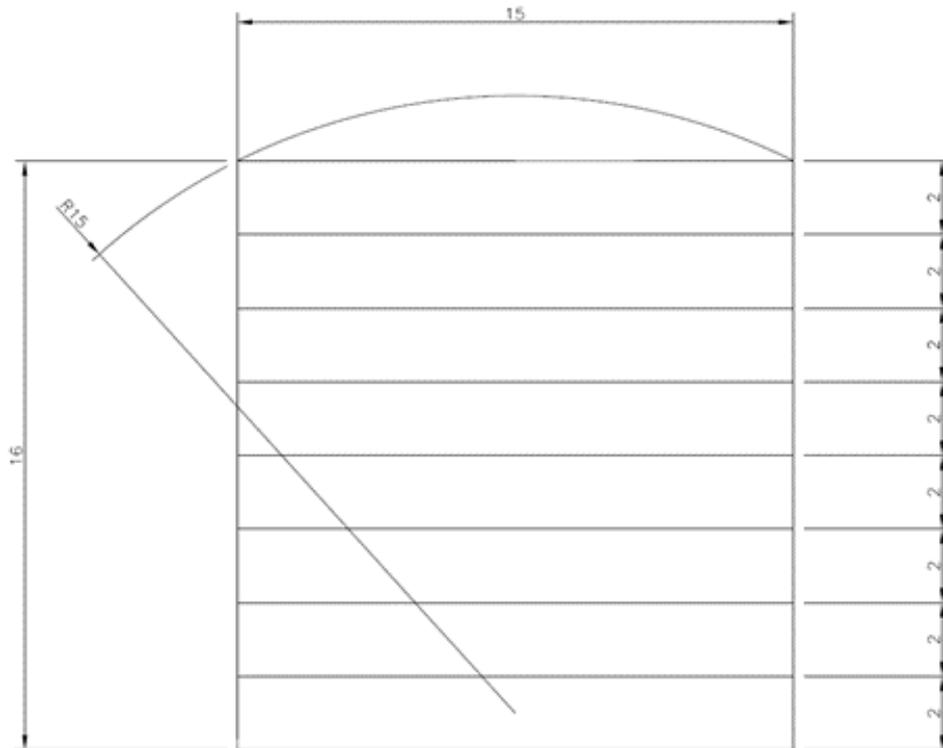


Ilustración 15. Tanque 1.

4.1.2. **RESULTADOS OBTENIDOS**

- A continuación se muestran los espesores obtenidos con la aplicación informática mediante los métodos descritos en el apartado 3:

| PARTE ESTRUCTURAL | ESPESOR DE CÁLCULO (mm) | | ESPESOR ADOPTADO (mm) | |
|-------------------|-------------------------|------|-----------------------|----|
| TECHO | - | 2.67 | - | 5 |
| CUERPO | Virola 1: | 3.05 | Virola 1: | 5 |
| | Virola 2: | 3.86 | Virola 2: | 6 |
| | Virola 3: | 4.67 | Virola 3: | 7 |
| | Virola 4: | 5.49 | Virola 4: | 7 |
| | Virola 5: | 6.30 | Virola 5: | 8 |
| | Virola 6: | 7.11 | Virola 6: | 9 |
| | Virola 7: | 7.93 | Virola 7: | 10 |
| | Virola 8: | 8.74 | Virola 8: | 11 |
| FONDO | - | 8 | - | 8 |

Tabla 18. Espesores obtenidos caso práctico 1.

- Área adicional requerida para la unión techo-cuerpo: 21775 mm²
 - Configuración adoptada: detalle d.

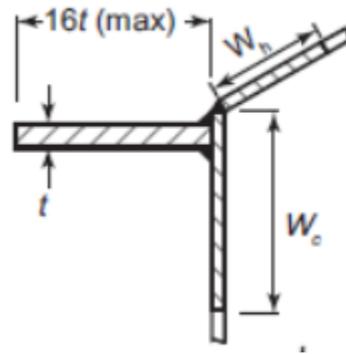


Ilustración 16. Detalle unión techo cuerpo caso práctico 1.

- No es necesaria viga intermedia de rigidización contra el viento.

4.1.3. COMPROBACIÓN MEDIANTE EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS CON EL SOFTWARE ANSYS

El proceso de comprobación se ha realizado en tres fases:

4.1.3.1. Fase 1: Modelo

Se realiza una visualización de los datos geométricos y se crea un modelo de acuerdo a ellos. El modelo creado se corresponde con la siguiente imagen:

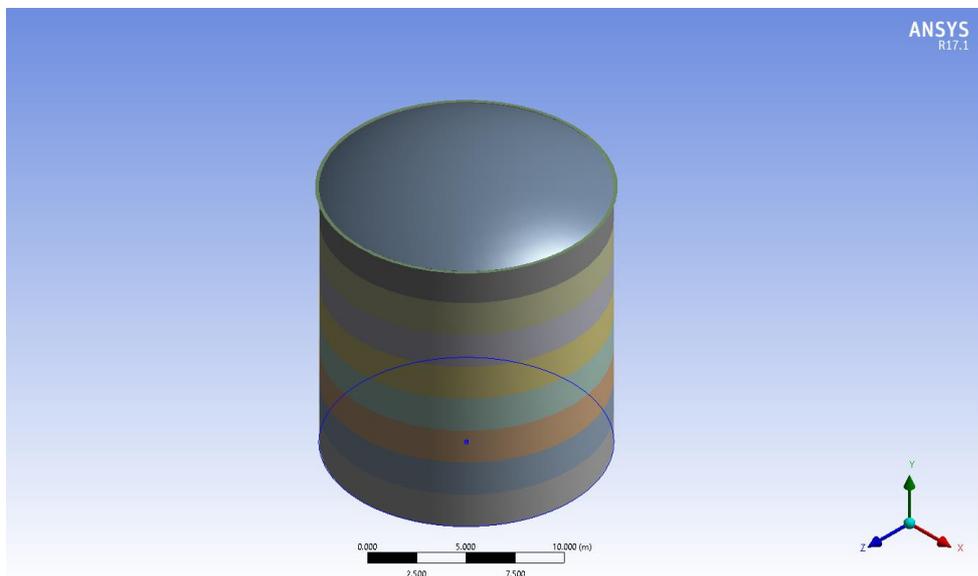


Ilustración 17. Modelo caso práctico 1.

4.1.3.2. Fase 2: Análisis elástico

Se lleva a cabo un análisis elástico del modelo anteriormente descrito mediante la aplicación del método de los elementos finitos:

Para ello, se siguen los siguientes pasos:

LUIS JULIO MARTÍNEZ BARTHE

- Preproceso: Preparación del modelo de elementos finitos.
 - Definición de propiedades de materiales.
 - Definición de atributos y propiedades del mallado.

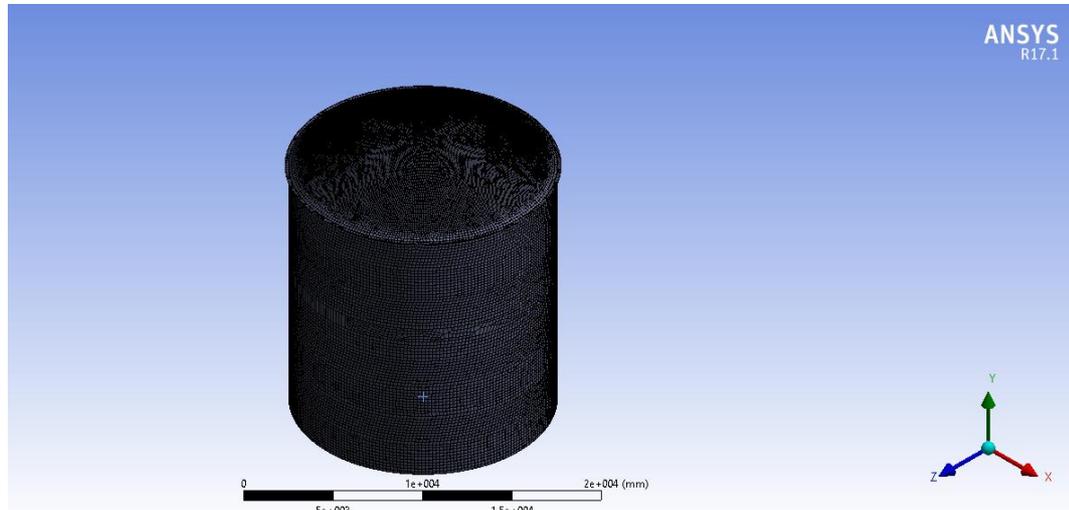


Ilustración 18. Mallado caso práctico 1.

Como se puede observar, se ha refinado la malla en las zonas más conflictivas para que los resultados sean más fiables.

- Aplicación de cargas y condiciones de contorno al modelo mallado.

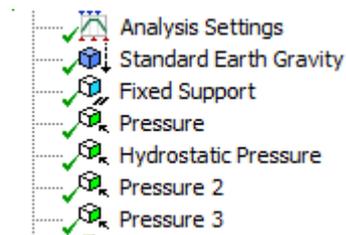


Ilustración 19. Condiciones de contorno caso práctico 1.

- Resolución del análisis y post-procesado de resultados para el estado de carga considerado:

APLICACIÓN INFORMÁTICA PARA EL DIMENSIONAMIENTO INTEGRAL DE TANQUES MEDIANTE LA NORMA API 620.

LUIS JULIO MARTÍNEZ BARTHE

- Resultados obtenidos con los espesores de cálculo:

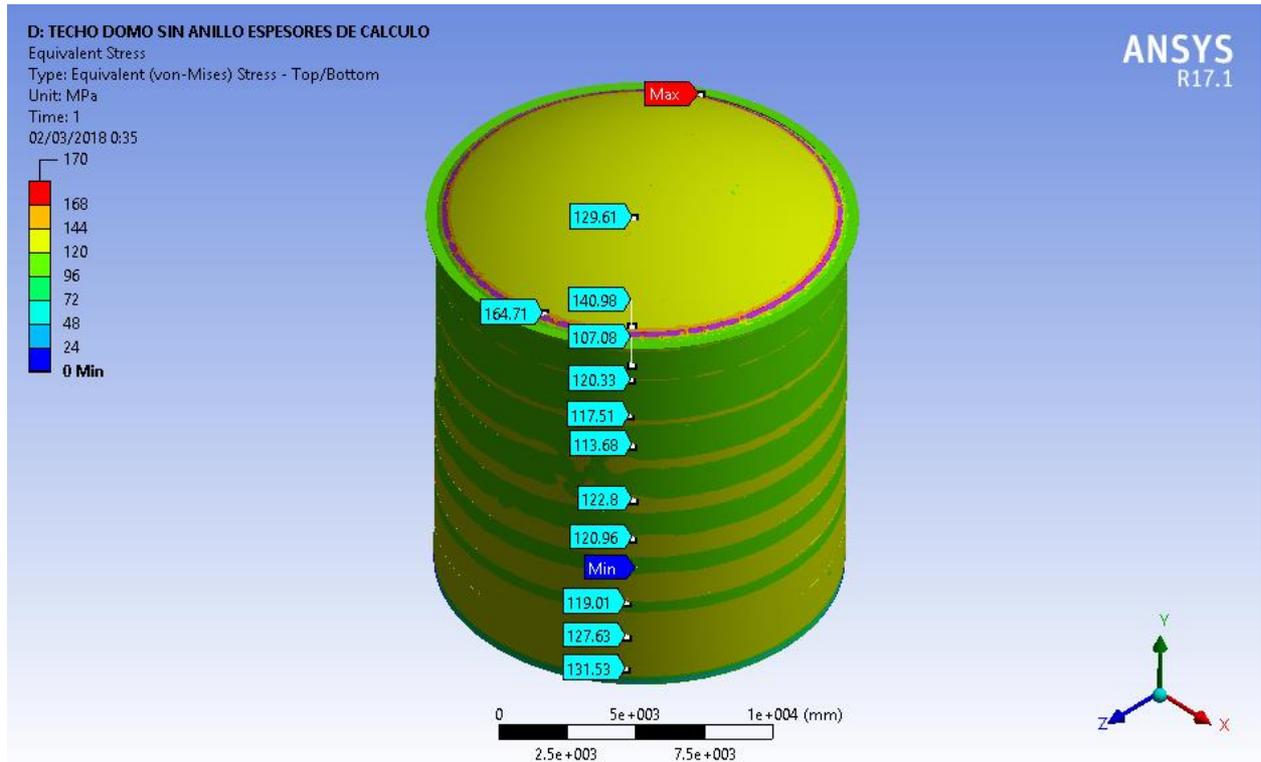


Ilustración 20. Tensiones obtenidas con los espesores de cálculo.

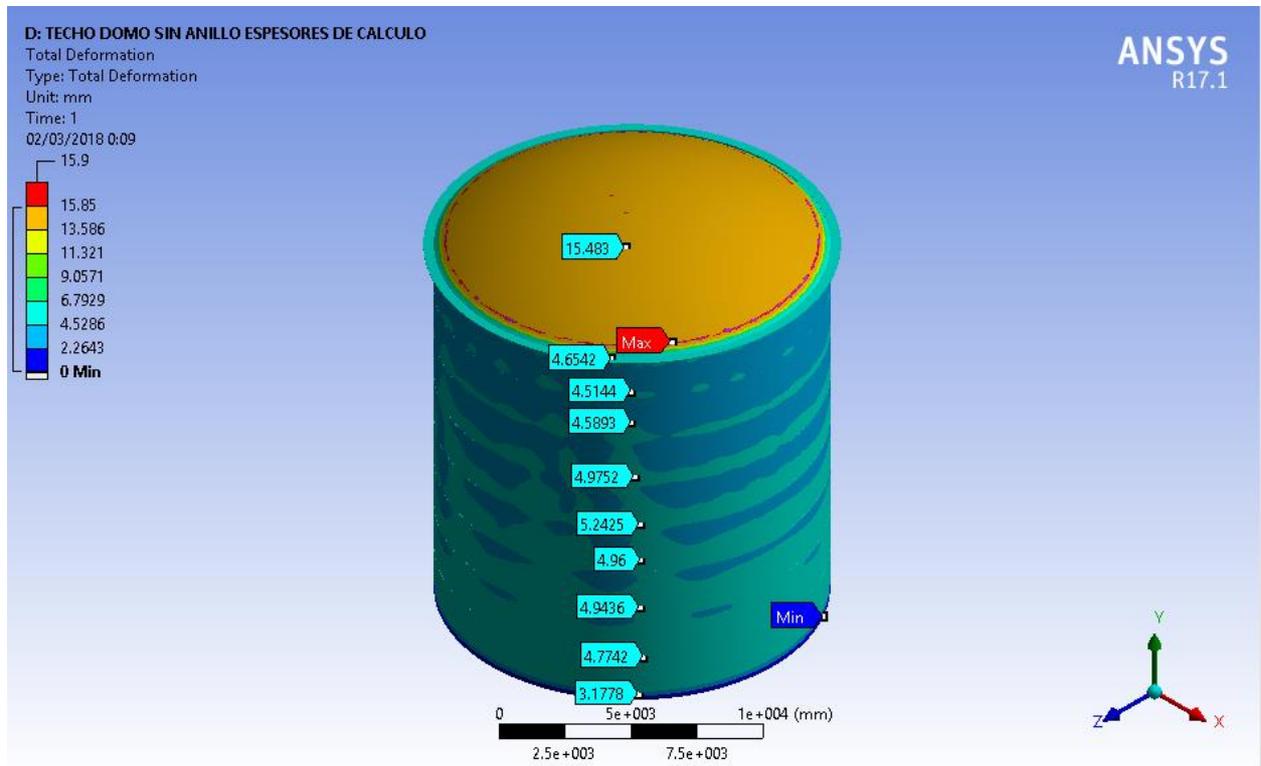


Ilustración 21. Deformaciones obtenidas con los espesores de cálculo.

APLICACIÓN INFORMÁTICA PARA EL DIMENSIONAMIENTO INTEGRAL DE TANQUES MEDIANTE LA NORMA API 620.

LUIS JULIO MARTÍNEZ BARTHE

- Resultados obtenidos con los espesores adoptados :

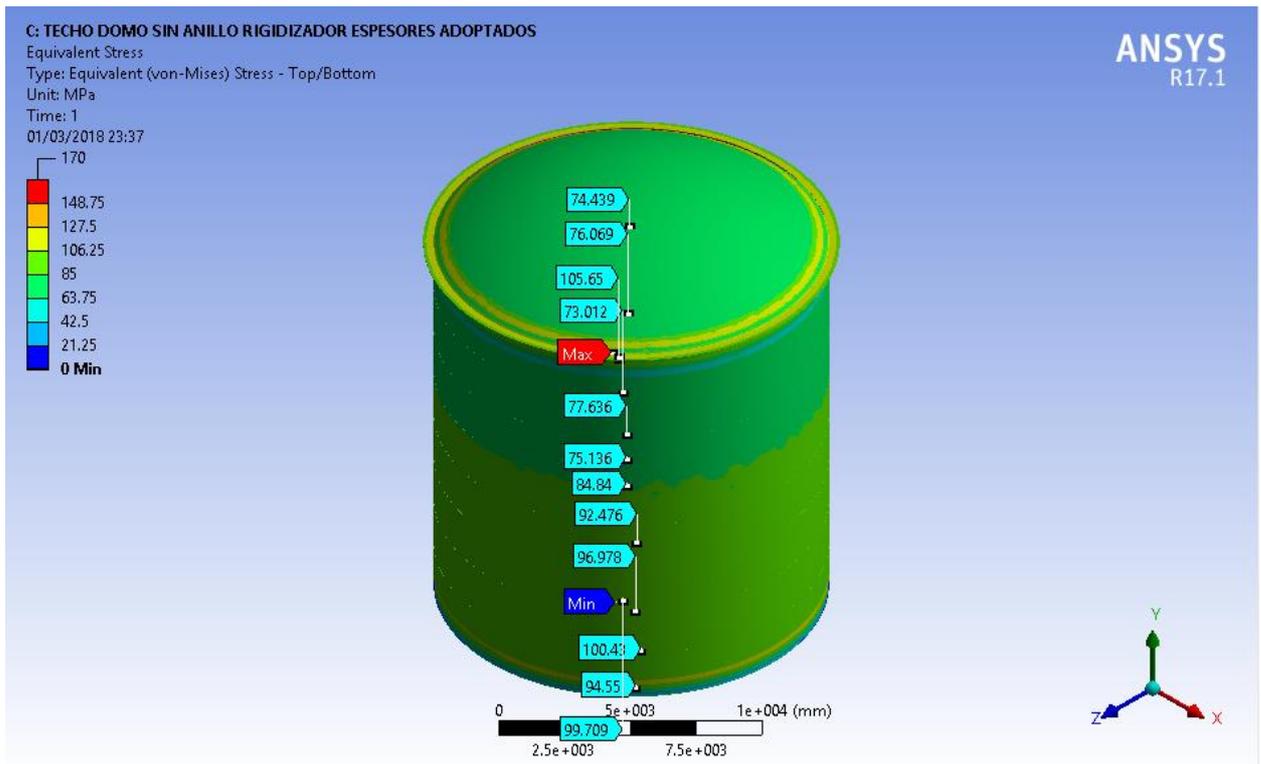


Ilustración 22. Tensiones obtenidas con los espesores adoptados.

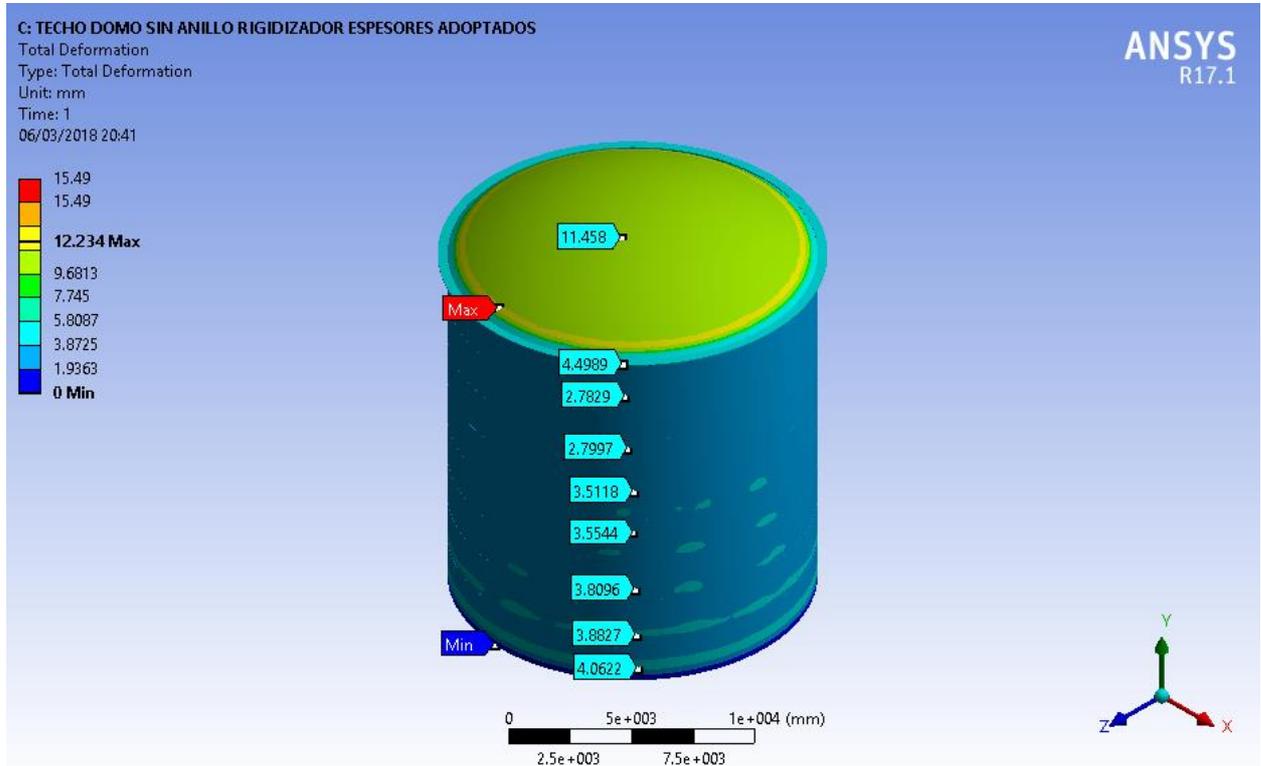


Ilustración 23. Deformaciones obtenidas con espesores adoptados.

APLICACIÓN INFORMÁTICA PARA EL DIMENSIONAMIENTO INTEGRAL DE TANQUES
 MEDIANTE LA NORMA API 620.

LUIS JULIO MARTÍNEZ BARTHE

Supongamos que el tanque contuviese un líquido con una densidad menor e hiciese falta una viga de rigidización intermedia en nuestro tanque. Éstos serían los resultados obtenidos:

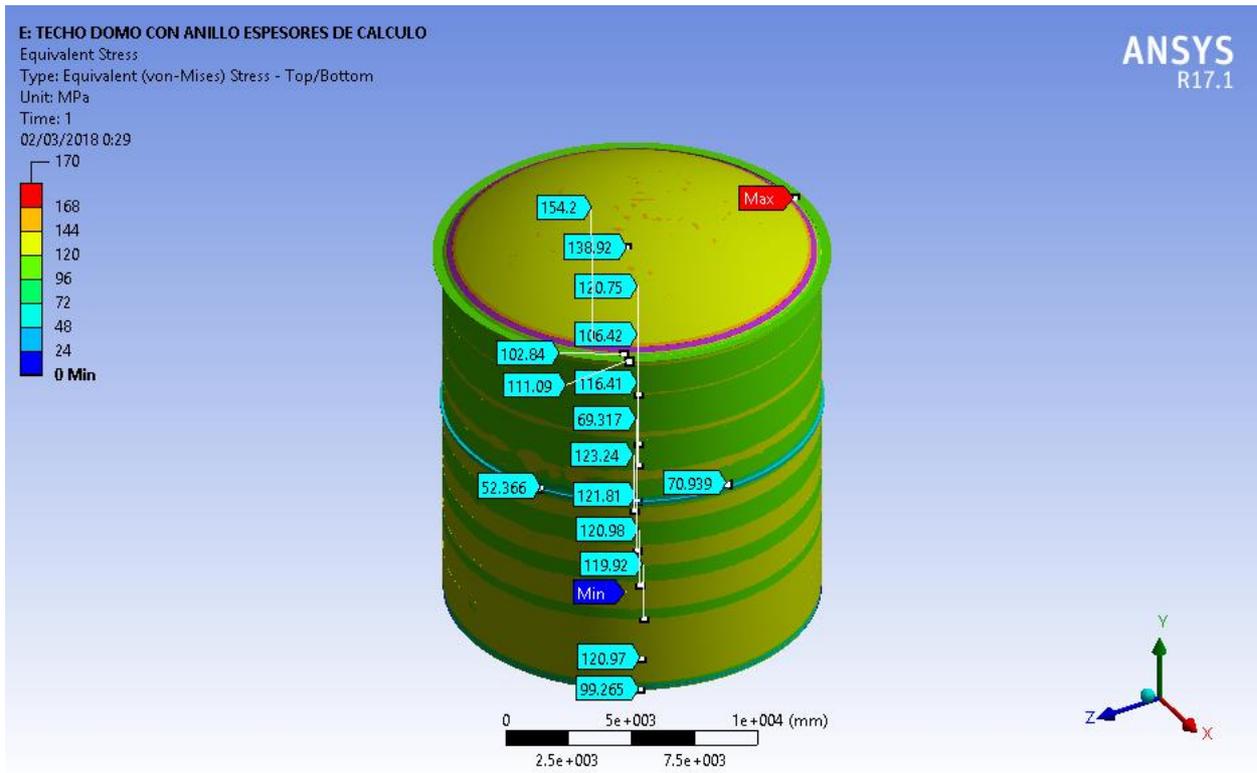


Ilustración 24. Tensiones obtenidas con anillo rigidizador y espesores de cálculo.

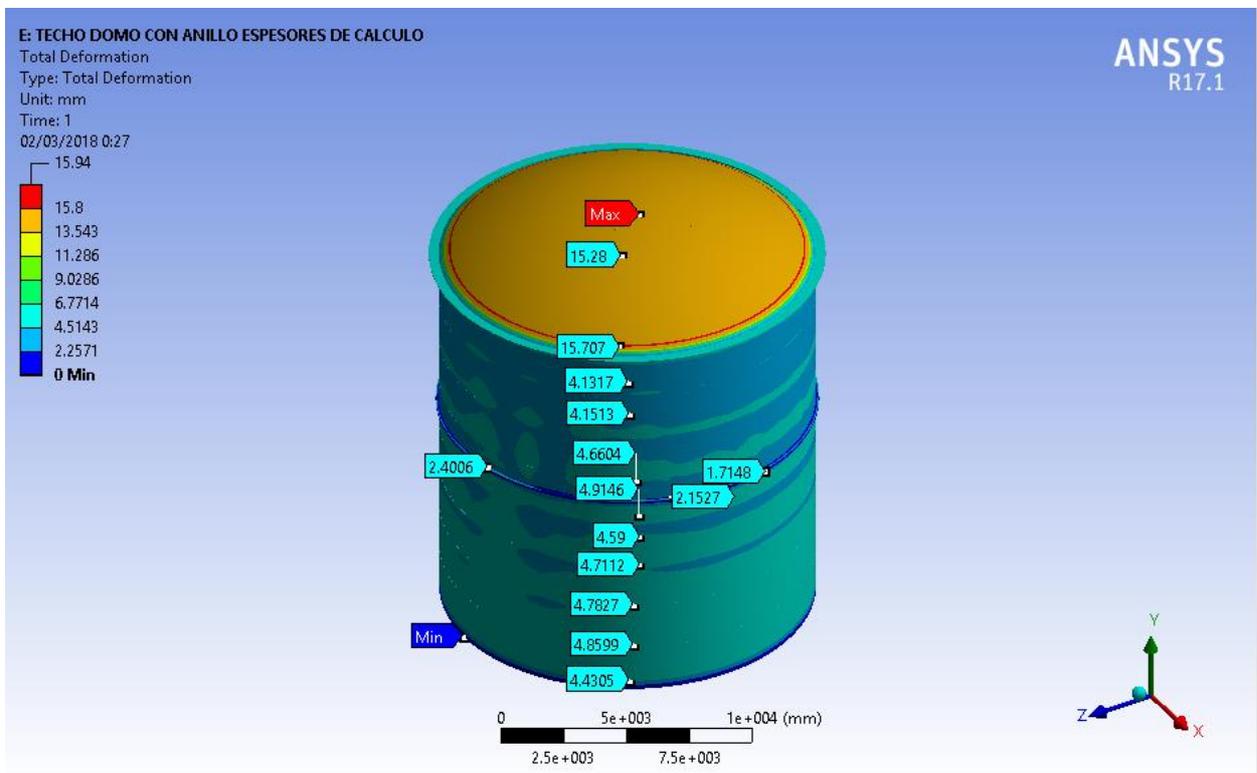


Ilustración 25. Deformaciones obtenidas con anillo rigidizador y espesores de cálculo.

4.1.3.3. Fase 3: Evaluación de resultados

Como se puede observar, se obtienen los resultados esperados:

- La tensión obtenida en el tanque para los espesores de cálculo ronda la máxima admisible para el material seleccionado según API 620 (145 Mpa). Esto es coherente, ya que ha sido la tensión que la aplicación informática ha utilizado para determinar el espesor de cálculo.
- La tensión obtenida en el tanque para los espesores adoptados (redondeo de espesor de cálculo más espesor de corrosión) está por debajo de la tensión máxima admisible para el material seleccionado según API 620 (145 Mpa).
- Para el caso en el que hiciese falta un anillo rigidizador, se puede observar como se reduce considerablemente la tensión y la deformación en sus alrededores.

Observando la diferencia en los resultados obtenidos entre el cálculo realizado con los espesores de cálculo y los adoptados (especialmente en el techo), se justifica que en este caso la norma imponga un mínimo de 5 mm si el espesor de cálculo obtenido es menor a este valor, ya que las condiciones de contorno pueden hacer que, para el espesor de cálculo, se obtengan tensiones un poco mayores a la admisible (160 Mpa) en puntos singulares.

4.1.4. COMPROBACIÓN MEDIANTE EL SOFTWARE TANK

El software TANK proporciona un diseño rápido y preciso de nuevos tanques y la posibilidad de evaluar los tanques ya existentes. Con TANK, puede realizarse un análisis completo y de las funciones de diseño para:

- Espesor de paredes
- Materiales
- Techos cónicos soportados
- Requerimientos sísmicos
- Consideraciones de servicio y mantenimiento
- Espesores de fondos
- Flexibilidad de boquillas
- Requerimientos de viento para vigas
- Pesos admisibles de fluidos

En la versión 2016, la cuál se ha utilizado para este trabajo, este software añadió el análisis y diseño de tanques diseñados con API 620. A pesar de que tiene algunas limitaciones, servirá para poder realizar una comparativa de los resultados obtenidos con la aplicación informática en este caso práctico.

4.1.4.1. Modelo obtenido

Se introducen en el programa los resultados obtenidos con la aplicación informática y el programa realiza automáticamente el siguiente modelo:

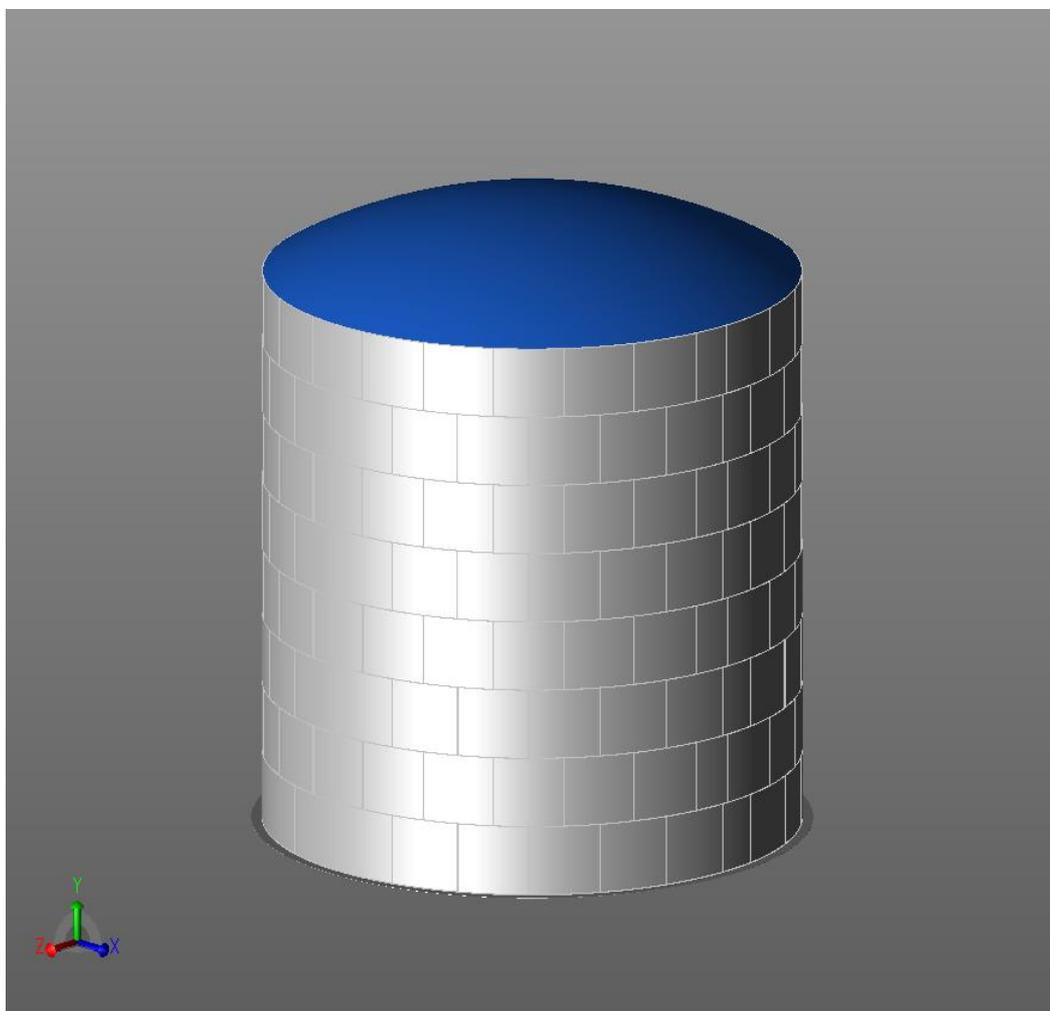


Ilustración 26. Modelo TANK caso práctico 1.

4.1.4.2. Comparación de resultados entre aplicación y TANK.

A continuación se compararán los resultados de algunos de los aspectos más relevantes en el diseño del tanque (susceptibles de ser comparados), como son:

- Fuerzas meridionales y circunferenciales. Espesores.
- Parámetros para el cálculo del área participativa adicional en la unión techo cuerpo.
- Momentos para el cálculo de estabilidad frente al viento.
- Parámetros para el cálculo de estabilidad frente al sismo.

Se generará un ratio indicando la diferencia entre los resultados y en caso de que éste sea mayor a un 10%, se justificará dicha diferencia. Todos los resultados obtenidos con TANK se muestran detallados en el Anexo IV.

4.1.4.2.1. Comparación de fuerzas meridionales y circunferenciales.

| | | APLICACIÓN INFORMÁTICA | | | TANK | | | RATIO | | |
|--------|----------|------------------------|----------------|---|----------------|----------------|--|-----------|-----------|----------------------------|
| | | T1 (Kgf/cm) | T2 (kgf/cm) | Espesor de cálculo incluyendo corrosión (mm) | T1 (Kgf/cm) | T2 (Kgf/cm) | Espesor de cálculo incluyendo corrosión (mm) | T1 (%) | T2 (%) | Espesor adoptado (%) |
| CUERPO | Virola 1 | 185.53 | 441.28 | 4.55 | 187.98 | 439.76 | 4.762 | 1.30 | 0.35 | 4.50 |
| | Virola 2 | 185.89 | 559.06 | 5.36 | 187.03 | 555.57 | 5.263 | 0.61 | 0.63 | 1.87 |
| | Virola 3 | 186.24 | 676.84 | 6.17 | 185.93 | 671.01 | 6.045 | 0.16 | 0.87 | 2.14 |
| | Virola 4 | 186.59 | 794.62 | 6.99 | 184.84 | 786.46 | 6.827 | 0.95 | 1.04 | 2.36 |
| | Virola 5 | 186.95 | 912.39 | 7.80 | 183.58 | 901.90 | 7.609 | 1.83 | 1.16 | 2.53 |
| | Virola 6 | 187.30 | 1030.17 | 8.61 | 182.17 | 1017.35 | 8.391 | 2.82 | 1.26 | 2.67 |
| | Virola 7 | 187.65 | 1147.95 | 9.43 | 180.60 | 1132.79 | 9.172 | 3.91 | 1.34 | 2.80 |
| | Virola 8 | 188.01 | 1265.73 | 10.24 | 178.87 | 1248.24 | 9.954 | 5.11 | 1.40 | 2.89 |
| | | | | | | | | 0.74 | 0.82 | 2.56 |

Tabla 19. Comparativa de fuerzas y espesores caso práctico 1.

La pequeña diferencia en los valores de T1 obtenidos se debe a la simplificación descrita en las ecuaciones (4-10) y (4-11). Dicha simplificación expone que para el cálculo del peso de las virolas se toma el espesor mínimo descrito por la norma. Por tanto, queda demostrado que el peso de las virolas del tanque es despreciable frente al efecto de la presión interior en el cálculo de la fuerza meridional.

La fuerza T2, como se puede apreciar, es prácticamente igual. Esto resulta determinante, ya que, normalmente, siempre será mayor la fuerza circunferencial que la meridional, y por consiguiente, la fuerza circunferencial será la empleada para el cálculo de espesores. Como consecuencia, los espesores obtenidos son prácticamente idénticos. En el Anexo IV se encuentra el report de cálculo generado con TANK. Para el techo, el programa no muestra las fuerzas meridionales y circunferenciales. Sólo muestra el espesor final adoptado.

APLICACIÓN INFORMÁTICA PARA EL DIMENSIONAMIENTO INTEGRAL DE TANQUES
 MEDIANTE LA NORMA API 620.

LUIS JULIO MARTÍNEZ BARTHE

4.1.4.2.2. Comparación de parámetros en la unión techo cuerpo.

| | APLICACIÓN INFORMÁTICA | TANK | RATIO (%) |
|---------------------------|------------------------|------------|-----------|
| wh (mm) | 137.48 | 137.41 | 0.05 |
| wc (mm) | 97.00 | 97.28 | 0.29 |
| Aroof (mm ²) | 481.17 | 481.29 | 0.02 |
| Ashell (mm ²) | 340.24 | 340.00 | 0.07 |
| T2s (lbf/in) | 2141.00 | 2141.40 | 0.02 |
| Q (Kg) | -232169.00 | -234295.97 | 0.91 |
| Ac (mm ²) | 22540.66 | 22393.50 | 0.66 |
| | | | 0.29 |

Tabla 20. Comparativa de momentos para el cálculo de la estabilidad frente al viento.

Como se puede apreciar, el cálculo es prácticamente idéntico.

4.1.4.2.3. Comparación de momentos para el cálculo de estabilidad frente al viento.

Se han obtenido los siguientes resultados:

- Momentos estabilizantes:

| | APLICACIÓN INFORMÁTICA | TANK | RATIO (%) |
|-----------|------------------------|-----------|-----------|
| Mdl (Nm) | 2829907.39 | 2775079.8 | 1.98 |
| Mdlr (Nm) | 390286.75 | 845631 | 53.85 |
| Mf (Nm) | 5954452.57 | 5621087.5 | 5.93 |

Tabla 21. Comparativa de momentos estabilizantes para el cálculo de la estabilidad frente al viento.

Como se puede apreciar, la mayor diferencia está en el momento alrededor de la junta cuerpo-fondo por peso del techo, Mdlr. Esto es debido a que la aplicación informática utiliza para este cálculo el peso del techo corroido, resultando más desfavorable.

- Momentos desestabilizantes:

| | APLICACIÓN INFORMÁTICA | TANK | RATIO (%) |
|----------|------------------------|----------|-----------|
| Mws (Nm) | 432140.50 | 419164 | 3.10 |
| Mw (Nm) | 985901.80 | 901202.6 | 9.40 |
| Mpi (Nm) | 66267970 | 66266636 | 0.0020 |

Tabla 22. Comparativa de momentos desestabilizantes para el cálculo de la estabilidad frente al viento.

4.1.4.2.4. Comparación de resultados obtenidos para el cálculo de estabilidad frente al sismo.

A continuación se muestra la comparativa de todos los resultados:

APLICACIÓN INFORMÁTICA PARA EL DIMENSIONAMIENTO INTEGRAL DE TANQUES
 MEDIANTE LA NORMA API 620.

LUIS JULIO MARTÍNEZ BARTHE

| SISMO | | | |
|-------------|------------------------|----------|-----------|
| PARÁMETRO | APLICACIÓN INFORMÁTICA | TANK | RATIO (%) |
| [Sp] (%g) | 0.1 | 0.1 | 0.00 |
| [Ss] (%g) | 0.25 | 0.25 | 0.00 |
| [SO] (%g) | 0.04 | 0.04 | 0.00 |
| [S1] (%g) | 0.125 | 0.125 | 0.00 |
| [SDS] (%g) | 0.4 | 0.4 | 0.00 |
| [FA] | 1.6 | 1.6 | 0.00 |
| [FV] | 2.25 | 2.3 | 2.17 |
| [TS] | 0.7031 | 0.7188 | 2.18 |
| [TC] (s) | 4.031 | 4.057 | 0.64 |
| [I] | 1.25 | 1.25 | 0.00 |
| [Ac] (%g) | 0.026 | 0.0262 | 0.76 |
| [Ai] (%g) | 0.125 | 0.125 | 0.00 |
| [Wc] (N) | 4599254.79 | 4590400 | 0.19 |
| [Wi] (N) | 15657778.47 | 15628000 | 0.19 |
| [Vc] (N) | 119410 | 120250 | 0.70 |
| [Vi] (N) | 2037218.09 | 2040700 | 0.17 |
| [V] (N) | 2040714.65 | 2044200 | 0.17 |
| [VS] (N) | 7643546.29 | 7650700 | 0.09 |
| [Xc] (m) | 11.11 | 11.12 | 0.09 |
| [Xi] (m) | 6.09 | 6.09 | 0.00 |
| [XCS] (m) | 11.311 | 11.311 | 0.00 |
| [XIS] (m) | 8.4 | 8.4 | 0.00 |
| [WS] (N) | 457246.45 | 457070 | 0.04 |
| [Wrs] (N) | 101700 | 112750 | 9.80 |
| [Mrw] (Nm) | 12594937.11 | 12597000 | 0.02 |
| [Ms] (Nm) | 17099409.65 | 17093000 | 0.04 |
| [AV] (%g) | 0.188 | 0.188 | 0.00 |
| [Ge] | 0.71 | 0.7121 | 0.29 |
| [wa] (N/cm) | 343.68 | 322.14 | 6.69 |
| [wt] (N/cm) | 118.18 | 120.91 | 2.26 |
| [J] | 1.24 | -1.77 | 170.06 |
| [Sa] (Mpa) | 46.52 | 46.4 | 0.26 |
| | | | 6.35 |

Tabla 23. Comparativa de parámetros para comprobar la estabilidad frente al sismo.

Se puede observar que todos los parámetros son prácticamente iguales, excepto el ratio de anclaje, J. Esto es debido a que para el cálculo de este parámetro, la aplicación no tiene en cuenta wint (considera que el tanque está vacío), de modo que es más desfavorable.

4.2. Descripción caso práctico 2

Tanque 2:

- Dimensiones:
 - Diámetro interior: 16 m
 - Altura del cuerpo: 17.5 m
 - N° de virolas: 7
 - Dimensión de cada virola: 2.5 m
- Tipo de techo:
 - Cónico autosoportado.
 - Ángulo de mitad de vértice: 80°
- Condiciones de operación y diseño:
 - T^a de operación: -30 °C
 - T^a de diseño: 30 °C
 - Presión de operación: 150 mbarg
 - Presión de diseño: 200 mbarg
- Material:
 - Fondo: ASTM A573 65. ($\sigma_{adm}=125$ mPA)
 - Cuerpo: ASTM A573 65. ($\sigma_{adm}=125$ mPA)
 - Techo: ASTM A573 65. ($\sigma_{adm}=125$ mPA)
- Fluido: Amoníaco criogénico
 - Densidad específica: 0,68
 - Altura de nivel de líquido: 15 m
 - Masa molecular: 17.03 g/mol.
 - Presión de vapor a 20 ° C: 8.57 bar.
 - Temperatura de ebullición: -25 °C.
 - Calor de vaporización: 1370758.31 J/Kg.

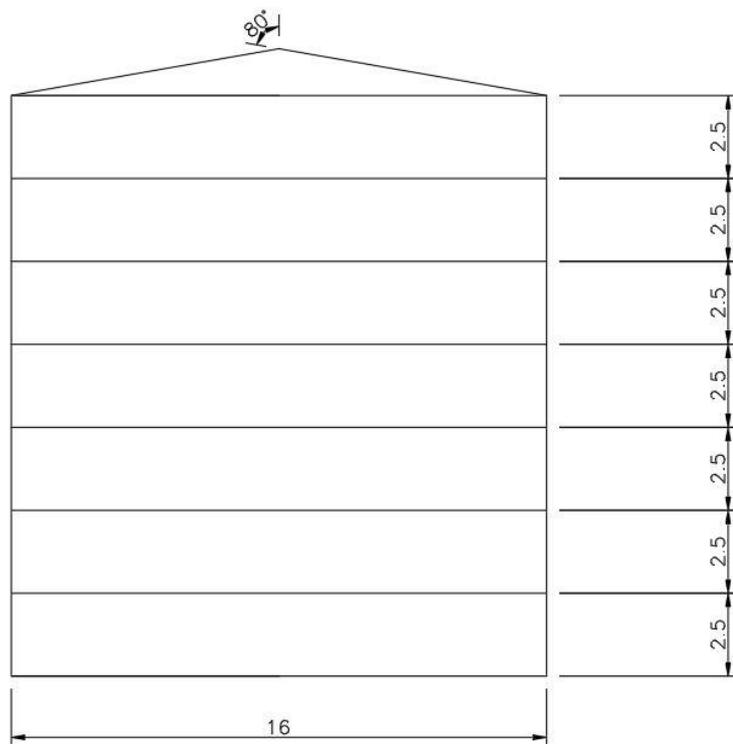


Ilustración 27. Tanque 2.

4.2.1. RESULTADOS OBTENIDOS

- A continuación se muestran los espesores obtenidos con la aplicación informática mediante los métodos descritos en el apartado 3:

| PARTE ESTRUCTURAL | ESPESOR DE CÁLCULO (mm) | | ESPESOR ADOPTADO (mm) | |
|-------------------|-------------------------|------|-----------------------|----|
| | TECHO | - | 7.57 | - |
| CUERPO | Virola 1: | 1.31 | Virola 1: | 7 |
| | Virola 2: | 2.43 | Virola 2: | 7 |
| | Virola 3: | 3.55 | Virola 3: | 7 |
| | Virola 4: | 4.67 | Virola 4: | 7 |
| | Virola 5: | 5.78 | Virola 5: | 8 |
| | Virola 6: | 6.90 | Virola 6: | 9 |
| | Virola 7: | 8.02 | Virola 7: | 10 |
| FONDO | - | 6.35 | - | 8 |

Tabla 24. Espesores obtenidos cas práctico 2.

- Área adicional requerida para la unión techo-cuerpo: 24845 mm^2
 - Configuración adoptada: detalle g.

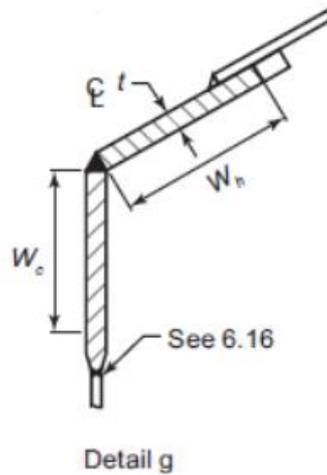


Ilustración 28. Detalle unión techo cuerpo caso práctico 2.

- No es necesaria viga intermedia de rigidización contra el viento.

4.2.2. COMPROBACIÓN MEDIANTE EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS CON EL SOFTWARE ANSYS

El proceso de comprobación se ha realizado en tres fases:

4.2.2.1. Fase 1: Modelo

Se realiza una visualización de los datos geométricos y se crea un modelo de acuerdo a ellos. El modelo creado se corresponde con la siguiente imagen:

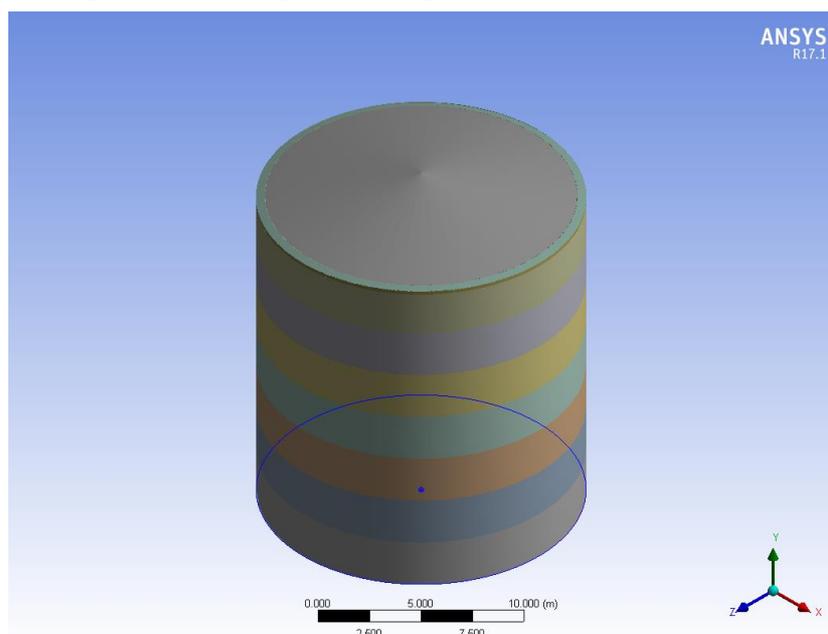


Ilustración 29. Modelo caso práctico 2.

4.2.2.2. Fase 2: Análisis elástico

Se lleva a cabo un análisis elástico del modelo anteriormente descrito mediante la aplicación del método de los elementos finitos:

Para ello, se siguen los siguientes pasos:

- Preproceso: Preparación del modelo de elementos finitos.
 - Definición de propiedades de materiales.
 - Definición de atributos y propiedades del mallado:

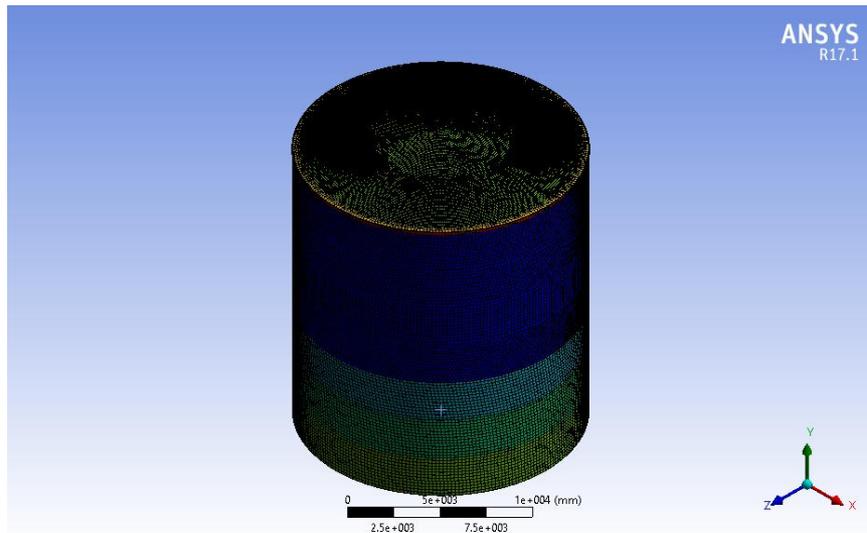


Ilustración 30. Mallado caso práctico 2.

Como se puede observar, se ha refinado la malla en las zonas más conflictivas para que los resultados sean más fiables.

- Aplicación de cargas y condiciones de contorno al modelo mallado.

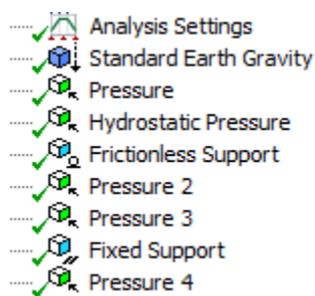


Ilustración 31. Condiciones de contorno caso práctico 2.

Dónde pressure 4 representa el peso del aislante en el techo.

- Resolución del análisis y post-procesado de resultados para el estado de carga considerado:

APLICACIÓN INFORMÁTICA PARA EL DIMENSIONAMIENTO INTEGRAL DE TANQUES MEDIANTE LA NORMA API 620.

LUIS JULIO MARTÍNEZ BARTHE

- Resultados obtenidos con los espesores de cálculo:

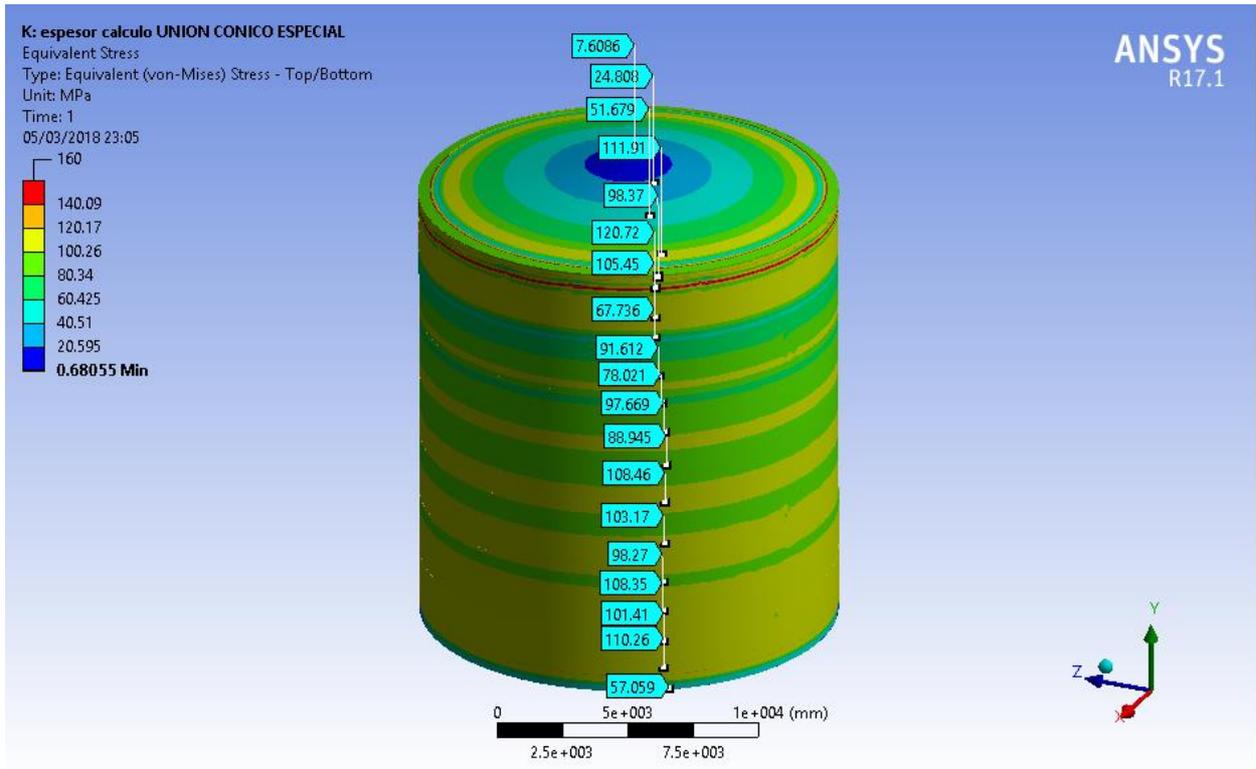


Ilustración 32. Tensiones para espesor de cálculo.

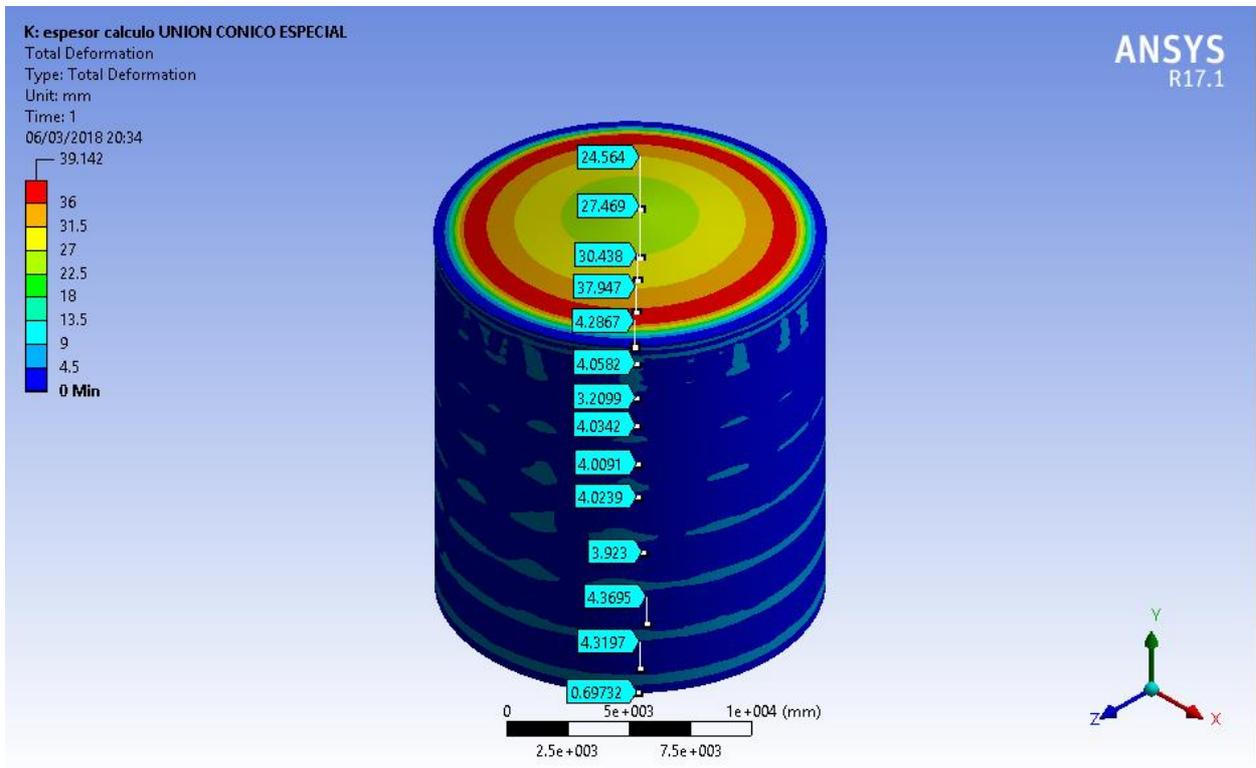


Ilustración 33. Deformaciones para espesor de cálculo.

APLICACIÓN INFORMÁTICA PARA EL DIMENSIONAMIENTO INTEGRAL DE TANQUES
 MEDIANTE LA NORMA API 620.

LUIS JULIO MARTÍNEZ BARTHE

- Resultados obtenidos con los espesores adoptados:

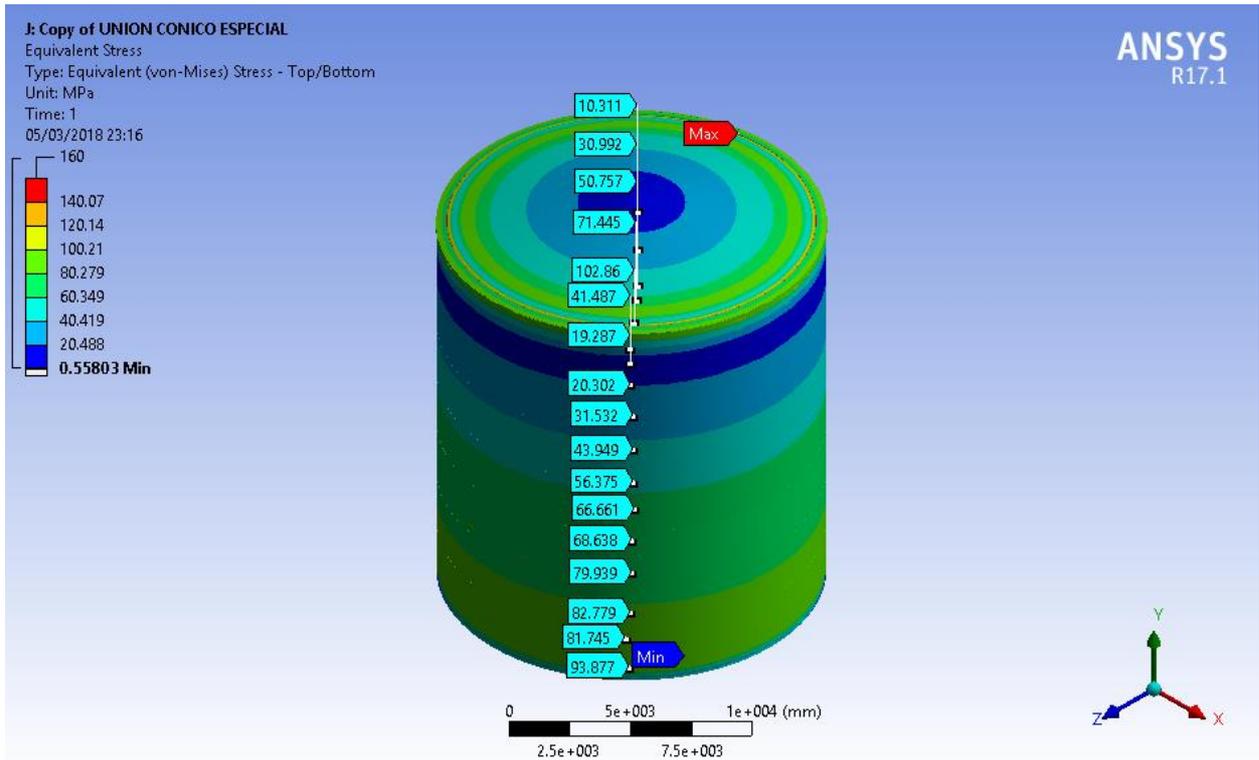


Ilustración 34. Tensiones para espesores adoptados.

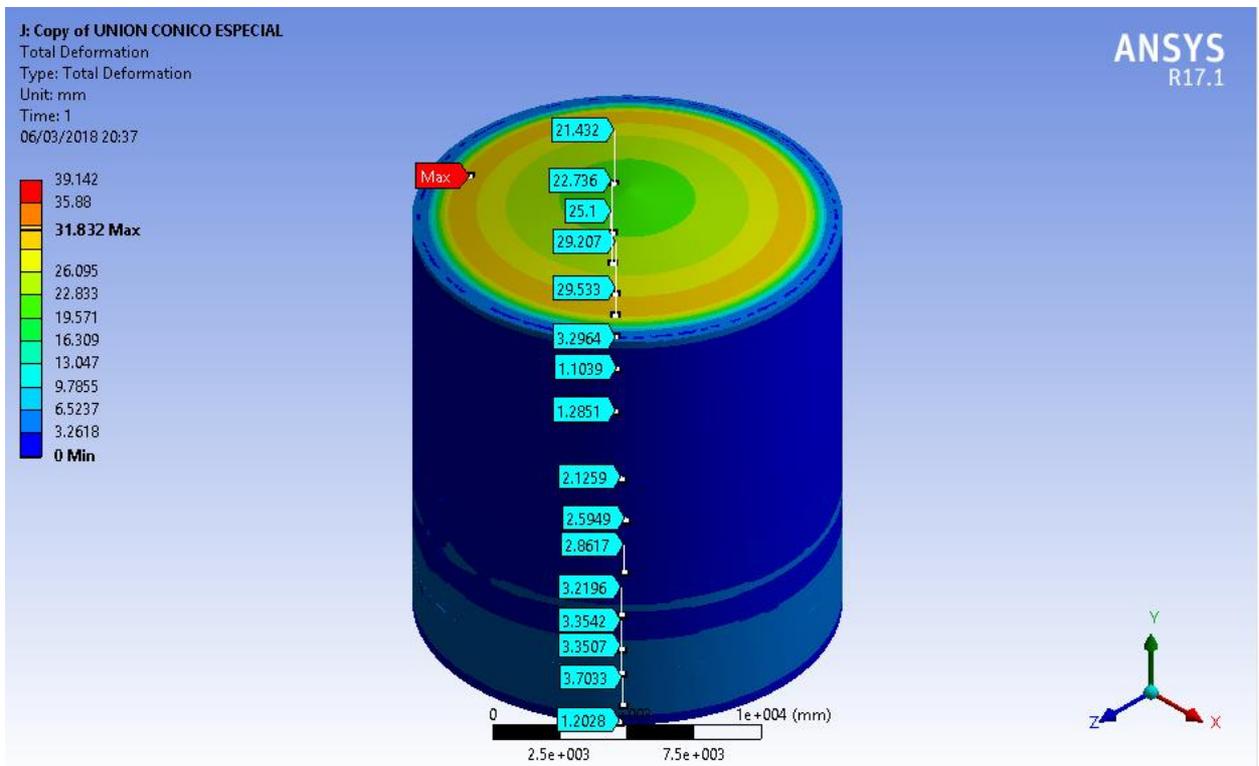


Ilustración 35. Deformaciones espesores adoptados.

4.2.3. COMPROBACIÓN MEDIANTE EL SOFTWARE TANK

Se introducen en el programa los resultados obtenidos con la aplicación informática y el programa realiza automáticamente el siguiente modelo:

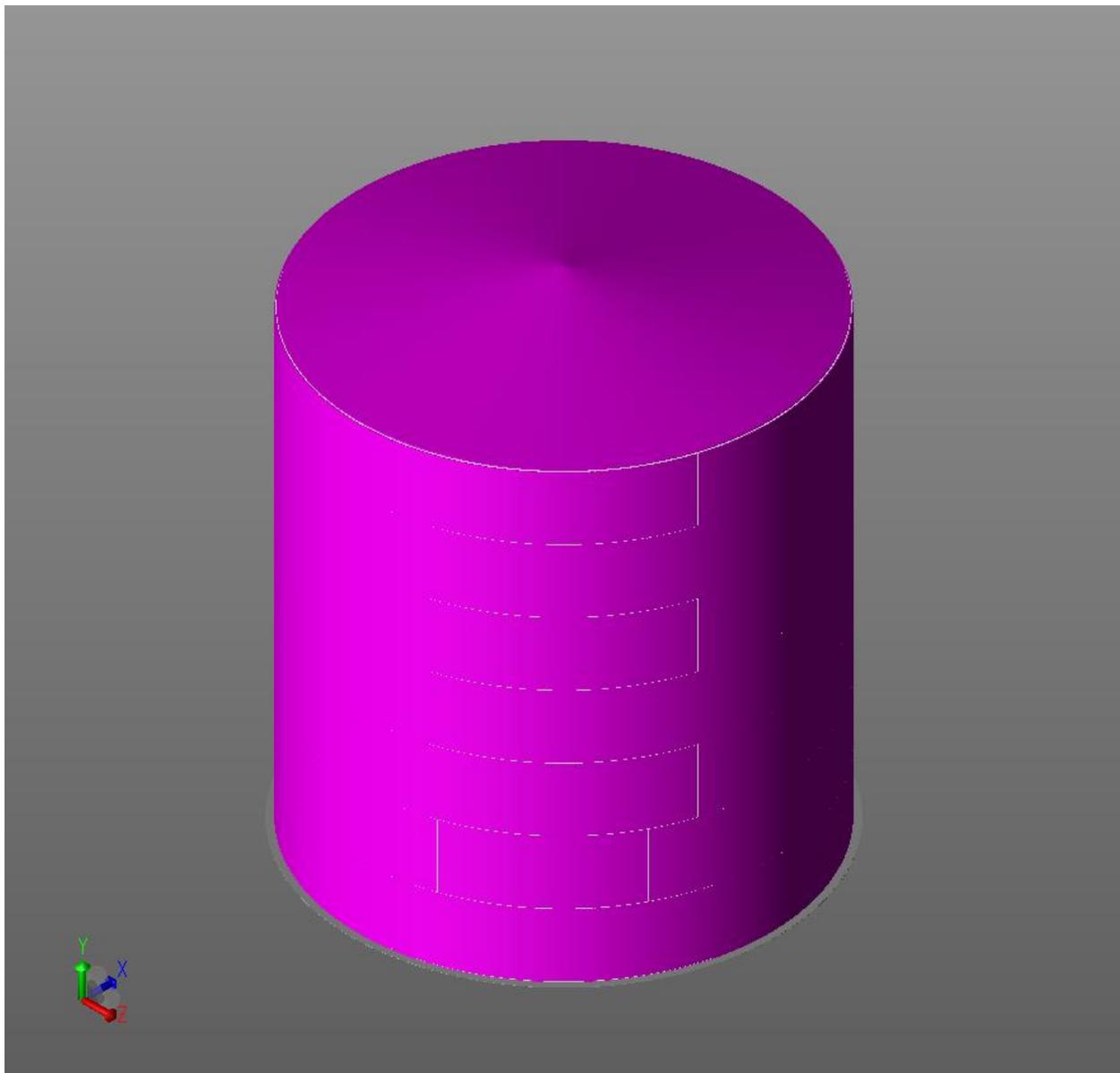


Ilustración 36. Modelo TANK caso práctico 2.

4.2.3.1. Comparación de resultados entre aplicación y TANK.

A continuación se compararán los siguientes resultados:

- Fuerzas meridionales y circunferenciales. Espesores.
- Parámetros para el cálculo del área participativa adicional en la unión techo cuerpo.

En este caso, los momentos para el cálculo de estabilidad frente al viento y sismo no han sido comparados, ya que el TANK no tiene en cuenta el aislamiento en el cálculo de todos los parámetros:

APLICACIÓN INFORMÁTICA PARA EL DIMENSIONAMIENTO INTEGRAL DE TANQUES
MEDIANTE LA NORMA API 620.

LUIS JULIO MARTÍNEZ BARTHE

- Ejemplo: momento de vuelco en el perímetro de la base del cuerpo, Mrw.
 - Ecuaciones incluidas en la aplicación informática:

$$Mrw = \sqrt{[Ai(WiXi + WsXs + WrXr + WnsXns + WnrXnr)]^2 + [Ac(WcXc)]^2} \quad (8-58)$$

$$Mrw = \sqrt{[Ai(WiXi + WsXs + WrXr + WnsXns + WnrXnr)]^2 + [Ac(WcXcs)]^2} \quad (8-59)$$

- Ecuaciones incluidas en TANK:

```
Ringwall Overturning Moment per E.6.1.5-1 [Mrw]:  
= sqrt( ( Ai ( Wi * Xi + Ws * Xs  
+ Wr * Xr ) )^2  
+ ( Ac * Wc * Xc )^2 )
```

Se generará un ratio indicando la diferencia entre los resultados y en caso de que éste sea mayor a un 10%, se justificará dicha diferencia. Todos los resultados obtenidos con TANK se muestran detallados en el Anexo IV.

APLICACIÓN INFORMÁTICA PARA EL DIMENSIONAMIENTO INTEGRAL DE TANQUES MEDIANTE LA NORMA API 620.

LUIS JULIO MARTÍNEZ BARTHE

4.2.3.1.1. Comparación de fuerzas meridionales y circunferenciales. Espesores.

| | | APLICACIÓN INFORMÁTICA | | | TANK | | | RATIO | | |
|--------|----------|------------------------|----------------|---|----------------|----------------|--|-----------|-----------|----------------------------|
| | | T1 (Kgf/cm) | T2 (kgf/cm) | Espesor de cálculo incluyendo corrosión (mm) | T1 (Kgf/cm) | T2 (Kgf/cm) | Espesor de cálculo incluyendo corrosión (mm) | T1 (%) | T2 (%) | Espesor adoptado (%) |
| CUERPO | Virola 1 | 73.00 | 163.16 | 2.81 | 76.75 | 163.16 | 2.79 | 4.89 | 0.00 | 0.91 |
| | Virola 2 | 72.96 | 301.84 | 3.93 | 75.37 | 299.09 | 3.86 | 3.19 | 0.92 | 1.78 |
| | Virola 3 | 73.27 | 440.52 | 5.05 | 73.99 | 435.03 | 4.94 | 0.98 | 1.26 | 2.27 |
| | Virola 4 | 73.41 | 579.20 | 6.17 | 72.62 | 570.96 | 6.01 | 1.09 | 1.44 | 2.58 |
| | Virola 5 | 73.54 | 717.88 | 7.28 | 71.05 | 706.90 | 7.09 | 3.51 | 1.55 | 2.80 |
| | Virola 6 | 73.68 | 856.57 | 8.40 | 69.28 | 842.83 | 8.16 | 6.35 | 1.63 | 2.96 |
| | Virola 7 | 73.82 | 995.25 | 9.52 | 67.12 | 978.77 | 9.23 | 9.97 | 1.68 | 3.09 |
| | | | | | | | | 4.28 | 1.21 | 2.00 |

Tabla 25. Comparativa de fuerzas y espesores caso práctico 2.

Como se puede apreciar, se pueden aplicar los mismos comentarios que en el caso práctico 1.

APLICACIÓN INFORMÁTICA PARA EL DIMENSIONAMIENTO INTEGRAL DE TANQUES
MEDIANTE LA NORMA API 620.

LUIS JULIO MARTÍNEZ BARTHE

4.2.3.1.2. Comparación de parámetros en la unión techo cuerpo.

| | | APLICACIÓN INFORMÁTICA | TANK | RATIO (%) |
|--------------|------------|------------------------|------------|-----------|
| wh (mm) | 14.78 | 375.47 | 375.41 | 0.01 |
| wc (mm) | 4.95 | 125.86 | 125.73 | 0.10 |
| Aroof (mm2) | 4.94 | 3191.46 | 3187.09 | 0.14 |
| Ashell (mm2) | 1.07 | 692.21 | 690.32 | 0.27 |
| T2s (lbf/in) | 913.6 | 913.63 | 913.60 | 0.00 |
| Q (Kg) | -698452.20 | -303656.80 | -314303.49 | 3.39 |
| Ac (mm2) | 46.56 | 29481.24 | 30038.65 | 1.86 |
| | | | | 0.82 |

Tabla 26. Comparativa de parámetros unión techo cuerpo caso práctico 2.

Como se puede observar, los resultados son prácticamente idénticos.

APLICACIÓN INFORMÁTICA PARA EL DIMENSIONAMIENTO INTEGRAL DE TANQUES
MEDIANTE LA NORMA API 620.

LUIS JULIO MARTÍNEZ BARTHE

ANEXOS

ANEXO I: INFORMES

El objetivo de este anexo es mostrar el formato de informe que la aplicación informática genera una vez se han introducido todos los datos. A continuación se muestran los informes generados de los casos prácticos expuestos anteriormente.

- Caso práctico 1:

1.INTRODUCCIÓN DE DATOS

| | |
|---------|--------------------------|
| Cliente | TALLERES HUELVA SUR S.L. |
| Fecha | 09/03/2018 |

1.1 Datos Geográficos

| | |
|------------------------------------|--------|
| ¿El tanque está situado en España? | SI |
| Provincia: | Huelva |

1.2 Datos Geométricos

| | | |
|--|--------------------|----|
| Diámetro interior del tanque: | 15.00 | m |
| Altura de la pared: | 16.00 | m |
| Tipo de techo: | Domo autosoportado | |
| Radio del domo: | 15.00 | m |
| Altura del techo: | 2.01 | m |
| Nivel del fluido: | 15.00 | m |
| Nº de virolas: | 8.00 | |
| Espesor de corrosión del fondo: | 1.50 | mm |
| Espesor de corrosión del cuerpo: | 1.50 | mm |
| Espesor de corrosión del techo: | 1.50 | mm |
| Espesor mínimo inicial del fondo según API 620: | 6.00 | mm |
| Espesor mínimo inicial del cuerpo según API 620: | 5.00 | mm |
| Espesor mínimo inicial techo según API 620: | 5.00 | mm |
| Eficiencia de junta: | 1.00 | |

1.3 Datos de operación/diseño

| | | |
|--|----|--|
| ¿El tanque almacena productos que necesitan aislamiento? | NO | |
|--|----|--|

| | | |
|----------------------------|------|-------|
| Temperatura de operación: | 20 | °C |
| Temperatura de diseño: | 20 | °C |
| Presión de operación: | 450 | mbarg |
| Presión de diseño: | 500 | mbarg |
| Relación operación/diseño: | 0.90 | |
| Densidad específica: | 0.77 | |

APLICACIÓN INFORMÁTICA PARA EL DIMENSIONAMIENTO INTEGRAL DE TANQUES
MEDIANTE LA NORMA API 620.

LUIS JULIO MARTÍNEZ BARTHE

1.4 Datos Material

| | | |
|----------------------|----------|-------------------|
| Material del cuerpo: | A 516 70 | |
| Material techo | A 516 70 | |
| Material fondo | A 516 70 | |
| Densidad: | 7850.00 | kg/m ³ |

1.4.1 Propiedades cuerpo

| | | |
|--|-----|-----|
| Límite elástico Fy | 262 | Mpa |
| Tensión de rotura Fu | 483 | Mpa |
| Tensión máxima admisible de tracción Sts | 145 | Mpa |
| Tensión máxima admisible para prueba hidráulica St | 188 | Mpa |

1.4.2 Propiedades techo

| | | |
|--|-----|-----|
| Límite elástico Fy | 262 | Mpa |
| Tensión de rotura Fu | 483 | Mpa |
| Tensión máxima admisible de tracción Sts | 145 | Mpa |
| Tensión máxima admisible para prueba hidráulica St | 188 | Mpa |

1.4.3 Propiedades fondo

| | | |
|--|-----|-----|
| Límite elástico Fy | 262 | Mpa |
| Tensión de rotura Fu | 483 | Mpa |
| Tensión máxima admisible de tracción Sts | 145 | Mpa |
| Tensión máxima admisible para prueba hidráulica St | 188 | Mpa |

2. CÁLCULO DEL TECHO

| | | | | | | | | | | |
|-----------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------|-----------------|--------------------------------|--------------------------------|----------------------------------|---|--|
| Espesor mínimo: | 5.00 | mm | | | | | | | | |
| TECHO | Ángulo del domo (°) | Altura del domo (m) | Área del techo (m2) | Perímetro (m) | Material | Radio de la sección (m) | Área de la sección (m2) | Peso de cargas vivas (Kg) | Peso de plataformas, tuberías... F(Kg) | |
| DOMO | 60 | 2.01 | 189.40 | 6.31 | A 516 70 | 7.5 | 176.71 | -18245.11 | | |

| Peso de cargas muertas W (Kg) | Presión del tanque P (barg) | Fuerza meridional (lbf/in) T1 | Fuerza meridional (Kgf/cm) T1 | Fuerza circunferencial (Kgf/cm) T2 | Sts (bar) | Espesor T1 (mm) | Espesor T2 (mm) | Espesor Máximo (mm) | Espesor incluyendo corrosión (mm) | Espesor Adoptado (mm) | Peso (kg) |
|-------------------------------|-----------------------------|-------------------------------|-------------------------------|------------------------------------|-----------|-----------------|-----------------|---------------------|-----------------------------------|-----------------------|------------|
| -7434.03 | 0.5 | 2080.275696 | 371.50 | 393.29 | 1447.90 | 2.57 | 2.72 | 2.72 | 4.22 | 5.00 | 25679.1399 |

2.1 Unión techo-cuerpo

| | | |
|--|----------|-----|
| Espesor del techo, th: | 5 | mm |
| Ángulo del domo, α: | 60 | ° |
| Espesor de la última virola de la pared, tc: | 5.00 | mm |
| R2: | 15.00 | m |
| wh: | 137.48 | mm |
| wc: | 97 | mm |
| Q: | -232169 | Kgf |
| Área participativa: | 22540.66 | mm2 |
| Área participativa techo: | 481.17 | mm2 |
| Área participativa virola: | 340.24 | mm2 |
| Área adicional requerida: | 21719.25 | mm2 |

3. CALCULO DE LA ENVOLVENTE

| | | |
|-------------------------------------|------|----|
| Espesor mínimo de la primera virola | 5.00 | mm |
|-------------------------------------|------|----|

| Virola | Altura de Virola (m) | Altura de Líquido (m) | Material | Radio de la sección (m) | Área de la sección (m2) | Peso de plataforma, tuberías, tubuladuras.. F (Kg) | Peso de plataforma, tuberías, tubuladuras.. F (lb) | Peso del techo (Kg) | Peso del tanque, W (Kg) |
|--------|----------------------|-----------------------|----------|-------------------------|-------------------------|--|--|---------------------|-------------------------|
| V1 | 2.00 | 14.00 | A 516 70 | 7.50 | 176.71 | 0.00 | 0.00 | 25679.14 | 165448.60 |
| V2 | 2.00 | 12.00 | A 516 70 | 7.50 | 176.71 | 0.00 | 0.00 | 25679.14 | 441288.29 |
| V3 | 2.00 | 10.00 | A 516 70 | 7.50 | 176.71 | 0.00 | 0.00 | 25679.14 | 717127.97 |
| V4 | 2.00 | 8.00 | A 516 70 | 7.50 | 176.71 | 0.00 | 0.00 | 25679.14 | 992967.66 |
| V5 | 2.00 | 6.00 | A 516 70 | 7.50 | 176.71 | 0.00 | 0.00 | 25679.14 | 1268807.35 |
| V6 | 2.00 | 4.00 | A 516 70 | 7.50 | 176.71 | 0.00 | 0.00 | 25679.14 | 1544647.04 |
| V7 | 2.00 | 2.00 | A 516 70 | 7.50 | 176.71 | 0.00 | 0.00 | 25679.14 | 1820486.73 |
| V8 | 2.00 | 0.00 | A 516 70 | 7.50 | 176.71 | 0.00 | 0.00 | 25679.14 | 2096326.42 |
| | | | | | | 0 | 0 | | |

| Viola | Presión del tanque P (barg) | Fuerza meridional (Kgf/cm) T1 | Fuerza circunferencial (Kgf/cm) T2 | Tensión máxima admisible (bar) | Espesor T1 (mm) | Espesor T2 (mm) | Espesor Máximo (mm) | Espesor incluyendo corrosión (mm) | Espesor Adoptado (mm) | Peso (kg) |
|-------------------------------|-----------------------------|-------------------------------|------------------------------------|--------------------------------|-----------------|-----------------|---------------------|-----------------------------------|-----------------------|-----------------|
| V1 | 0.58 | 185.53 | 441.28 | 1447.90 | 1.28 | 3.05 | 3.05 | 4.55 | 5.00 | 3699.23 |
| V2 | 0.73 | 185.89 | 559.06 | 1447.90 | 1.28 | 3.86 | 3.86 | 5.36 | 6.00 | 4439.07 |
| V3 | 0.89 | 186.24 | 676.84 | 1447.90 | 1.29 | 4.67 | 4.67 | 6.17 | 7.00 | 5178.92 |
| V4 | 1.04 | 186.59 | 794.62 | 1447.90 | 1.29 | 5.49 | 5.49 | 6.99 | 7.00 | 5178.92 |
| V5 | 1.19 | 186.95 | 912.39 | 1447.90 | 1.29 | 6.30 | 6.30 | 7.80 | 8.00 | 5918.76 |
| V6 | 1.35 | 187.30 | 1030.17 | 1447.90 | 1.29 | 7.11 | 7.11 | 8.61 | 9.00 | 6658.61 |
| V7 | 1.50 | 187.65 | 1147.95 | 1447.90 | 1.30 | 7.93 | 7.93 | 9.43 | 10.00 | 7398.45 |
| V8 | 1.66 | 188.01 | 1265.73 | 1447.90 | 1.30 | 8.74 | 8.74 | 10.24 | 11.00 | 8138.30 |
| Espesor última virola: | | | | | | | | | 11 | 46610.24 |

APLICACIÓN INFORMÁTICA PARA EL DIMENSIONAMIENTO INTEGRAL DE TANQUES
MEDIANTE LA NORMA API 620.

LUIS JULIO MARTÍNEZ BARTHE

3.1. CÁLCULO DEL ANILLO RIGIDIZADOR

| | | |
|-----------------------------------|-------|----|
| Diámetro del tanque (ft) | 49.21 | ft |
| Espesor de la primera virola (in) | 0.20 | in |

| | | |
|----------------|-------|----|
| Altura H1 (ft) | 29.88 | ft |
| Altura H1 (m) | 9.11 | m |

| Virola | Wi (m) | ts (mm) | Wtr (m) |
|--------|--------|---------------|-------------|
| V1 | 2 | 5 | 2.00 |
| V2 | 2 | 6 | 1.27 |
| V3 | 2 | 7 | 0.86 |
| V4 | 2 | 7 | 0.86 |
| V5 | 2 | 8 | 0.62 |
| V6 | 2 | 9 | 0.46 |
| V7 | 2 | 10 | 0.35 |
| V8 | 2 | 11 | 0.28 |
| | | Hw (m) | 6.70 |

NO ES NECESARIA LA INSTALACIÓN DE UN ANILLO RIGIDIZADOR

| | | |
|----------------------------|------|----|
| Momento resistente mínimo: | 0.20 | m3 |
|----------------------------|------|----|

4. FONDO

| | | |
|---|----------|----|
| Espesor de corrosión: | 1.50 | mm |
| Espesor mínimo: | 7.85 | mm |
| Espesor adoptado: | 8.00 | mm |
| Espesor de soldadura mínimo entre pared y fondo : | 6.35 | mm |
| Diámetro del fondo | 15.06 | m |
| Peso fondo | 11191.84 | kg |

5.- RESUMEN DE PESOS

5.2.- Peso techo

| | | |
|-------------------------|-----------------|-----------|
| Chapa de cubierta | 25679.14 | kg |
| Peso unión techo cuerpo | | kg |
| Total | 25679.14 | kg |

5.1.- Peso del cuerpo

| | | |
|--------------|-----------------|-----------|
| Total | 46610.24 | kg |
|--------------|-----------------|-----------|

5.3.- Peso fondo

| | | |
|-------------------|-----------------|-----------|
| Peso fondo | 11191.84 | kg |
| Peso anillo fondo | 0.00 | kg |
| Total | 11191.84 | kg |

5.4.- Peso total

| | | |
|--------------|-----------------|-----------|
| Total | 83481.21 | kg |
|--------------|-----------------|-----------|

6. VIENTO

6.1 Datos

| | | |
|---|-------|------|
| Velocidad del viento: | 97.20 | km/h |
| Factor de corrección, F_c : | 0.26 | |
| Altura del cuerpo: | 16.00 | m |
| Diámetro del tanque: | 15.00 | m |
| Presión de diseño: | 50.00 | kPa |
| Altura del techo: | 2.01 | m |
| Relación entre presión de operación y de diseño, F_{pi} : | 0.90 | |
| Densidad específica del fluido: | 0.77 | |

6.2 Momentos desestabilizantes

| | | |
|---|------------|----------------|
| Presión dinámica en el techo, P_{wr} : | 0.38 | kPa |
| Presión dinámica en la pared, P_{ws} : | 0.23 | kPa |
| Área proyectada del techo sobre la que incide el viento, A_{rp} : | 176.71 | m ² |
| Área proyectada del tanque sobre la que incide el viento, A_{cp} : | 270.14 | m ² |
| Empuje vertical en techo, W_{ul} : | 6659.79 | kg |
| Empuje horizontal en tanque, W_s : | 6080.22 | kg |
| Punto de aplicación de carga horizontal: | 8.00 | m |
| Momento alrededor de la junta cuerpo-fondo, M_{ws} : | 43214.05 | kg·m |
| Momento de vuelco cuerpo-fondo debido a la presión del viento, M_w : | 98590.18 | kg·m |
| Momento alrededor de la junta cuerpo-fondo por presión interior, M_{pi} : | 6626797.00 | kg·m |

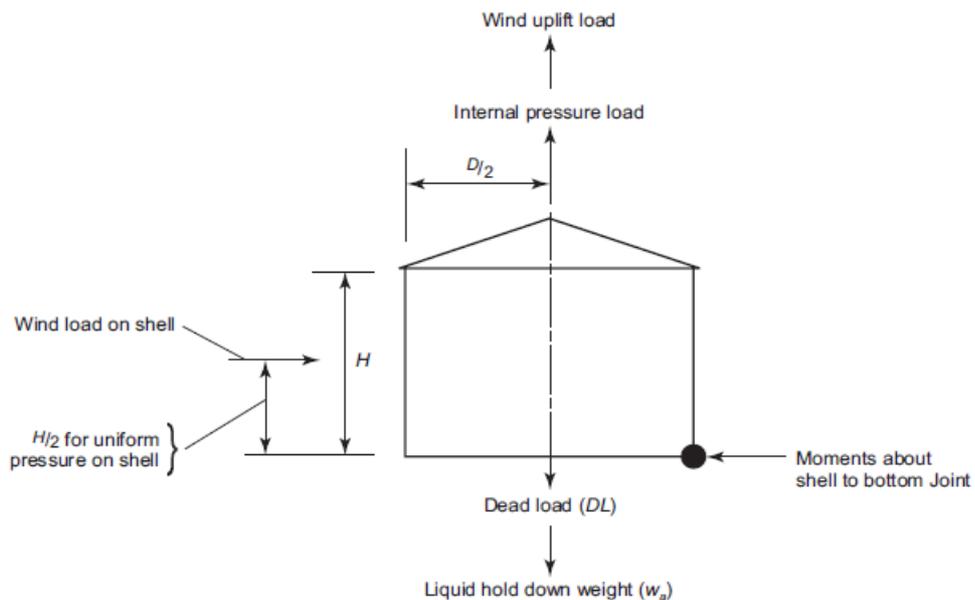


Figure 5.27—Overturning Check for Unanchored Tanks

6.3 Momentos estabilizantes

| | | |
|--|-----------|------|
| Peso del techo corroído, Wr: | 5203.82 | kg |
| Peso de la envolvente corroída, Wsr: | 37732.10 | kg |
| Peso del fluido, Wf: | 544280.93 | kg |
| Peso total del tanque corroído: | 587216.85 | kg |
| Peso resistente del fluido, Wl: | 1684.77 | Kg/m |
| Momento alrededor de junta cuerpo-fondo por peso de la envolvente corroída, Mdl: | 282990.74 | kg·m |
| Momento alrededor de junta cuerpo-fondo por peso del techo corroído, Mdlr: | 39028.68 | kg·m |
| Momento alrededor de junta cuerpo-fondo por peso del fluido, Mf: | 595445.26 | kg·m |

6.4 Comprobaciones

| | ¿Se cumple la comprobación? |
|---|-----------------------------|
| $0.6Mw + M_{pi} < M_{dl}/1.5 + M_{dlr}$ | NO |
| $Mw + F_{pi} * M_{pi} < (M_{dl} + M_f)/2 + M_{dlr}$ | NO |
| $Mw + F_{pi} * M_{pi} < M_{dl}/1.5 + M_{dlr}$ | NO |

| |
|--|
| ¿Hacen falta anclajes por vuelco debido al viento? |
| SI Hacen falta anclajes por viento |

6.5 Cálculo de anclaje para viento

| | | |
|---|-----------|----|
| Carga transmitida por el viento, U: | 2319874 | N |
| Momento transmitido por el viento, Mwh: | 432140.54 | Nm |
| nº de pernos, N: | 18.00 | |
| Carga por cada perno, tb: | 128881.90 | N |

6.5.1 Datos del perno

| | | |
|--|----------|-----------------|
| Material: | A193 B7 | |
| Tensión máxima admisible del tornillo: | 402 | Mpa |
| Área resistente necesaria: | 320 | mm ² |
| Perno necesario: | M 24 x 3 | |

7.- CÁLCULO DEL SISMO

7.1.-Datos generales tanque

| | | |
|-------------------------------------|--------|-----|
| Diámetro del tanque: | 15.00 | m |
| Altura del tanque: | 16.00 | m |
| Relación diámetro/altura: | 0.94 | |
| Gravedad específica del líquido: | 0.77 | |
| Límite elástico del material usado: | 262.00 | Mpa |
| Espesor de la primera virola: | 11.00 | m |

7.2.-Resumen de pesos

| | | |
|--------------|-----------------|-----------|
| Cuerpo | 46610.24 | kg |
| Techo | 10170.80 | kg |
| Fondo | 11191.84 | kg |
| Total | 67972.87 | Kg |

7.3.-Datos sísmicos de la zona

| | | |
|--|--------|----|
| Aceleración de cálculo de la zona, Sp: | 0.10 | %g |
| Parámetro de respuesta con un amortiguamiento del 5% para un periodo de 0.2 s, Ss: | 0.2500 | %g |
| Parámetro de respuesta con un amortiguamiento del 5% para un periodo de 1 s, S1: | 0.1250 | %g |
| Parámetro de respuesta con un amortiguamiento del 5% para un periodo de 0 s, S0: | 0.0400 | %g |

| | | |
|--|--------|----|
| Clasificación de la zona: | D | |
| Coefficiente de amplificación del terreno para un período de 0.2 segundos , Fa: | 1.6000 | |
| Coefficiente de amplificación del terreno para un período de 1 segundo , Fv: | 2.2500 | |
| Factor de modificación de respuesta para modo impulsivo, Rwi: | 4.0000 | |
| Factor de modificación de respuesta para modo convectivo, Rwc: | 2.0000 | |
| SUG: | II | |
| Factor de importancia, I: | 1.2500 | |
| Período local , TL: | 4.0000 | s |
| Factor de escala para espectro de aceleración, Q: | 1.0000 | |
| Parámetro de aceleración de respuesta espectral en períodos cortos (0.2s) , Sds; | 0.4000 | %g |
| Coefficiente de ajuste del espectro de aceleración amortiguada al 5% , Ks: | 0.5782 | |
| Período natural para comportamiento convectivo, Tc: | 4.0310 | s |
| Aceleración espectral impulsiva, Ai: | 0.1250 | %g |
| Cociente entre periodo de vibracion de 1s y 0.2s , Ts: | 0.7031 | s |
| Coefficiente de ajuste del espectro de aceleración para un amortiguamiento del 0.5% (impulsivo)-5% (convectivo) , K: | 1.5000 | |
| Aceleración espectral convectiva, Ac: | 0.0260 | %g |
| Parámetro de aceleración vertical de sismo, Av: | 0.1880 | %g |
| Módulo de aceleración espectral, A: | 0.1277 | %g |

APLICACIÓN INFORMÁTICA PARA EL DIMENSIONAMIENTO INTEGRAL DE TANQUES
 MEDIANTE LA NORMA API 620.

LUIS JULIO MARTÍNEZ BARTHE

7.4.- Cálculo de Pesos

| | | |
|---|--------------------|---|
| Peso del contenido del tanque, W_p : | 20022734.6 | N |
| Peso del techo, W_r : | 99775.5 | N |
| Peso total de las virolas del tanque y cualquier accesorio, W_s : | 457246.4 | N |
| Peso del Fondo, W_f : | 109791.9 | N |
| Peso total, W_{eff} . | 20689548.50 | N |

7.5.-Cálculo del punto de aplicación del momento de vuelco actuante en en la losa

| | | |
|---|---------|---|
| Altura desde el fondo al centro de acción de fuerzas laterales (impulsivo en losa), X_{is} : | 8.4000 | m |
| Altura desde el fondo al centro de acción de fuerzas laterales (convectivo en losa), X_{cs} : | 11.3111 | m |

7.6.-Cálculos de otros puntos de aplicación

| | | |
|---|---------|---|
| Altura del fondo del tanque hasta el centro de gravedad del cuerpo, X_s : | 6.8800 | m |
| Altura desde el fondo al centro de gravedad de la cubierta, X_r : | 17.0048 | m |

7.7 Cálculo de puntos de aplicación

| | | |
|--|---------------|---|
| Peso eficaz impulsivo del líquido, W_i : | 15657778.4655 | N |
| Peso eficaz convectivo del líquido, W_c : | 4599254.7855 | N |
| Altura desde el fondo al centro de acción de fuerzas laterales (impulsivo en anillo) , X_i : | 6.0900 | m |
| Altura desde el fondo al centro de acción de fuerzas laterales (convectivo en anillo), X_c : | 11.1159 | m |

7.8.- Efecto sísmico lateral y vertical

| | | |
|--|-------------|---|
| Fuerza sísmica lateral de diseño, F : | 2641389.63 | N |
| Fuerza sísmica vertical de diseño, $F_v (+)$: | 3889635.12 | N |
| Fuerza sísmica vertical de diseño, $F_v (-)$: | -3889635.12 | N |

7.9.- Cargas dinámicas circunferenciales debidas al líquido

| | | |
|--|---------------|------|
| Punto de aplicación impulsivo , Y_i : | 8.91 | m |
| Punto de aplicación convectivo, Y_c : | 3.88 | m |
| Fuerza dinámica circunferencial en la pared del tanque debido al modo impulsivo, calculada en el centro de acción de fuerzas laterales, N_i : | 54.08 | N/mm |
| Fuerza dinámica circunferencial en la pared del tanque debido al modo convectivo, calculada en el centro de acción de fuerzas laterales, N_c : | 3.22 | N/mm |
| Fuerza hidrostática circunferencial debido a presión del producto, N_h : | 831.95 | N/mm |
| $\sigma_t (+)$: | 83.15 | Mpa |
| $\sigma_t (-)$: | 68.11 | Mpa |
| Esfuerzo tangencial máximo sobre las virolas que componen el cuerpo del tanque debido al movimiento del líquido: | 83.15 | Mpa |
| Límite elástico del material: | 262.00 | Mpa |
| ¿El cuerpo aguanta el máximo esfuerzo tangencial? | SI | Mpa |

APLICACIÓN INFORMÁTICA PARA EL DIMENSIONAMIENTO INTEGRAL DE TANQUES
MEDIANTE LA NORMA API 620.

LUIS JULIO MARTÍNEZ BARTHE

7.10.- Cálculo del momento de vuelco

| | | |
|---|-------------------|-------|
| Momento de vuelco en el perímetro de la base del cuerpo, Mrw: | 12594937.1 | 1 N·m |
| Momento de vuelco en la base de la losa, Ms: | 17099409.6 | 5 N·m |

7.11.- Cortantes

| | | |
|---|-------------------|---|
| Cortante de diseño en la base debido a la componente impulsiva, Vi: | 2040574.04 | N |
| Cortante de diseño en la base debido a la componente convectiva, Vc: | 119410.08 | N |
| Resistencia al deslizamiento, Mu=0,4, situación más desfavorable, Vs: | 7653477.78 | N |
| Cortante total en la base del depósito, V: | 2044064.87 | N |

7.13.- Resistencia a las cargas de diseño

| | | |
|---|-----------------|-----|
| Gravedad específica incluyendo el efecto sísmico vertical, Ge: | 0.71 | |
| Espesor de fondo excluyendo corrosión, ta: | 6.50 | mm |
| Fuerza resistente de los contenidos por unidad de longitud circunferencial, wa. | 34368.60 | N/m |
| Carga de diseño del producto por unidad de longitud circunferencial. Para esta comprobación consideraremos el tanque vacío para estar del lado de la seguridad, wint: | 0.00 | N/m |
| Carga del techo, incluidas cargas vivas, Wrs: | 99673.83 | N |
| Peso del tanque y cubierta actuando en la base del cuerpo por unidad de longitud circunferencial, wt: | 11818.22 | N/m |
| Ratio de anclaje, J: | 1.24 | |
| Tensión de compresión longitudinal en el cuerpo, Sigmac: | 12.72 | Mpa |
| Tensión sísmica de compresión longitudinal admisible, Fc | 46.52 | MPa |

7.14 Anillo anti desborde

| | | |
|----------------------------|-------------|----|
| aceleración espectral, Af: | 0.04 | %g |
| Altura: | 0.26 | m |

¿El depósito está provisto de una contención secundaria para controlar el derrame del producto?

NO

¿El techo y las virolas están diseñados para contener el producto en caso de sismo?

SI

No es necesaria la instalación de un anillo anti desborde

Comprobaciones

| | ¿Se cumple la comprobación? |
|-------------------------------------|------------------------------------|
| $J \leq 1,54$ | SI |
| $F_c > \text{Sigc}$ | SI |
| $t_a < t_{\text{virola_inferior}}$ | SI |
| $V < V_s$ | SI |

APLICACIÓN INFORMÁTICA PARA EL DIMENSIONAMIENTO INTEGRAL DE TANQUES
 MEDIANTE LA NORMA API 620.

LUIS JULIO MARTÍNEZ BARTHE

8.- CÁLCULO VENTEO SEGÚN API 2000

8.1 Datos tanque

| | | |
|--|-------|--------|
| Diámetro del tanque: | 15.00 | m |
| Altura del tanque: | 16.00 | m |
| Tª de diseño: | 20.00 | °C |
| Latitud: | 38.00 | |
| Espesor aislamiento: | 0.00 | mm |
| Conductividad térmica del aislamiento: | 0.000 | W/K*m |
| Coefficiente de película: | 0.00 | W/K*m2 |

8.2 Datos Fluido

| | | |
|--|---------|------|
| ¿Líquido volátil? | SI | |
| Calor latente vaporización, L: | 2257000 | J/kg |
| Temperatura de ebullición, t: | 456.00 | K |
| Presión de vapor del fluido a la Tª de diseño: | 0.01 | Bar |
| ¿Presión de vapor menor o igual a la del hexano a la misma Tª? | SI | |

8.3 Capacidad de flujo requerida debido al llenado y la descarga

8.0.1.1 Exhalación requerida debido al llenado

| | | |
|---|--------|-------|
| Caudal de llenado del tanque, V _{pf} : | 250.00 | m3/h |
| Caudal de salida de aire, V _{op} : | 500.00 | Nm3/h |

8.1.2 Inhalación requerida debido a la descarga

| | | |
|--|--------|-------|
| Caudal de descarga del tanque, V _{ip} : | 250.00 | m3/h |
| Caudal de entrada de aire, V _{op} : | 250.00 | Nm3/h |

8.2 Capacidad de flujo requerida debido a la inhalación y exhalación térmica

8.2.1-Exhalación térmica

| | | |
|---|---------|-------|
| Factor Y: | 0.32 | |
| Volumen del tanque, V _{tk} : | 2827.43 | m3 |
| Factor de reducción debido al aislamiento, R _i : | 1.00 | |
| Caudal de salida de aire, V _{ot} : | 408.70 | Nm3/h |

8.2.2- Inhalación térmica

| | | |
|---|---------|-------|
| Factor C: | 4.00 | |
| Volumen del tanque, V _{tk} : | 2827.43 | m3 |
| Factor de reducción debido al aislamiento, R _i : | 1.00 | |
| Caudal de entrada de aire, V _{it} : | 1042.40 | Nm3/h |

APLICACIÓN INFORMÁTICA PARA EL DIMENSIONAMIENTO INTEGRAL DE TANQUES
 MEDIANTE LA NORMA API 620.

LUIS JULIO MARTÍNEZ BARTHE

8.3. Capacidad de flujo requerida para exposición al fuego externo (venteo de emergencia)

| | | |
|--|------------|--------------------|
| Area de mojado, Atws: | 430.71 | m ² |
| Factor Q: | 6244783.05 | W |
| Factor F: | 1.00 | |
| Calor latente de vaporización, L: | 2257000.00 | J/kg |
| Temperatura de ebullición del líquido almacenado, T: | 456.00 | k |
| Masa molecular del vapor, M: | 16.00 | g/mol |
| Caudal de aire expulsado, q: | 13391.34 | Nm ³ /h |

8.5.- Máximos requerimientos para cada caso

| | | |
|--|-----------------|--------------------|
| Máximo caudal de entrada de aire para requerimientos normales: | 1292.40 | Nm ³ /h |
| Máximo caudal de salida de aire para requerimientos normales: | 908.70 | Nm ³ /h |
| Máximo caudal de salida de aire para requerimientos de emergencia: | 14300.04 | Nm ³ /h |
| Caudal de diseño: | 14300.04 | Nm ³ /h |

APLICACIÓN INFORMÁTICA PARA EL DIMENSIONAMIENTO INTEGRAL DE TANQUES
MEDIANTE LA NORMA API 620.

LUIS JULIO MARTÍNEZ BARTHE

9.- CARGAS CIMENTACIÓN

9.1.- Fluido

| | | |
|---------------------------------|-------------|-----|
| Peso puntual del fluido: | 20022.73461 | kN |
| Presión ejercida por el fluido: | 113.3055 | kPa |

9.2.- Carga del tanque

| | | |
|---|-------------|------|
| Peso puntual del tanque: | 818.9507146 | kN |
| Peso distribuido del tanque a lo largo de su perímetro: | 17.37867392 | kN/m |

9.3.- Viento

| | | |
|---|-------------|-----|
| Fuerza vertical: | 65.33249244 | kN |
| Fuerza horizontal: | 59.64699508 | kN |
| Momento de vuelco cuerpo-fondo debido a la presión del viento, Mw: | 967.169654 | kNm |
| Momento alrededor de la junta cuerpo-fondo por presión interior, Mpi: | 64942.61064 | kNm |

9.4.- Sismo

| | | |
|--|-------------|-----|
| Fuerza vertical: | 3889.635119 | kN |
| Fuerza cortante: | 2044.064872 | kN |
| Momento de vuelco transmitido a la losa: | 88011314.87 | kNm |

• CASO PRÁCTICO 2:

1.INTRODUCCIÓN DE DATOS

| | |
|---------|--------------------------|
| Cliente | TALLERES HUELVA SUR S.L. |
| Fecha | 07/03/2018 |

1.1 Datos Geográficos

| | |
|------------------------------------|--------|
| ¿El tanque está situado en España? | SI |
| Provincia: | Huesca |

1.2 Datos Geométricos

| | | |
|--|----------------------|----|
| Diámetro interior del tanque: | 16.00 | m |
| Altura de la pared: | 17.50 | m |
| Tipo de techo: | Cónico autosoportado | |
| Ángulo de mitad de vértice: | 80.00 | º |
| Altura del techo: | 1.41 | m |
| Nivel del fluido: | 15.00 | m |
| Nº de virolas: | 7.00 | |
| Espesor de corrosión del fondo: | 1.50 | mm |
| Espesor de corrosión del cuerpo: | 1.50 | mm |
| Espesor de corrosión del techo: | 1.50 | mm |
| Espesor mínimo inicial del fondo según API 620: | 6.00 | mm |
| Espesor mínimo inicial del cuerpo según API 620: | 7.00 | mm |
| Espesor mínimo inicial techo según API 620: | 7.00 | mm |
| Eficiencia de junta: | 1.00 | |

1.3 Datos de operación/diseño

| | | |
|--|----|--|
| ¿El tanque almacena productos que necesitan aislamiento? | SI | |
| ¿Almacena Gas licuado? | NO | |
| ¿Es un sistema de tanques doble? | NO | |

| | | |
|----------------------------|------|-------|
| Temperatura de operación: | -30 | ºC |
| Temperatura de diseño: | -35 | ºC |
| Presión de operación: | 150 | mbarg |
| Presión de diseño: | 200 | mbarg |
| Relación operación/diseño: | 0.75 | |
| Densidad específica: | 0.68 | |

APLICACIÓN INFORMÁTICA PARA EL DIMENSIONAMIENTO INTEGRAL DE TANQUES
 MEDIANTE LA NORMA API 620.

LUIS JULIO MARTÍNEZ BARTHE

1.4 Datos Material

| | | |
|----------------------|----------|-------|
| Material del cuerpo: | A 573 65 | |
| Material techo | A 573 65 | |
| Material fondo | A 573 65 | |
| Densidad: | 7850.00 | kg/m3 |

1.4.1 Propiedades cuerpo

| | | |
|--|-----|-----|
| Límite elástico Fy | 241 | Mpa |
| Tensión de rotura Fu | 448 | Mpa |
| Tensión máxima admisible de tracción Sts | 124 | Mpa |
| Tensión máxima admisible para prueba hidráulica St | 161 | Mpa |

1.4.2 Propiedades techo

| | | |
|--|-----|-----|
| Límite elástico Fy | 241 | Mpa |
| Tensión de rotura Fu | 448 | Mpa |
| Tensión máxima admisible de tracción Sts | 124 | Mpa |
| Tensión máxima admisible para prueba hidráulica St | 161 | Mpa |

1.4.3 Propiedades fondo

| | | |
|--|-----|-----|
| Límite elástico Fy | 241 | Mpa |
| Tensión de rotura Fu | 448 | Mpa |
| Tensión máxima admisible de tracción Sts | 124 | Mpa |
| Tensión máxima admisible para prueba hidráulica St | 161 | Mpa |

1.5 Datos del aislante

| | | |
|-----------------------------------|--------|-------|
| Densidad del aislante | 136.00 | kg/m3 |
| Espesor del aislante en el cuerpo | 50.00 | mm |
| Espesor del aislante en el fondo | 50.00 | mm |
| Espesor del aislante en el techo | 50.00 | mm |

2. CÁLCULO DEL TECHO

| Espesor mínimo: | 7.00 | | | | | | | | |
|-----------------|---------------------|---------------------|----------------------------------|----------------|----------|----------------------------|--------------------------------------|-----------------------------|---------------------------------------|
| TECHO | Ángulo del cono (°) | Altura del cono (m) | Área del techo (m ²) | Generatriz (m) | Material | Radio de la sección R3 (m) | Área de la sección (m ²) | Peso de cargas vivas F (Kg) | Peso de plataformas, tuberías... (Kg) |
| CÓNICO | 80.00 | 1.41 | 204.16 | 8.123413 | A 573 65 | 8 | 201.0619298 | -19667.08288 | |

| Peso de cargas muertas, W (Kg) | Presión del tanque P (barg) | Fuerza meridional (Kgf/cm) T1 | Fuerza circunferencial (Kgf/cm) T2 | Tensión máxima admisible Sts (bar) | Espesor T1 (mm) | Espesor T2 (mm) | Espesor Máximo (mm) | Espesor incluyendo corrosión (mm) | Espesor Adoptado (mm) | Peso (kg) |
|--------------------------------|-----------------------------|-------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|-----------------|-----------------|---------------------|-----------------------------------|-----------------------|------------|
| -12607.10441 | 0.2 | 432.8111755 | 939.5737862 | 1241.06 | 3.49 | 7.57 | 7.57 | 9.07 | 10 | 37082.2409 |

2.2 Unión techo-cuerpo

| | | |
|--|----------|-----------------|
| Espesor techo, th: | 10 | mm |
| Ángulo techo cónico, α: | 80.0 | ° |
| Espesor de la última virola de la pared, tc: | 7.00 | mm |
| R2: | 46.07 | m |
| wh: | 375.47 | mm |
| wc: | 126 | mm |
| Fuerza circunferencial total, Q: | -303657 | Kgf |
| Ac: | 29481.24 | mm ² |
| Proyección horizontal Wh: | 369.76 | mm |
| Área participativa techo: | 3191.46 | mm ² |
| Área participativa pared: | 692.21 | mm ² |
| Área adicional requerida: | 25597.57 | mm ² |

3. CALCULO DE LA ENVOLVENTE

| | | |
|-----------------|------|----|
| Espesor mínimo: | 7.00 | mm |
|-----------------|------|----|

| Virola | Altura de Virola (m) | Altura de Líquido (m) | Material | Radio de la sección (m) | Área de la sección (m ²) | Peso de plataforma, tuberías, tubuladuras.. F (Kg) | Peso del techo (Kg) | Peso del tanque, W (Kg) |
|--------|----------------------|-----------------------|----------|-------------------------|--------------------------------------|--|---------------------|-------------------------|
| V1 | 2.50 | 15.00 | A 573 65 | 8 | 201.06 | 0 | 37082.2 | 43132.9 |
| V2 | 2.50 | 12.50 | A 573 65 | 8 | 201.06 | 0 | 37082.2 | 391843.4 |
| V3 | 2.50 | 10.00 | A 573 65 | 8 | 201.06 | 0 | 37082.2 | 738844.9 |
| V4 | 2.50 | 7.50 | A 573 65 | 8 | 201.06 | 0 | 37082.2 | 1086700.9 |
| V5 | 2.50 | 5.00 | A 573 65 | 8 | 201.06 | 0 | 37082.2 | 1434556.9 |
| V6 | 2.50 | 2.50 | A 573 65 | 8 | 201.06 | 0 | 37082.2 | 1782412.9 |
| V7 | 2.50 | 0.00 | A 573 65 | 8 | 201.06 | 0 | 37082.2 | 2130268.9 |
| | | | | | | 0 | | |

| Virola | Presión del tanque P (barg) | Fuerza meridional (Kgf/cm) T1 | Fuerza circunferencial (Kgf/cm) T2 | Tensión máxima admisible (bar) | Espesor T1 (mm) | Espesor T2 (mm) | Espesor Máximo (mm) | Espesor incluyendo corrosión (mm) | Espesor Adoptado (mm) | Peso (kg) |
|--------|-----------------------------|-------------------------------|------------------------------------|--------------------------------|-----------------|-----------------|---------------------|-----------------------------------|-----------------------|-----------|
| V1 | 0.2 | 73.00 | 163.16 | 1241.06 | 0.59 | 1.31 | 1.31 | 2.81 | 7 | 6922.22 |
| V2 | 0.37 | 72.96 | 301.84 | 1241.06 | 0.59 | 2.43 | 2.43 | 3.93 | 7 | 6922.22 |
| V3 | 0.54 | 73.27 | 440.52 | 1241.06 | 0.59 | 3.55 | 3.55 | 5.05 | 7 | 6922.22 |
| V4 | 0.71 | 73.41 | 579.20 | 1241.06 | 0.59 | 4.67 | 4.67 | 6.17 | 7 | 6922.22 |
| V5 | 0.88 | 73.54 | 717.88 | 1241.06 | 0.59 | 5.78 | 5.78 | 7.28 | 8 | 7908.68 |
| V6 | 1.05 | 73.68 | 856.57 | 1241.06 | 0.59 | 6.90 | 6.90 | 8.40 | 9 | 8895.14 |
| V7 | 1.22 | 73.82 | 995.25 | 1241.06 | 0.59 | 8.02 | 8.02 | 9.52 | 10 | 9881.60 |

APLICACIÓN INFORMÁTICA PARA EL DIMENSIONAMIENTO INTEGRAL DE TANQUES
MEDIANTE LA NORMA API 620.

LUIS JULIO MARTÍNEZ BARTHE

3.2. CÁLCULO DEL ANILLO RIGIDIZADOR

| | | |
|-----------------------------------|-------|----|
| Diámetro del tanque (ft) | 52.49 | ft |
| Espesor de la primera virola (in) | 0.28 | in |

| | | |
|----------------|-------|----|
| Altura H1 (ft) | 62.90 | ft |
| Altura H1 (m) | 19.17 | m |

| Virola | Wi (m) | ts (mm) | Wtr (m) |
|--------|--------|---------------|--------------|
| V1 | 3 | 7 | 2.50 |
| V2 | 3 | 7 | 2.50 |
| V3 | 3 | 7 | 2.50 |
| V4 | 3 | 7 | 2.50 |
| V5 | 3 | 8 | 1.79 |
| V6 | 3 | 9 | 1.33 |
| V7 | 3 | 10 | 1.02 |
| | | Hw (m) | 14.15 |

NO ES NECESARIA LA INSTALACIÓN DE UN ANILLO RIGIDIZADOR

| | | |
|----------------------------|------|----|
| Momento resistente mínimo: | 0.49 | m3 |
|----------------------------|------|----|

4. FONDO

| | | |
|---|------|----|
| Espesor de corrosión: | 1.50 | mm |
| Espesor mínimo: | 7.85 | mm |
| Espesor adoptado: | 8.00 | mm |
| Espesor de soldadura mínimo entre pared y fondo : | 6.35 | mm |

4.1 CHAPA ANULAR DE FONDO, ANEXO R

| | | |
|---|----------|-----|
| Tensión de diseño de la primera virola: | 114.21 | Mpa |
| Espesor de la chapa anular: | 7.85 | mm |
| Ancho radial de la chapa anular: | 152.77 | mm |
| Proyeccion interior mínima: | 600.00 | mm |
| Proyección exterior: | 50.00 | mm |
| Anchura total: | 660.00 | mm |
| Peso de chapa anular: | 2057.12 | kg |
| Peso total del fondo: | 10860.76 | kg |

5.- RESUMEN DE PESOS

5.2.- Peso techo

| | | |
|-------------------------|-----------------|----|
| Chapa de cubierta | 37082.24 | kg |
| Peso unión techo cuerpo | | kg |
| Total | 37082.24 | kg |

5.1.- Peso del cuerpo

| | | |
|--------------|-----------------|----|
| Total | 54374.31 | kg |
|--------------|-----------------|----|

5.3.- Peso fondo

| | | |
|-------------------|-----------------|----|
| Peso fondo | 10860.76 | kg |
| Peso anillo fondo | 2057.12 | kg |
| Total | 12917.88 | kg |

5.4.- Peso total

| | | |
|--------------|------------------|----|
| Total | 104374.42 | kg |
|--------------|------------------|----|

6. VIENTO

6.1 Datos

| | | |
|---|--------|------|
| Velocidad del viento: | 104.40 | km/h |
| Factor de corrección, Fc: | 0.30 | |
| Altura del cuerpo: | 17.50 | m |
| Diámetro del tanque: | 16.00 | m |
| Presión de diseño: | 20.00 | kPa |
| Altura del techo: | 1.41 | m |
| Relación entre presión de operación y de diseño, Fpi: | 0.75 | |
| Densidad específica del fluido: | 0.68 | |

6.2 Momentos desestabilizantes

| | | |
|---|------------|----------------|
| Presión dinámica en el techo, Pwr: | 0.43 | kPa |
| Presión dinámica en la pared, Pws: | 0.26 | kPa |
| Área proyectada del techo sobre la que incide el viento, Arp: | 201.06 | m ² |
| Área proyectada del tanque sobre la que incide el viento, Acp: | 302.57 | m ² |
| Empuje vertical en techo, Wul: | 8741.50 | kg |
| Empuje horizontal en tanque, Wls: | 7856.30 | kg |
| Punto de aplicación de carga horizontal: | 8.75 | m |
| Momento alrededor de la junta cuerpo-fondo, Mws: | 63614.82 | kg·m |
| Momento de vuelco cuerpo-fondo debido a la presión del viento, Mw: | 138674.63 | kg·m |
| Momento alrededor de la junta cuerpo-fondo por presión interior, Mpi: | 3216990.88 | kg·m |

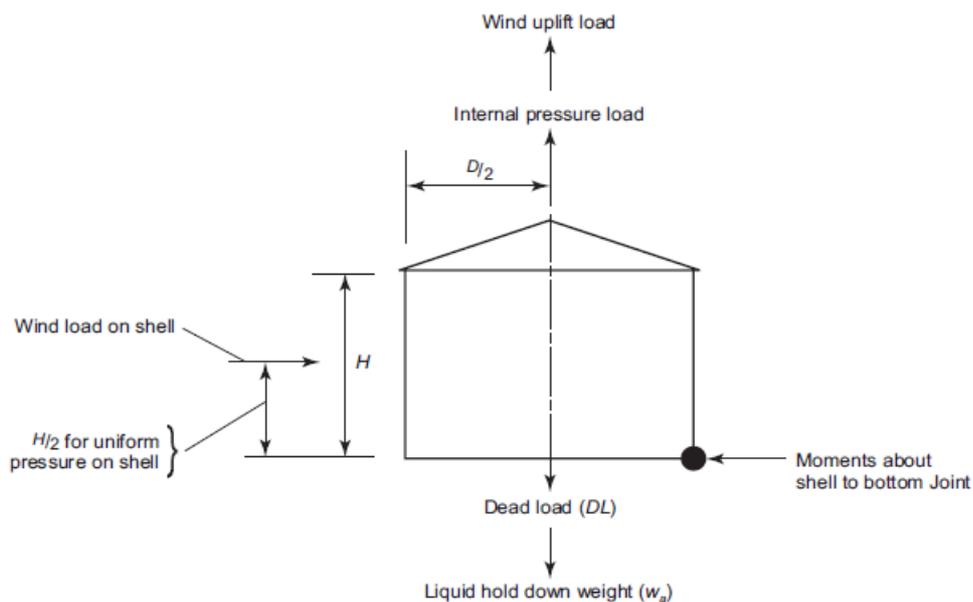


Figure 5.27—Overturning Check for Unanchored Tanks

8.3 Momentos estabilizantes

| | | |
|--|-----------|------|
| Peso del techo corroído, Wr: | 15011.13 | kg |
| Peso de la envolvente corroída, Wsr: | 49998.07 | kg |
| Peso del fluido, Wf: | 512707.92 | kg |
| Peso total del tanque corroído: | 577717.12 | kg |
| Peso resistente del fluido, Wl: | 1965.56 | Kg/m |
| Momento alrededor de junta cuerpo-fondo por peso de la envolvente corroída, Mdl: | 399984.53 | kg·m |
| Momento alrededor de junta cuerpo-fondo por peso del techo corroído, Mdlr: | 120089.05 | kg·m |
| Momento alrededor de junta cuerpo-fondo por peso del fluido, Mf: | 790398.44 | kg·m |

8.4 Comprobaciones

| | ¿Se cumple la comprobación? |
|--|-----------------------------|
| $0.6M_w + M_{pi} < M_{dl}/1.5 + M_{dlr}$ | NO |
| $M_w + F_{pi} * M_{pi} < (M_{dl} + M_f)/2 + M_{dlr}$ | SI |
| $M_w + F_{pi} * M_{pi} < M_{dl}/1.5 + M_{dlr}$ | NO |

| |
|--|
| ¿Hacen falta anclajes por vuelco debido al viento? |
| SI Hacen falta anclajes por viento |

8.5 Cálculo de anclaje para viento

| | | |
|---|-----------|----|
| Carga transmitida por el viento, U: | 2543250 | N |
| Momento transmitido por el viento, Mwh: | 636148.24 | Nm |
| nº de pernos, N: | 18.00 | |
| Carga por cada perno, tb: | 141291.66 | N |

8.5.1 Datos del perno

| | | |
|--|----------|-----------------|
| Material: | A193 B7 | |
| Tensión máxima admisible del tornillo: | 402 | Mpa |
| Área resistente necesaria: | 351 | mm ² |
| Perno necesario: | M 24 x 3 | |

7. SISMO

7.1.-Datos generales tanque

| | | |
|-------------------------------------|--------|-----|
| Diámetro del tanque: | 16.00 | m |
| Altura del tanque: | 17.50 | m |
| Relación diámetro/altura: | 0.91 | |
| Gravedad específica del líquido: | 0.68 | |
| Límite elástico del material usado: | 241.32 | Mpa |
| Espesor de la primera virola: | 10.00 | mm |

7.2.-Resumen de pesos

| | | |
|--------------|------------------|-----------|
| Cuerpo | 54374.31 | kg |
| Techo | 37082.24 | kg |
| Fondo | 12917.88 | kg |
| Total | 104374.42 | kg |

7.3.-Datos sísmicos de la zona

| | | |
|--|------|----|
| Aceleración de cálculo de la zona, Sp: | 0.04 | %g |
| Parámetro de respuesta con un amortiguamiento del 5% para un periodo de 0.2 s, Ss: | 0.10 | %g |
| Parámetro de respuesta con un amortiguamiento del 5% para un periodo de 1 s, S1: | 0.05 | %g |
| Parámetro de respuesta con un amortiguamiento del 5% para un periodo de 0 s, S0: | 0.02 | %g |

| | | |
|---|---------|----|
| Clasificación de la zona: | D | |
| Coeficiente de amplificación del terreno para un período de 0.2 segundos , Fa: | 1.60000 | |
| Coeficiente de amplificación del terreno para un período de 1 segundo , Fv: | 2.40000 | |
| Factor de modificación de respuesta para modo impulsivo, Rwi: | 2.00000 | |
| Factor de modificación de respuesta para modo convectivo, Rwc: | 1.00000 | |
| SUG: | II | |
| Factor de importancia, I: | 1.25000 | |
| Período local , TL: | 4.00000 | s |
| Factor de escala para espectro de aceleración, Q: | 1.00000 | |
| Parámetro de aceleración de respuesta espectral en períodos cortos (0.2s) , Sds; | 0.16000 | %g |
| Coeficiente de ajuste del espectro de aceleración amortiguada al 5% , Ks: | 0.57818 | |
| Período natural para comportamiento convectivo, Tc: | 4.16293 | s |
| Aceleración espectral impulsiva, Ai: | 0.04000 | %g |
| Cociente entre periodo de vibración de 1s y 0.2s , Ts: | 0.75000 | s |
| Coeficiente de ajuste del espectro de aceleración para un amortiguamiento del 0.5% (impulsivo)-5% (convectivo) , K: | 1.50000 | |
| Aceleración espectral convectiva, Ac: | 0.07790 | %g |
| Parámetro de aceleración vertical de sismo, Av: | 0.01880 | %g |
| Módulo de aceleración espectral, A: | 0.08757 | %g |

APLICACIÓN INFORMÁTICA PARA EL DIMENSIONAMIENTO INTEGRAL DE TANQUES
MEDIANTE LA NORMA API 620.

LUIS JULIO MARTÍNEZ BARTHE

7.4.- Cálculo de Pesos

| | | |
|---|--------------------|---|
| Peso del contenido del tanque, Wp: | 20118658.82 | N |
| Peso del techo, Wr: | 363776.78 | N |
| Peso total de las virolas del tanque y cualquier accesorio, Ws: | 533411.93 | N |
| Peso del Fondo, Wf: | 126724.38 | N |
| Peso del aislamiento en virola, Wns: | 58619.61 | N |
| Peso del aislamiento en techo, Wnr: | 13605.46 | N |
| Peso total (Weff) | 21088072.61 | N |

7.5.-Cálculo del punto de aplicación del momento de vuelco actuante en en la losa

| | | |
|--|-------|---|
| Altura desde el fondo al centro de acción de fuerzas laterales (impulsivo en losa) , Xis: | 8.46 | m |
| Altura desde el fondo al centro de acción de fuerzas laterales (convectivo en losa) , Xcs: | 11.17 | m |

7.6.-Calculos de otros puntos de aplicación

| | | |
|--|-------|---|
| Altura del fondo del tanque hasta el centro de gravedad del cuerpo, Xs: | 7.53 | m |
| Distancia vertical del fondo del depósito al centro de gravedad del aislamiento en el cuerpo, Xns: | 8.75 | m |
| Distancia vertical del fondo del depósito al centro de gravedad del aislamiento en el techo, Xnsr: | 18.23 | m |
| Altura desde el fondo al centro de gravedad de la cubierta, Xr: | 18.21 | m |

7.7 Cálculo de puntos de aplicación

| | | |
|---|-------------|---|
| Peso eficaz impulsivo del líquido (Wi) | 15440400.02 | N |
| Peso eficaz impulsivo del líquido (Wc) | 4925651.33 | N |
| Altura desde el fondo al centro de acción de fuerzas laterales (impulsivo en anillo) (X_i) | 6.00 | m |
| Altura desde el fondo al centro de acción de fuerzas laterales (convectivo en anillo) (X_c) | 10.91 | m |

7.8.- Efecto sísmico lateral y vertical

| | | |
|--|------------|---|
| Fuerza sísmica lateral de diseño (F) | 1846665.95 | N |
| Fuerza sísmica vertical de diseño Fv (+) | 396455.77 | N |
| Fuerza sísmica vertical de diseño Fv (-) | -396455.77 | N |

7.9.- Cargas dinámicas circunferenciales del líquido

| | | |
|--|--------|-----|
| Punto de aplicación impulsivo, Yi: | 9.00 | m |
| Punto de aplicación convectivo, Yc: | 4.09 | m |
| Fuerza dinámica circunferencial en la pared del tanque debido al modo impulsivo, calculada en el centro de acción de fuerzas laterales, Ni: | 17.04 | N/m |
| Fuerza dinámica circunferencial en la pared del tanque debido al modo convectivo, calculada en el centro de acción de fuerzas laterales, Nc: | 9.85 | m |
| Fuerza hidrostática circunferencial debido a presión del producto, Nh: | 783.69 | N/m |
| Sigma_t (+): | 80.42 | Mpa |

APLICACIÓN INFORMÁTICA PARA EL DIMENSIONAMIENTO INTEGRAL DE TANQUES
 MEDIANTE LA NORMA API 620.

LUIS JULIO MARTÍNEZ BARTHE

| | | |
|---|--------|-----|
| Sigma_t (-): | 76.31 | Mpa |
| Esfuerzo tangencial máximo sobre las virolas que componen el cuerpo del tanque debido al movimiento del líquido, Sigma_t max: | 80.42 | Mpa |
| Límite elástico del material: | 241.32 | Mpa |
| ¿El cuerpo aguanta el máximo esfuerzo tangencial?: | SI | Mpa |

7.10.- Calculo del momento de vuelco

| | | |
|---|------------|-----|
| Momento de vuelco en el perímetro de la base del cuerpo, Mrw: | 5901387.05 | N·m |
| Momento de vuelco en la base de la losa , Ms: | 7117103.41 | N·m |

7.11.- Cortantes

| | | |
|--|-------------|---|
| Cortante de diseño en la base debido a la componente impulsiva , Vi: | 661461.53 | N |
| Cortante de diseño en la base debido a la componente convectiva, Vc: | 383706.89 | N |
| Resistencia al deslizamiento, Vs: | 12114875.43 | N |
| Cortante total en la base del depósito, V: | 764697.54 | N |

7.12.- Resistencia a las cargas de diseño

| | | |
|--|-----------|-----|
| Gravedad específica incluyendo el efecto sísmico vertical, Ge: | 0.67 | |
| Espesor de anillo anular bajo cuerpo excluyendo corrosión, ta: | 6.50 | mm |
| Fuerza resistente de los contenidos por unidad de longitud circunferencial, wa. Se ha ajustado el valor de L a 0,035*D | 35410.07 | N/m |
| Carga de diseño del producto por unidad de longitud circunferencial. Para esta comprobación consideraremos el tanque vacío para estar del lado de la seguridad., wint: | 0.00 | N/m |
| Carga del techo más un 10% de carga de nieve que actúa sobre la pared, wrs: | 363405.96 | N |
| Peso del tanque y cubierta actuando en la base del cuerpo por unidad de longitud circunferencial, wt: | 374017.85 | N/m |
| Ratio de anclaje, J: | 0.06 | |
| Tensión de compresión longitudinal en el cuerpo , Sigmac: | 47.79 | Mpa |
| Tensión sísmica de compresión longitudinal admisible, Fc | 41.59 | Mpa |

SE DEBE AUMENTAR EL ESPESOR DE LA ÚLTIMA VIOLA

7.13 Anillo anti desborde

| | | |
|-----------------------------|------|----|
| Aceleración espectral, Afr: | 0.01 | %g |
| Altura: | 0.06 | m |

¿El depósito está provisto de una contención secundaria para controlar el derrame del producto?

NO

¿El techo y las virolas están diseñados para contener el producto en caso de sismo?

SI

No es obligatoria la instalación de un anillo anti desborde, pero se recomienda uno de altura: 0.04

APLICACIÓN INFORMÁTICA PARA EL DIMENSIONAMIENTO INTEGRAL DE TANQUES
MEDIANTE LA NORMA API 620.

LUIS JULIO MARTÍNEZ BARTHE

| Comprobaciones | ¿Se cumple la comprobación? |
|-------------------------------------|------------------------------------|
| $J \leq 1,54$ | SI |
| $L \leq 0,035D$ | SI |
| $F_c > \text{Sigc}$ | NO |
| $t_a < t_{\text{virola_inferior}}$ | SI |
| $V < V_s$ | SI |

8.- CÁLCULO VENTEO SEGÚN API 2000

8.1 Datos tanque

| | | |
|--|--------|--------|
| Diámetro del tanque: | 16.00 | m |
| Altura del tanque: | 17.50 | m |
| Tª de diseño: | -30.00 | °C |
| Latitud: | 38.00 | |
| Espesor aislamiento: | 50.00 | mm |
| Conductividad térmica del aislamiento: | 0.035 | W/K*m |
| Coeficiente de película: | 4.00 | W/K*m2 |

8.2 Datos Fluido

| | | |
|--|---------|------|
| ¿Líquido volátil? | NO | |
| Calor latente vaporización, L: | 1370758 | J/kg |
| Temperatura de ebullición, t: | 251.00 | K |
| Presión de vapor del fluido a la Tª de diseño: | 8.57 | Bar |
| ¿Presión de vapor menor o igual a la del hexano a la misma Tª? | NO | |

8.3 Capacidad de flujo requerida debido al llenado y la descarga

8.3.1 Exhalación requerida debido al llenado

| | | |
|---|--------|-------|
| Caudal de llenado del tanque, V _{pf} : | 250.00 | m3/h |
| Caudal de salida de aire, V _{op} : | 250.00 | Nm3/h |

8.3.2 Inhalación requerida debido a la descarga

| | | |
|--|--------|-------|
| Caudal de descarga del tanque, V _{ip} : | 250.00 | m3/h |
| Caudal de entrada de aire, V _{op} : | 250.00 | Nm3/h |

8.4 Capacidad de flujo requerida debido a la inhalación y exhalación térmica

8.4.1-Exhalación térmica

| | | |
|---|---------|-------|
| Factor Y: | 0.32 | |
| Volumen del tanque, V _{tk} : | 3518.58 | m3 |
| Factor de reducción debido al aislamiento, R _i : | 0.15 | |
| Caudal de salida de aire, V _{ot} : | 74.11 | Nm3/h |

8.4.2- Inhalación térmica

| | | |
|---|---------|-------|
| Factor C: | 6.50 | |
| Volumen del tanque, V _{tk} : | 3518.58 | m3 |
| Factor de reducción debido al aislamiento, R _i : | 0.15 | |
| Caudal de entrada de aire, V _{it} : | 294.02 | Nm3/h |

APLICACIÓN INFORMÁTICA PARA EL DIMENSIONAMIENTO INTEGRAL DE TANQUES
 MEDIANTE LA NORMA API 620.

LUIS JULIO MARTÍNEZ BARTHE

8.5. Capacidad de flujo requerida para exposición al fuego externo (venteo de emergencia)

| | | |
|--|------------|--------------------|
| Area de mojado, Atws: | 459.43 | m ² |
| Factor Q: | 6584168.08 | W |
| Factor F: | 1.00 | |
| Calor latente de vaporización, L: | 1370758.31 | J/kg |
| Temperatura de ebullición del líquido almacenado, T: | 251.00 | k |
| Masa molecular del vapor, M: | 16.00 | g/mol |
| Caudal de aire expulsado, q: | 17247.76 | Nm ³ /h |

8.6.- Máximos requerimientos para cada caso

| | | |
|--|-----------------|--------------------|
| Máximo caudal de entrada de aire para requerimientos normales: | 544.02 | Nm ³ /h |
| Máximo caudal de salida de aire para requerimientos normales: | 324.11 | Nm ³ /h |
| Máximo caudal de salida de aire para requerimientos de emergencia: | 17571.87 | Nm ³ /h |
| Caudal de diseño: | 17571.87 | Nm ³ /h |

APLICACIÓN INFORMÁTICA PARA EL DIMENSIONAMIENTO INTEGRAL DE TANQUES
MEDIANTE LA NORMA API 620.

LUIS JULIO MARTÍNEZ BARTHE

9.- CARGAS CIMENTACIÓN

9.1.- Fluido

| | | |
|---------------------------------|-------------|-----|
| Peso puntual del fluido: | 20118.65882 | kN |
| Presión ejercida por el fluido: | 100.062 | kPa |

9.2.- Carga del tanque

| | | |
|---|-------------|------|
| Peso puntual del tanque: | 1023.913094 | kN |
| Peso distribuido del tanque a lo largo de su perímetro: | 20.37010377 | kN/m |

9.3.- Viento

| | | |
|---|-------------|-----|
| Fuerza vertical: | 85.75414902 | kN |
| Fuerza horizontal: | 77.07027508 | kN |
| Momento de vuelco cuerpo-fondo debido a la presión del viento, Mw: | 1360.398099 | kNm |
| Momento alrededor de la junta cuerpo-fondo por presión interior, Mpi: | 31526.5106 | kNm |

9.4.- Sismo

| | | |
|--|-------------|-----|
| Fuerza vertical: | 396455.7651 | kN |
| Fuerza cortante: | 764697.5409 | kN |
| Momento de vuelco transmitido a la losa: | 17336.44734 | kNm |

ANEXO II: CÓDIGO MACROS

- **Macro techo:**

```
Sub ocultarfilas()  
  Sheets("DATOS").Select  
  Range("B17").Select  
  If ActiveCell.Value = "Cónico autosoportado" Then  
    Sheets("TECHO").Select  
    Rows("4:69").Hidden = False  
    Rows(14).EntireRow.Hidden = True  
    Rows(15).EntireRow.Hidden = True  
    Rows(16).EntireRow.Hidden = True  
    Rows(18).EntireRow.Hidden = True  
    Rows(19).EntireRow.Hidden = True  
    Rows(21).EntireRow.Hidden = True  
    Rows(23).EntireRow.Hidden = True  
    Rows(24).EntireRow.Hidden = True  
    Rows(25).EntireRow.Hidden = True  
    Rows(26).EntireRow.Hidden = True  
    Rows("37:69").Hidden = True  
  ElseIf ActiveCell.Value = "Domo autosoportado" Then  
    Sheets("TECHO").Select  
    Rows("4:36").Hidden = True  
    Rows("39:69").Hidden = False  
    Rows(49).EntireRow.Hidden = True  
    Rows(50).EntireRow.Hidden = True  
    Rows(51).EntireRow.Hidden = True  
    Rows(53).EntireRow.Hidden = True  
    Rows(54).EntireRow.Hidden = True  
    Rows(56).EntireRow.Hidden = True  
    Rows(58).EntireRow.Hidden = True  
    Rows(59).EntireRow.Hidden = True  
    Rows(60).EntireRow.Hidden = True  
    Rows(61).EntireRow.Hidden = True  
  End If  
  Sheets("DATOS").Select  
  Range("B17").Select  
End Sub
```

APLICACIÓN INFORMÁTICA PARA EL DIMENSIONAMIENTO INTEGRAL DE TANQUES
MEDIANTE LA NORMA API 620.

LUIS JULIO MARTÍNEZ BARTHE

• **Macro cuerpo:**

Sub insertafilas()

Sheets("CUERPO").Select

If Range("A15") <> Empty Then

Dim canrow As Integer

canrow = 0

Sheets("CUERPO").Select

Range("A14").Select

For i = 1 To 20

If ActiveCell <> Empty Then

ActiveCell.Offset(1, 0).Select

If ActiveCell <> Empty Then

canrow = canrow + 1

End If

End If

Next i

vcelda = canrow + 14

If Range("A15") <> Empty Then

Sheets("CUERPO").Select

Range("A15:AB" & vcelda).Select

Selection.Delete Shift:=xlUp

Sheets("CUERPO").Select

End If

Range("A30").Select

vcelda4 = 29 + canrow

Range("A30:D" & vcelda4).Select

Selection.Delete Shift:=xlUp

End If

Sheets("CUERPO").Select

If Range("A15") = Empty Then

ValorCelda = Worksheets("DATOS").Range("B21").Value

valorcelda2 = ValorCelda - 3

Sheets("CUERPO").Select

Range("A14").Select

For x = 1 To valorcelda2

Dim fila As Integer

APLICACIÓN INFORMÁTICA PARA EL DIMENSIONAMIENTO INTEGRAL DE TANQUES
MEDIANTE LA NORMA API 620.

LUIS JULIO MARTÍNEZ BARTHE

```
ActiveCell.Offset(1, 0).Select
fila = ActiveCell.Row
Selection.EntireRow.Insert
Rows(fila - 1).Copy
Rows(fila).PasteSpecial Paste:=xlPasteAll
Next x
Range("A14").Select
valorCelda3 = 14 + valorcelda2
Selection.AutoFill Destination:=Range("A14:A" & valorCelda3), Type:=xlFillDefault
valoraus = valorCelda3 + 15
Range("A" & valoraus).Select
For x = 1 To valorcelda2
Dim fila1 As Integer
ActiveCell.Offset(1, 0).Select
fila1 = ActiveCell.Row
Selection.EntireRow.Insert
Rows(fila1 - 1).Copy
Rows(fila1).PasteSpecial Paste:=xlPasteAll
Next x
aux2 = 11 + ValorCelda
aux3 = valoraus - 2
Range("A12:A" & aux2).Select
Selection.Copy
Range("A" & aux3).Select
ActiveSheet.Paste
Range("Z12:Z" & ValorCelda + 11).Select
u = Application.WorksheetFunction.Sum(Selection)
Range("Z" & ValorCelda + 12) = u
Range("Y" & 11 + ValorCelda).Copy
Range("Y" & 12 + ValorCelda).PasteSpecial xlPasteValues
x = ValorCelda + 23
y = x + ValorCelda
Range("D" & x & ":D" & y).Select
u3 = Application.WorksheetFunction.Sum(Selection)
Range("D" & ValorCelda * 2 + 24) = u3

Sheets("datos").Select
Range("B80").Select
```

End If

End Sub

APLICACIÓN INFORMÁTICA PARA EL DIMENSIONAMIENTO INTEGRAL DE TANQUES
MEDIANTE LA NORMA API 620.

LUIS JULIO MARTÍNEZ BARTHE

- **Macro fondo:**

```
Sub ocultarfilasFONDO()
```

```
Sheets("DATOS").Select
```

```
Range("B32").Select
```

```
If ActiveCell.Value = "NO" Then
```

```
    Sheets("FONDO").Select
```

```
    Rows("1:9").Hidden = False
```

```
    Rows("10:32").Hidden = True
```

```
ElseIf ActiveCell.Value = "SI" Then
```

```
    Sheets("DATOS").Select
```

```
    Range("B33").Select
```

```
    If ActiveCell.Value = "NO" Then
```

```
        Sheets("FONDO").Select
```

```
        Rows("1:10").Hidden = False
```

```
        Rows("10:21").Hidden = True
```

```
        Rows("21:32").Hidden = False
```

```
    ElseIf ActiveCell.Value = "SI" Then
```

```
        Sheets("FONDO").Select
```

```
        Rows("1:10").Hidden = False
```

```
        Rows("10:21").Hidden = False
```

```
        Rows("21:32").Hidden = True
```

```
    End If
```

```
End If
```

```
Sheets("DATOS").Select
```

```
Range("B80").Select
```

```
End Sub
```

APLICACIÓN INFORMÁTICA PARA EL DIMENSIONAMIENTO INTEGRAL DE TANQUES
MEDIANTE LA NORMA API 620.

LUIS JULIO MARTÍNEZ BARTHE

- **Macro sismo:**

```
Sub ocultarCOLUMNASSISMO()
```

```
Sheets("DATOS").Select
```

```
Range("B32").Select
```

```
If ActiveCell.Value = "SI" Then
```

```
    Sheets("SISMO").Select
```

```
    Columns("A:D").Hidden = True
```

```
    Columns("H:AB").Hidden = False
```

```
ElseIf ActiveCell.Value = "NO" Then
```

```
    Sheets("SISMO").Select
```

```
    Columns("A:D").Hidden = False
```

```
    Columns("H:AB").Hidden = True
```

```
End If
```

```
Sheets("DATOS").Select
```

```
Range("B80").Select
```

```
End Sub
```

ANEXO III: MANUAL DE USUARIO

Para el correcto dimensionamiento del tanque o sistema de tanques, siga las siguientes instrucciones:

- 1º: el código de colores utilizado en el programa es el siguiente:

 Celdas a rellenar por el usuario.

 Celdas de cálculo, se rellenan automáticamente.

- 2º: rellene todas las celdas que apliquen en cada hoja de cálculo por orden, es decir, desde la hoja de cálculo “DATOS” a la hoja de cálculo “VENTEO”.
 - Las unidades en las que hay que introducir los datos y de los resultados mostrados aparecerán siempre a la derecha.
 - Al lado de diversas celdas existen hipervínculos que facilitarán el acceso a la información necesaria para rellenarlas.
 - Cuando algún criterio no se cumpla o se introduzcan datos que no apliquen según la norma, aparecerá un mensaje de error al lado de la celda afectada.
 - Las hojas de cálculo “materiales” y “tablas” son meramente informativas.

ANEXO IV: INFORMES DE CÁLCULO TANK

1. CASO PRÁCTICO 1

1.1. INPUTS

API-620/650/653 General Tank Data:

| | |
|--|-------------------|
| API Design Code | 620 |
| Run Objective | Analyze |
| Design Temperature | 20.000 C |
| Design Pressure at Top | 50.000 KPa |
| Shell Material | A-516 |
| Internal Pressure Combination Factor[Fp] | 0.90000 |
| Shell Design Stress[Sd or Sts] | 0.14479E+06 KPa |
| Shell Hydro Test Stress[St] | 0.19650E+06 KPa |
| Tank Nominal Diameter[D] | 15.000 m. |
| Tank Shell Height[HTK] | 16.000 m. |
| Design Liquid Level[H] | 15.000 m. |
| Liquid Specific Gravity[G] | 0.77000 |
| Weight of Attachments/Structures..... | 0.00000 N. |
| Distance down to Top Wind Girder | 0.00000 m. |
| Joint Efficiency (App A or 653)[E] | 1.0000 |
| Wind Velocity | 27.000 M./sec. |
| Insulation Thickness | 0.00000 cm. |
| Insulation Density | 0.00000 kg./cu.cm |
| Include Annular Base Plate Details | Yes |
| Include Wind Moment in Appendix F_4_2 Calculations . | Yes |
| Minimum Yield Strength of Bottom Plate: | 0.26199E+06 KPa |
| Number of Shell Courses | 8 |

APLICACIÓN INFORMÁTICA PARA EL DIMENSIONAMIENTO INTEGRAL DE TANQUES
 MEDIANTE LA NORMA API 620.

LUIS JULIO MARTÍNEZ BARTHE

Shell Course Height and Thickness:

| | Course Height | Thickness | Corrosion Allowance |
|---|---------------|-----------|---------------------|
| # | m. | cm. | cm. |
| 1 | 2.00 | 1.1000 | 0.1500 |
| 2 | 2.00 | 1.0000 | 0.1500 |
| 3 | 2.00 | 0.9000 | 0.1500 |
| 4 | 2.00 | 0.8000 | 0.1500 |
| 5 | 2.00 | 0.7000 | 0.1500 |
| 6 | 2.00 | 0.7000 | 0.1500 |
| 7 | 2.00 | 0.6000 | 0.1500 |
| 8 | 2.00 | 0.5000 | 0.1500 |

Shell Course Material Properties:

| # | Material Name | Sd | St | Fy | UTS | Max Thk | Grade | Group |
|---|---------------|--------|--------|--------|--------|---------|-------|-------|
| | | | KPa | | | cm. | | |
| 1 | A-516 | 144786 | 196496 | 261994 | 482622 | 3.810 | 70 | 4 |
| 2 | A-516 | 144786 | 196496 | 261994 | 482622 | 3.810 | 70 | 4 |
| 3 | A-516 | 144786 | 196496 | 261994 | 482622 | 3.810 | 70 | 4 |
| 4 | A-516 | 144786 | 196496 | 261994 | 482622 | 3.810 | 70 | 4 |
| 5 | A-516 | 144786 | 196496 | 261994 | 482622 | 3.810 | 70 | 4 |
| 6 | A-516 | 144786 | 196496 | 261994 | 482622 | 3.810 | 70 | 4 |
| 7 | A-516 | 144786 | 196496 | 261994 | 482622 | 3.810 | 70 | 4 |
| 8 | A-516 | 144786 | 196496 | 261994 | 482622 | 3.810 | 70 | 4 |

Wind Data :

| | |
|---------------------------|---------|
| Kz parameter | 1.0400 |
| Kzt parameter | 1.0000 |
| Kd parameter | 0.95000 |
| Importance Factor ... [I] | 1.0000 |
| Gust Factor ... [G] | 0.85000 |

Roof Data Input:

| | |
|---|----------------|
| Roof Type | Dome |
| Angle Between Roof and Horizontal | 30.000 deg |
| Net Area at Roof/Shell Junction ... [A] | 0.00000 sq.cm. |
| Thickness of Roof Plate | 0.50000 cm. |
| Roof Plate Corrosion Allowance | 0.15000 cm. |
| Ground Snow Load | 0.00000 N/M2 |
| Roof Live Load | 960.00 N/M2 |

APLICACIÓN INFORMÁTICA PARA EL DIMENSIONAMIENTO INTEGRAL DE TANQUES
 MEDIANTE LA NORMA API 620.

LUIS JULIO MARTÍNEZ BARTHE

| | |
|---|----------------|
| Roof Spherical Radius | 15.000 m. |
| General Roof Data, No Design | |
| Weight of Roof Plates | 0.11275E+06 N. |
| Weight of Roof Framing | 0.00000 N. |
| Percent of Weights Supported by Shell | 100.00 % |
| Roof Joint Efficiency | 1.0000 |

Supported Cone Roof Data and Roof Material Specification:

| | |
|--|-----------------|
| Structural Database | |
| Preferred Rafter Type (W, WT, S, C) | |
| Preferred Girder Type (W, WT, S, C) | |
| Preferred Column Type (W, WT, S, C, DC, DI, P) | |
| Roof Plate Material | A-516 |
| Roof Plate Allowable Design Stress | 0.14479E+06 KPa |
| Structural Member Material | A-516 |
| Structural Member Allowable Design Str. | 0.14479E+06 KPa |
| Maximum Allowed Rafter Length | 0.00000 m. |
| Maximum Allowed Girder Length | 0.00000 m. |
| Center Column Cap Plate Diameter | 0.00000 m. |

API-650 Seismic Data (App E):

| | |
|--|-----------------|
| Minimum Yield Strength of Weld Material..... | 0.26200E+06 KPa |
| Nominal Thickness of Bottom Plate[tb] | 0.80000 cm. |
| Seismic Use Group[SUG] | 2.0000 |
| Friction Factor | 0.40000 |
| Importance Factor | 1.2500 |
| Initial Anchorage Type | Mechanical |
| Earthquake Type | Mapped |
| Site Class | D |
| Spectral Acceleration Adjustment Coefficient[K] | 1.5000 |
| Scaling Factor[Q] | 1.0000 |
| Transitional Period[TL] | 4.0000 |
| Mapped maximum earthquake for short periods ...[Ss] | 0.25000 |
| Mapped maximum earthquake for 1 sec periods ...[S1] | 0.12500 |
| Mapped maximum earthquake for 0 sec period ...[S0] | 0.40000E-01 |
| Non-ASCE peak ground acceleration[Sp] | 0.10000 |
| ASCE short period design accel. parameter[SDS] | 0.40000 |

--- Site Specific Data ---

| | |
|---|---------|
| Spectral acceleration parameter at 0 period ..[Sa0*] | 0.00000 |
| Spectral acceleration parameter at any period ..[Sa*] | 0.00000 |

APLICACIÓN INFORMÁTICA PARA EL DIMENSIONAMIENTO INTEGRAL DE TANQUES
MEDIANTE LA NORMA API 620.

LUIS JULIO MARTÍNEZ BARTHE

Computation Control Directives:

```

-----
Roof Projection in Wind Moment = YES
Shell thick converg tolerance = 0.12700000E-01 cm.
Generate Message File = YES
Cosine curve tolerance = 0.30000001
Cosine curve iteration limit = 100.00000
Wind girder shell thickness = MAX
Shell settlement method = FOURIER_SERIES
Corroded Nozzles = NO
653 Corroded hydrotest case = NO
Thickness roundup to nearest = 0.00000000 cm.
Plate material density = 0.78500481E-02 kg./cu.cm.
Modify fluid height by pressure = NO
Round anchor bolts by = 4.0000000
Wind moment in Appendix F = Sect_5.9.7.1
Full shell weight in Appendix F = YES
Use P from F.4.1 only in F.6 = YES
    
```

1.2. INTERNAL PRESSURE CALCULATIONS

Determine required thickness per the selected Method:

Specified Tank Radius: 24.606 ft.

Table 5-6 - Tank Radius Versus Nominal Plate Thickness |

| Tank Radius (ft) | Nominal Plate Thickness (in.) |
|---------------------|----------------------------------|
| <= 25 | 3/16 or 0.1875 |
| >25 to 60 | 1/4 or 0.25 |
| >60 to 100 | 5/16 or 0.3125 |
| >100 | 3/8 or 0.375 |

The Tank wall thickness must be at least 0.1875 inches thick + c.

Roof Required Thickness due to Internal Pressure:

Determine unit Forces T1 and T2 per API 620:

Longitudinal Unit Force per API 620 5.10.2.5(a) [T1]:

APLICACIÓN INFORMÁTICA PARA EL DIMENSIONAMIENTO INTEGRAL DE TANQUES
MEDIANTE LA NORMA API 620.

LUIS JULIO MARTÍNEZ BARTHE

$$\begin{aligned} &= (R_s/2) (P - W/At) \\ &= (590.551/2) (7.252 - 25348.5/273908.1) \\ &= 2114.028 \text{ lbs/in.} \end{aligned}$$

Circumferential Unit Force per API 620 5.10.2.5(a) [T2]:

$$\begin{aligned} &= (R_s/2) (P + W/At) \\ &= (590.551/2) (7.252 + 25348.5/273908.1) \\ &= 2168.680 \text{ lbs/in.} \end{aligned}$$

Required Thickness per 5.10.3.2:

$$\begin{aligned} &= \max(T_1, T_2) / (S_{ts} * E) + c \\ &= \max(2114.028, 2168.680) / (21000.0 * 1.00) + 0.05906 \\ &= 0.16233 \text{ in.} \end{aligned}$$

MAWP at Input Thickness [MAWP]:

$$= 9.641 \text{ lbs/in}^2 \quad \text{determined by iteration}$$

Required Thickness due to Internal Pressure for Course # 8:

Determine unit Forces T1 and T2 per API 620:

Longitudinal Unit Force per API 620 5.10.2.5(c) [T1]:

$$\begin{aligned} &= (R_s/2) (P - W/At) \\ &= (295.276/2) (7.252 - 33503.9/273908.1) \\ &= 1052.618 \text{ lbs/in.} \end{aligned}$$

Circumferential Unit Force [T2]:

$$\begin{aligned} &= (P + P_{static}) R_s \\ &= (7.252 + 1.095) 295.3 \\ &= 2464.584 \text{ lbs/in.} \end{aligned}$$

Required Thickness per 5.10.3.2:

$$\begin{aligned} &= \max(T_1, T_2) / (S_{ts} * E) + c \\ &= \max(1052.618, 2464.584) / (21000.0 * 1.00) + 0.05906 \\ &= 0.17642 \text{ in.} \end{aligned}$$

MAWP at Input Thickness [MAWP]:

$$\begin{aligned} &= E * S_{ts} (t - c) / r - \text{Liquid Pressure} \\ &= 1.00 * 21000 (0.1969 - 0.0591) / 295.3 - 1.095 \\ &= 8.705 \text{ lbs/in}^2 \end{aligned}$$

Nominal Required Plate Thickness per Table 5-6: 0.18750 in.

APLICACIÓN INFORMÁTICA PARA EL DIMENSIONAMIENTO INTEGRAL DE TANQUES
MEDIANTE LA NORMA API 620.

LUIS JULIO MARTÍNEZ BARTHE

Required Thickness due to Internal Pressure for Course # 7:

Determine unit Forces T1 and T2 per API 620:

Longitudinal Unit Force per API 620 5.10.2.5(c) [T1]:

$$\begin{aligned} &= (R_s/2) (P - W/At) \\ &= (295.276/2) (7.252 - 43290.4/273908.1) \\ &= 1047.343 \text{ lbs/in.} \end{aligned}$$

Circumferential Unit Force [T2]:

$$\begin{aligned} &= (P + P_{static}) R_s \\ &= (7.252 + 3.284) 295.3 \\ &= 3111.045 \text{ lbs/in.} \end{aligned}$$

Required Thickness per 5.10.3.2:

$$\begin{aligned} &= \max(T_1, T_2) / (S_t s * E) + c \\ &= \max(1047.343, 3111.045) / (21000.0 * 1.00) + 0.05906 \\ &= 0.20720 \text{ in.} \end{aligned}$$

MAWP at Input Thickness [MAWP]:

$$\begin{aligned} &= E * S_t s (t - c) / r - \text{Liquid Pressure} \\ &= 1.00 * 21000 (0.2362 - 0.0591) / 295.3 - 3.284 \\ &= 9.316 \text{ lbs/in}^2 \end{aligned}$$

Required Thickness due to Internal Pressure for Course # 6:

Determine unit Forces T1 and T2 per API 620:

Longitudinal Unit Force per API 620 5.10.2.5(c) [T1]:

$$\begin{aligned} &= (R_s/2) (P - W/At) \\ &= (295.276/2) (7.252 - 54708.0/273908.1) \\ &= 1041.189 \text{ lbs/in.} \end{aligned}$$

Circumferential Unit Force [T2]:

$$\begin{aligned} &= (P + P_{static}) R_s \\ &= (7.252 + 5.473) 295.3 \\ &= 3757.505 \text{ lbs/in.} \end{aligned}$$

Required Thickness per 5.10.3.2:

$$\begin{aligned} &= \max(T_1, T_2) / (S_t s * E) + c \\ &= \max(1041.189, 3757.505) / (21000.0 * 1.00) + 0.05906 \\ &= 0.23798 \text{ in.} \end{aligned}$$

APLICACIÓN INFORMÁTICA PARA EL DIMENSIONAMIENTO INTEGRAL DE TANQUES
MEDIANTE LA NORMA API 620.

LUIS JULIO MARTÍNEZ BARTHE

MAWP at Input Thickness [MAWP]:

$$\begin{aligned} &= E * Sts(t - c) / r - \text{Liquid Pressure} \\ &= 1.00 * 21000 (0.2756 - 0.0591) / 295.3 - 5.473 \\ &= 9.927 \text{ lbs/in}^2 \end{aligned}$$

Required Thickness due to Internal Pressure for Course # 5:

Determine unit Forces T1 and T2 per API 620:

Longitudinal Unit Force per API 620 5.10.2.5(c) [T1]:

$$\begin{aligned} &= (Rs/2) (P - W/At) \\ &= (295.276/2) (7.252 - 66125.6/273908.1) \\ &= 1035.035 \text{ lbs/in.} \end{aligned}$$

Circumferential Unit Force [T2]:

$$\begin{aligned} &= (P + Pstatic)Rs \\ &= (7.252 + 7.663) 295.3 \\ &= 4403.965 \text{ lbs/in.} \end{aligned}$$

Required Thickness per 5.10.3.2:

$$\begin{aligned} &= \max(T1, T2) / (Sts * E) + c \\ &= \max(1035.035, 4403.965) / (21000.0 * 1.00) + 0.05906 \\ &= 0.26877 \text{ in.} \end{aligned}$$

MAWP at Input Thickness [MAWP]:

$$\begin{aligned} &= E * Sts(t - c) / r - \text{Liquid Pressure} \\ &= 1.00 * 21000 (0.2756 - 0.0591) / 295.3 - 7.663 \\ &= 7.737 \text{ lbs/in}^2 \end{aligned}$$

Required Thickness due to Internal Pressure for Course # 4:

Determine unit Forces T1 and T2 per API 620:

Longitudinal Unit Force per API 620 5.10.2.5(c) [T1]:

$$\begin{aligned} &= (Rs/2) (P - W/At) \\ &= (295.276/2) (7.252 - 79174.2/273908.1) \\ &= 1028.002 \text{ lbs/in.} \end{aligned}$$

Circumferential Unit Force [T2]:

$$\begin{aligned} &= (P + Pstatic)Rs \\ &= (7.252 + 9.852) 295.3 \\ &= 5050.426 \text{ lbs/in.} \end{aligned}$$

Required Thickness per 5.10.3.2:

APLICACIÓN INFORMÁTICA PARA EL DIMENSIONAMIENTO INTEGRAL DE TANQUES
MEDIANTE LA NORMA API 620.

LUIS JULIO MARTÍNEZ BARTHE

$$\begin{aligned} &= \max(T1, T2) / (Sts * E) + c \\ &= \max(1028.002, 5050.426) / (21000.0 * 1.00) + 0.05906 \\ &= 0.29955 \text{ in.} \end{aligned}$$

MAWP at Input Thickness [MAWP]:

$$\begin{aligned} &= E * Sts(t - c) / r - \text{Liquid Pressure} \\ &= 1.00 * 21000 (0.3150 - 0.0591) / 295.3 - 9.852 \\ &= 8.348 \text{ lbs/in}^2 \end{aligned}$$

Required Thickness due to Internal Pressure for Course # 3:

Determine unit Forces T1 and T2 per API 620:

Longitudinal Unit Force per API 620 5.10.2.5(c) [T1]:

$$\begin{aligned} &= (Rs/2) (P - W/At) \\ &= (295.276/2) (7.252 - 93854.0/273908.1) \\ &= 1020.089 \text{ lbs/in.} \end{aligned}$$

Circumferential Unit Force [T2]:

$$\begin{aligned} &= (P + Pstatic)Rs \\ &= (7.252 + 12.041) 295.3 \\ &= 5696.887 \text{ lbs/in.} \end{aligned}$$

Required Thickness per 5.10.3.2:

$$\begin{aligned} &= \max(T1, T2) / (Sts * E) + c \\ &= \max(1020.089, 5696.887) / (21000.0 * 1.00) + 0.05906 \\ &= 0.33034 \text{ in.} \end{aligned}$$

MAWP at Input Thickness [MAWP]:

$$\begin{aligned} &= E * Sts(t - c) / r - \text{Liquid Pressure} \\ &= 1.00 * 21000 (0.3543 - 0.0591) / 295.3 - 12.041 \\ &= 8.959 \text{ lbs/in}^2 \end{aligned}$$

Required Thickness due to Internal Pressure for Course # 2:

Determine unit Forces T1 and T2 per API 620:

Longitudinal Unit Force per API 620 5.10.2.5(c) [T1]:

$$\begin{aligned} &= (Rs/2) (P - W/At) \\ &= (295.276/2) (7.252 - 110164.8/273908.1) \\ &= 1011.298 \text{ lbs/in.} \end{aligned}$$

Circumferential Unit Force [T2]:

$$= (P + Pstatic)Rs$$

APLICACIÓN INFORMÁTICA PARA EL DIMENSIONAMIENTO INTEGRAL DE TANQUES
MEDIANTE LA NORMA API 620.

LUIS JULIO MARTÍNEZ BARTHE

$$= (7.252 + 14.231) 295.3$$
$$= 6343.347 \text{ lbs/in.}$$

Required Thickness per 5.10.3.2:

$$= \max(T1, T2) / (Sts * E) + c$$
$$= \max(1011.298, 6343.347) / (21000.0 * 1.00) + 0.05906$$
$$= 0.36112 \text{ in.}$$

MAWP at Input Thickness [MAWP]:

$$= E * Sts(t - c) / r - \text{Liquid Pressure}$$
$$= 1.00 * 21000 (0.3937 - 0.0591) / 295.3 - 14.231$$
$$= 9.569 \text{ lbs/in}^2$$

Required Thickness due to Internal Pressure for Course # 1:

Determine unit Forces T1 and T2 per API 620:

Longitudinal Unit Force per API 620 5.10.2.5(c) [T1]:

$$= (Rs/2) (P - W/At)$$
$$= (295.276/2) (7.252 - 128106.7/273908.1)$$
$$= 1001.627 \text{ lbs/in.}$$

Circumferential Unit Force [T2]:

$$= (P + Pstatic)Rs$$
$$= (7.252 + 16.420) 295.3$$
$$= 6989.807 \text{ lbs/in.}$$

Required Thickness per 5.10.3.2:

$$= \max(T1, T2) / (Sts * E) + c$$
$$= \max(1001.627, 6989.807) / (21000.0 * 1.00) + 0.05906$$
$$= 0.39190 \text{ in.}$$

MAWP at Input Thickness [MAWP]:

$$= E * Sts(t - c) / r - \text{Liquid Pressure}$$
$$= 1.00 * 21000 (0.4331 - 0.0591) / 295.3 - 16.420$$
$$= 10.180 \text{ lbs/in}^2$$

Required Area of the Roof/Shell Junction, Internal Pressure:

Decay Length Along the Roof [wh]:

$$= 0.6 * \text{sqrt}(R2(th - c))$$
$$= 0.6 * \text{sqrt}(590.551 (0.19685 - 0.05906))$$
$$= 5.41249 \text{ in.}$$

APLICACIÓN INFORMÁTICA PARA EL DIMENSIONAMIENTO INTEGRAL DE TANQUES
MEDIANTE LA NORMA API 620.

LUIS JULIO MARTÍNEZ BARTHE

Decay Length Along the Shell [wc]:

$$\begin{aligned} &= 0.6 * \text{sqrt}(R_c(t_c - c)) \\ &= 0.6 * \text{sqrt}(295.276 (0.19685 - 0.05906)) \\ &= 3.82721 \text{ in.} \end{aligned}$$

User Given Area Available in Roof/Shell Junction [Av]:

$$= 0.000 \text{ in}^2$$

Computed Area Available in Roof [ARoof]:

$$\begin{aligned} &= w_h(t_h - c) \\ &= 5.412 (0.19685 - 0.05906) \\ &= 0.746 \text{ in}^2 \end{aligned}$$

Computed Area Available in Shell [AShell]:

$$\begin{aligned} &= w_c(t_c - c) \\ &= 3.827 (0.19685 - 0.05906) \\ &= 0.527 \text{ in}^2 \end{aligned}$$

Unit Circumferential Force at Top of Tank [T2s]:

$$\begin{aligned} &= P * R_c \\ &= 7.252 * 295.276 \\ &= 2141.4 \text{ lbs/in.} \end{aligned}$$

Magnitude of Total Circumferential Force at Roof/Shell Junction [Q]:

$$\begin{aligned} &= T_2 * w_h + T_2S * w_c - T_1 * R_c * \sin(\alpha) \\ &= 2168.7 * 5.412 + 2141.4 * 3.827 - 2114.0 * 295.3 * \sin(60.0) \\ &= -520657.7 \text{ lbs} \end{aligned}$$

Required Area at Roof/Shell Junction [Ac]:

$$\begin{aligned} &= \max(\text{abs}(Q/15000), \text{abs}(Q/(St_s * E))) \\ &= \max(\text{abs}(-520657.7/15000), \text{abs}(-520657.7/(21000.0 * 1.00))) \\ &= \max(\text{abs}(-34.711), \text{abs}(-24.793)) \\ &= 34.711 \text{ in}^2 \end{aligned}$$

Additional Area Needed to Satisfy Reinforcing Requirements [AEx]:

$$\begin{aligned} &= A_c - A_v \\ &= 34.711 - 0.000 \\ &= 34.711 \text{ in}^2 \end{aligned}$$

APLICACIÓN INFORMÁTICA PARA EL DIMENSIONAMIENTO INTEGRAL DE TANQUES
 MEDIANTE LA NORMA API 620.

LUIS JULIO MARTÍNEZ BARTHE

Summary of Internal Pressure Analysis:

| Shell Course # | Required Thickness cm. | Analysis Thickness cm. | Computed Internal MAWP KPa | Maximum MAWP per Code KPa |
|----------------|------------------------|------------------------|----------------------------|---------------------------|
| 8 | 0.4762 | 0.5000 | 60.0198 | 60.0198 |
| 7 | 0.5263 | 0.6000 | 64.2300 | 64.2300 |
| 6 | 0.6045 | 0.7000 | 68.4402 | 68.4402 |
| 5 | 0.6827 | 0.7000 | 53.3455 | 53.3455 |
| 4 | 0.7609 | 0.8000 | 57.5557 | 57.5557 |
| 3 | 0.8391 | 0.9000 | 61.7659 | 61.7659 |
| 2 | 0.9172 | 1.0000 | 65.9761 | 65.9761 |
| 1 | 0.9954 | 1.1000 | 70.1864 | 70.1864 |
| Roof | 0.4762 | 0.5000 | 66.4725 | 66.4725 |

1.3. WIND CALCULATIONS

Wind Load Calculations:

Wind velocity factor 5.2.1 [Vfact]:

$$\begin{aligned}
 &= (\text{Wind Velocity} / 120)^2 \\
 &= (60.4/120)^2 \\
 &= 0.253
 \end{aligned}$$

Vertical projected wind area of tank [VArea]:

$$\begin{aligned}
 &= \text{Tank Height} * \text{Insulated Tank Diameter} \\
 &= 52.49 * 49.21 \\
 &= 2583.338 \text{ ft}^2 \quad [240.000 \text{ m.}^2]
 \end{aligned}$$

Velocity pressure per 5.9.7.1 [p]:

$$\begin{aligned}
 &= 0.00256 * K_z * K_{zt} * k_d * V^2 * I * G + 5.0 \\
 &= 0.00256 * 1.040 * 1.000 * 0.950 * 60.397^2 * 1.000 * 0.850 + 5.0 \\
 &= 12.842 \text{ psf} \quad [614.897 \text{ N/M}^2]
 \end{aligned}$$

Wind moment on shell [Moment]:

$$\begin{aligned}
 &= \text{Wind Pressure} * \text{Wind Area} * \text{Tank Height}/2 \\
 &= 12.842 * 2583.3 * 52.49/2 \\
 &= 0.87077\text{E}+06 \text{ ft.lb.} \quad [0.11806\text{E}+07 \text{ N.m.}]
 \end{aligned}$$

APLICACIÓN INFORMÁTICA PARA EL DIMENSIONAMIENTO INTEGRAL DE TANQUES
MEDIANTE LA NORMA API 620.

LUIS JULIO MARTÍNEZ BARTHE

Vertical projected wind area of Dome/Umbrella roof:

Roof Radius + Insulation (if any):

$$\begin{aligned} &= 49.213 \\ &= 49.213 \text{ ft. } [15.000 \text{ m.}] \end{aligned}$$

Half apex angle between tank and apex radii:

$$\begin{aligned} &= \text{asin}(D / (2 * 1/2 \text{ Apex Angle})) \\ &= \text{asin}(49.213 / (2 * 49.213)) \\ &= 30.0 \text{ deg.} \end{aligned}$$

Area of the sector:

$$\begin{aligned} &= 2 * \text{Half angle} / (2 \text{ pi}) * (\text{pi} * (1/2 \text{ Apex Angle})^2) \\ &= 2 * 0.524 / (2 * 3.142) * (3.142 * 49.213^2) \\ &= 1268.093 \text{ ft.}^2 [117.810 \text{ m.}^2] \end{aligned}$$

Height from apex to chord:

$$\begin{aligned} &= 1/2 \text{ Apex Angle} * \cos(\text{Half angle}) \\ &= 49.213 * \cos(0.524) \\ &= 42.619 \text{ ft. } [12.990 \text{ m.}] \end{aligned}$$

Area of triangle below the chord line:

$$\begin{aligned} &= \text{Apex height} * D/2 \\ &= 42.619 * 49.213/2 \\ &= 1048.705 \text{ ft.}^2 [97.428 \text{ m.}^2] \end{aligned}$$

Dome/Umbrella roof area:

$$\begin{aligned} &= \text{Sector area} - \text{Triangle area} \\ &= 1268.093 - 1048.705 \\ &= 219.389 \text{ ft.}^2 [20.382 \text{ m.}^2] \end{aligned}$$

Area Exposed to Wind:

$$\begin{aligned} &= \text{Wind area of tank} + \text{Wind area of roof} \\ &= 2583.338 + 219.389 \\ &= 2802.727 \text{ ft.}^2 [260.382 \text{ m.}^2] \end{aligned}$$

Wind Moment at the base including the dome/umbrella roof [Total Moment]:

$$\begin{aligned} &= \text{Moment} + (\text{Wind P} * \text{Roof Area} (\text{Tank Height} + \text{dome Height}/3)) \\ &= 870770 + (12.842 * 219.4 (52.5 + 6.59/3)) \\ &= 1024861.625 \text{ ft.} \cdot \text{lb. } [1389466.375 \text{ N.m.}] \end{aligned}$$

Wind shear force acting on the tank:

$$\begin{aligned} &= \text{Wind Pressure} * (\text{tank area} + \text{roof area}) \\ &= 12.842 * 2802.7 \end{aligned}$$

APLICACIÓN INFORMÁTICA PARA EL DIMENSIONAMIENTO INTEGRAL DE TANQUES
MEDIANTE LA NORMA API 620.

LUIS JULIO MARTÍNEZ BARTHE

$$= 0.35994E+05 \text{ lbf. } [0.16010E+06 \text{ N.}]$$

Wind Overturning Stability Checks:

Moment about shell-to-bottom joint [MDL]:

$$\begin{aligned} &= (\text{Shell Weight} + \text{Attachment Weight} + \text{Framing Weight} * \%) D / 2 \\ &= (83185.3 + 0.0 + 0.0 * 1.00) 49.2 / 2 \\ &= 2046881.2 \text{ ft.lb } [2775079.8 \text{ N.m.}] \end{aligned}$$

Resisting Weight of Fluid [WL]:

$$\begin{aligned} &= \min(5.6 * t_b * \sqrt{F_{by} * H * \min(0.7, G)}, 0.45 * H * D) \\ &= \min(5.6 * 0.3150 * \sqrt{38000.0 * 49.21 * \min(0.7, 0.770)}, 0.45 * 49.2 * 49.21) \\ &= \min(2018.0, 1089.8) \\ &= 1089.8 \text{ lbf/ft } [159.0 \text{ N./cm.}] \end{aligned}$$

Moment from Fluid Weight [MF]:

$$\begin{aligned} &= WL * (\text{PI} * D) * (D / 2) \\ &= 1089.8 * (3.1416 * 49.21) * (49.21 / 2) \\ &= 4146078.8 \text{ ft.lb } [5621087.5 \text{ N.m.}] \end{aligned}$$

Moment from Design Internal Pressure [MPI]:

$$\begin{aligned} &= \text{Design Pressure} * \text{pi} (\text{Diameter in inches} / 2)^2 * (D / 2) \\ &= 7.2521 * 3.1416 (590.55 / 2)^2 * (49.21 / 2) \\ &= 48877852.0 \text{ ft.lb } [66266636.0 \text{ N.m.}] \end{aligned}$$

Moment about shell-to-bottom joint [MWS]:

$$\begin{aligned} &= P_{ws} * D * H^2 / 2 \\ &= 18 * V_{\text{fact}} * (D + \text{Insulation}) * H^2 / 2 \\ &= 18 * 0.2533 (49.2 + 0.0) * 52.5^2 / 2 \\ &= 309172.7 \text{ ft.lb } [419164.0 \text{ N.m.}] \end{aligned}$$

Moment about shell-to-bottom joint [MW]:

$$\begin{aligned} &= MWS + \text{Wind Uplift} * V_{\text{Area}} * D / 2 \\ &= 309172.7 + 0.053 * 273908.1 * 49.2 / 2 \\ &= 664721.3 \text{ ft.lb } [901202.6 \text{ N.m.}] \end{aligned}$$

Moment about shell-to-bottom joint [MDLR]:

$$\begin{aligned} &= (\text{Roof Weight}) D / 2 \\ &= (25348.5) 49.2 / 2 \\ &= 623732.1 \text{ ft.lb } [845631.0 \text{ N.m.}] \end{aligned}$$

Warning: The following API 650 Section 5.11.2.1 criteria were not met:

- 1) $0.6MW + MPI < MDL/1.5 + MDLR$
- 2) $MW + FP(MPI) < (MDL + MF)/2 + MDLR$
- 3) $MWS + FP(MPI) < MDL/1.5 + MDLR$

1.4. SEISMIC ANALYSIS RESULTS

API-620 12th Edition, Addendum 1, November 2014

API-650 12th Edition, Addendum 2, January 2016

Seismic Evaluation Results - Appendix E

Ground Motion Type : Probabilistic

| | |
|--|------------------|
| Design Fluid Weight | 0.19984E+08 N. |
| Design level peak acceleration for non-ASCE[Sp] | 0.10000 |
| MCE at period of 0.2 seconds[Ss] | 0.25000 |
| MCE at period of 0.0 seconds[S0] | 0.40000E-01 |
| MCD at period of 1.0 seconds[S1] | 0.12500 |
| Design spectral accel parameter[SDS] | 0.40000 |
| Acceleration based site coefficient[FA] | 1.6000 |
| Velocity based site coefficient[FV] | 2.3000 |
| FvS1 / FaSs[TS] | 0.71875 |
| Convective sloshing period[TC] | 4.0573 sec |
| Convective spectral acceleration parameter[Ac] | 0.26197E-01 |
| Impulsive spectral acceleration parameter[Ai] | 0.12500 |
| Effective convective fluid weight[Wc] | 0.45904E+07 N. |
| Effective impulsive fluid weight[Wi] | 0.15628E+08 N. |
| Convective liquid base shear[Vc] | 0.12025E+06 N. |
| Impulsive liquid base shear[Vi] | 0.20407E+07 N. |
| Total design base shear[V] | 0.20442E+07 N. |
| Shear resistance[VS] | 0.76507E+07 N. |
| Ring wall convective moment arm.....[Xc] | 11.116 m. |
| Ring wall impulsive moment arm[Xi] | 6.0900 m. |
| Slab convective moment arm[XCS] | 11.311 m. |
| Slab impulsive moment arm[XIS] | 8.4000 m. |
| Shell+appurtenances weight[WS] | 0.45707E+06 N. |
| Roof+framing+10% snow weight+roof ins.....[Wrs] | 0.11275E+06 N. |
| Ringwall overturning moment[Mrw] | 0.12597E+08 N.m. |
| Slab overturning moment[Ms] | 0.17093E+08 N.m. |
| Vertical acceleration parameter[AV] | 0.18800 |
| Effective specific gravity[Ge] | 0.71210 |
| Resisting annulus force[wa] | 322.15 N./cm. |

APLICACIÓN INFORMÁTICA PARA EL DIMENSIONAMIENTO INTEGRAL DE TANQUES
 MEDIANTE LA NORMA API 620.

LUIS JULIO MARTÍNEZ BARTHE

| | |
|---|--------------------|
| Tank + roof weight at shell base | [wt] 120.92 N./cm. |
| The anchorage ratio | [J] -1.7717 |
| Reqd min annular plate projection | [L] 0.00000 m. |
| | |
| Number of anchor bolts required | [N] 16 |
| Shell compressive stress | [Sc] 8871.1 KPa |
| Shell allowable stress | [Sa] 46425. KPa |
| | |
| Height of sloshing wave | 0.33008 m. |
| Required Freeboard | 0.23105 m. |

Hoop Stress versus Allowable Stress

| Course # | Hoop Stress (KPa) | Hoop Allowable (KPa) |
|-------------|-----------------------|--------------------------|
| 1 | 84931.62 | 192566.17 |
| 2 | 81491.02 | 192566.17 |
| 3 | 77318.38 | 192566.17 |
| 4 | 71967.48 | 192566.17 |
| 5 | 64719.57 | 192566.17 |
| 6 | 46788.47 | 192566.17 |
| 7 | 33188.43 | 192566.17 |
| 8 | 13795.20 | 192566.17 |

Seismic Evaluation Summary:

Seismic shell stress check passed.
 Base shear within limits.
 Hoop stress within allowable.

Appendix E Seismic Analysis Calculations:

Velocity based site coeff. (at 1.0 sec period) from Table E-2 [Fv]:
 = 2.300

Period Parameter per E.2.2 [Ts]:

$$= (F_v * S_1) / F_a * S_s$$

$$= (2.300 * 0.125) / 1.600 * 0.250$$
 = 0.719 sec.

Sloshing Period Coefficient per E.4.5.2-c [Ks]:

$$= 0.578 / \text{sqrt}(\text{hyperbolic tangent}(3.68 * HL / D))$$

$$= 0.578 / \text{sqrt}(\text{hyperbolic tangent}(3.68 * 49.213 / 49.213))$$
 = 0.578

APLICACIÓN INFORMÁTICA PARA EL DIMENSIONAMIENTO INTEGRAL DE TANQUES
MEDIANTE LA NORMA API 620.

LUIS JULIO MARTÍNEZ BARTHE

Convective Sloshing Period per E.4.5.2-b [Tc]:

$$\begin{aligned} &= K_s \cdot \sqrt{D} \\ &= 0.578 \cdot \sqrt{49.213} \\ &= 4.057 \text{ sec.} \end{aligned}$$

Impulsive Spectral Accel. Parameter per E.4.6.1-1 [Ai]:

$$\begin{aligned} &= SDS \left(I / R_{wi} \right) \\ &= 0.400 \left(1.250 / 4.000 \right) \\ &= 0.125 \end{aligned}$$

Lower bound limit of Ai per E.4.6.1

$$= 0.007 \text{ for sites with } S_1 < 0.6 \text{ per E.4.6.1-2}$$

Final value of Ai:

$$\begin{aligned} &= \max(A_i, \text{lower bound value}) \\ &= \max(0.125, 0.007) \\ &= 0.125 \text{ \%g} \end{aligned}$$

Convective Spectral Acceleration parameter per E.4.6.1-5 [Ac]:

$$\begin{aligned} &= \min((2.5 \cdot K \cdot Q \cdot F_a \cdot S_0 \cdot (I / R_{wc})) \cdot T_s \cdot T_L / T_c^2, A_i) \\ &= \min((2.5 \cdot 1.500 \cdot 1.000 \cdot 1.600 \cdot 0.040 \cdot (1.250 / 2.000)) \\ &\quad \cdot 0.719 \cdot 4.000 / 4.057^2, 0.125000) \\ &= \min(0.026197, 0.125000) \\ &= 0.026 \text{ \%g} \end{aligned}$$

Convective Weight per E.6.1.1-3 [Wc]:

$$\begin{aligned} &= 0.230 (D/H) \cdot W_p \cdot \tanh(3.67 (H/D)) \\ &= 0.230 (49.21/49.21) \cdot 4492887 \cdot \tanh(3.67 (49.21/49.21)) \\ &= 1032023.500 \text{ lb. [4590440.500 N.]} \end{aligned}$$

Impulsive Weight per E.6.1.1-2 [Wi]:

$$\begin{aligned} &= W_p \cdot (1.0 - 0.218 (D/H)) \\ &= 4492887 \cdot (1.0 - 0.218 (49.213/49.213)) \\ &= 3513437.750 \text{ lb. [15627771.000 N.]} \end{aligned}$$

Convective Liquid Base Shear per E.6.1-3 [Vc]:

$$\begin{aligned} &= A_c \cdot W_c \\ &= 0.026197 \cdot 1032023 \\ &= 27035.482 \text{ lb. [120253.828 N.]} \end{aligned}$$

Impulsive Liquid Base Shear per E.6.1-2 [Vi]:

$$\begin{aligned} &= A_i (W_s + W_r + W_f + W_i) \\ &= 0.125 (102758.312 + 25348.471 + 28749.502 + 3513437) \end{aligned}$$

APLICACIÓN INFORMÁTICA PARA EL DIMENSIONAMIENTO INTEGRAL DE TANQUES
MEDIANTE LA NORMA API 620.

LUIS JULIO MARTÍNEZ BARTHE

$$= 458786.750 \text{ lb. } [2040683.500 \text{ N.}]$$

Total Design Base Shear per E.6.1-1 [V]:

$$\begin{aligned} &= \text{sqrt}(Vc^2 + Vi^2) \\ &= \text{sqrt}(27035.482^2 + 458786.750^2) \\ &= 459582.656 \text{ lb. } [2044223.625 \text{ N.}] \end{aligned}$$

Ringwall Convective Moment Arm per E.6.1.2.1-3 [Xc]:

$$\begin{aligned} &= (1.0 - (\cosh(3.67 (H / D)) - 1.0) \\ &\quad / (3.67 (H / D) * \sinh(3.67 (H / D)))) * H \\ &= (1.0 - (\cosh(3.67 (49.213/49.213)) - 1.0) \\ &\quad / (3.67 (49.213 /49.213) * \sinh(3.67 (49.213 /49.213)))) * 49.213 \\ &= 36.469 \text{ ft. } [11.116 \text{ m.}] \end{aligned}$$

Ringwall Impulsive Moment Arm per E.6.1.2.1-2 [Xi]:

$$\begin{aligned} &= H * (0.5 - 0.094 (D / H)) \\ &= 49.213 * (0.5 - 0.094 (49.213/49.213)) \\ &= 19.980 \text{ ft. } [6.090 \text{ m.}] \end{aligned}$$

Slab Convective Moment Arm per E.6.1.2.2-3 [Xcs]:

$$\begin{aligned} &= (1.0 - (\cosh(3.67 (H / D)) - 1.937) \\ &\quad / (3.67 (H / D) * \sinh(3.67 (H / D)))) * H \\ &= (1.0 - (\cosh(3.67 (49.213/49.213)) - 1.937) \\ &\quad / (3.67 (49.213 /49.213) * \sinh(3.67 (49.213 /49.213)))) * 49.213 \\ &= 37.110 \text{ ft. } [11.311 \text{ m.}] \end{aligned}$$

Slab Impulsive Moment Arm per E.6.1.2.2-2 [Xis]:

$$\begin{aligned} &= H * (0.500 + (0.0600 * D / H)) \\ &= 49.213 * (0.500 + (0.0600 * 49.213/49.213)) \\ &= 27.559 \text{ ft. } [8.400 \text{ m.}] \end{aligned}$$

Ringwall Overturing Moment per E.6.1.5-1 [Mrw]:

$$\begin{aligned} &= \text{sqrt}((Ai (Wi * Xi + Ws * Xs \\ &\quad + Wr * Xr))^2 \\ &\quad + (Ac * Wc * Xc)^2) \\ &= \text{sqrt}((0.125 (3513437 * 19.980 + 102758.312 * 22.653 \\ &\quad + 25348.471 * 54.691))^2 \\ &\quad + (0.026 * 1032023 * 36.469)^2) \\ &= 9291681.000 \text{ ft.lb. } [12597290.000 \text{ N.m.}] \end{aligned}$$

Slab Overturing Moment per E.6.1.5-2 [Ms]:

$$\begin{aligned} &= \text{sqrt}((Ai (Wi * Xis + Ws * Xs \\ &\quad + Wr * Xr)) ^2 \\ &\quad + (Ac * Wc * Xcs) ^2) \end{aligned}$$

APLICACIÓN INFORMÁTICA PARA EL DIMENSIONAMIENTO INTEGRAL DE TANQUES
MEDIANTE LA NORMA API 620.

LUIS JULIO MARTÍNEZ BARTHE

$$\begin{aligned} &= \text{sqrt}((0.125 (3513437 * 27.559 + 102758.312 * 22.653 \\ &\quad + 25348.471 * 54.691))^2 \\ &\quad + (0.026 * 1032023 * 36.469)^2) \\ &= 12607631.0 \text{ ft.lb.} \quad [17092922.0 \text{ N.m.}] \end{aligned}$$

Vertical Acceleration Parameter per E.6.1.3 [Av]:

$$\begin{aligned} &= 0.47 * \text{SDS} \\ &= 0.47 * 0.400 \\ &= 0.188000 \text{ \%g} \end{aligned}$$

Effective Specific Gravity per E.2.2 [Ge]:

$$\begin{aligned} &= (1 - (0.4 * A_v)) * G \\ &= (1 - (0.4 * 0.188)) * 0.770 \\ &= 0.712 \end{aligned}$$

Resisting Annulus Force per E.6.2.1.1-1b [wa]:

$$\begin{aligned} &= \min((7.9 * t_a * \text{sqrt}(F_y * H * G_e)), \\ &\quad (1.28 * H * D * G_e)) \\ &= \min((7.9 * 0.256 * \text{sqrt}(38000.000 * 49.213 * 0.712)), \\ &\quad (1.28 * 49.213 * 49.213 * 0.712)) \\ &= \min(2332.957, 2207.502) \\ &= 2207.502 \text{ lb./ft.} \quad [32214.461 \text{ N./m.}] \end{aligned}$$

Tank + Roof Weight at Shell Base per E.6.2.1.1.1-2 [wt]:

$$\begin{aligned} &= (W_{rs} / (D * \pi)) + (W_S / (D * \pi)) \\ &= (25348.471 / (49.213 * 3.142)) + (102758.312 / (49.213 * 3.142)) \\ &= 828.602 \text{ lb./ft.} \quad [12091.934 \text{ N./m.}] \end{aligned}$$

The Anchorage Ratio per E.6.2.1.1.1-1 [J]:

$$\begin{aligned} &= M_{rw} / (D^2 (w_t (1 - (0.4 * A_v)) + w_a - 0.4 * w_{int})) \\ &= 9291681 / (49.213^2 (828.602 (1 - (0.4 * 0.188)) + 2207.502 - 0.4 * 12848.1)) \\ &= -1.771708 \end{aligned}$$

Number of Anchor Bolts Required [nA]:

$$\begin{aligned} &= \max(\text{int}((\pi * D / 10) + .999), 4) \\ &= \max(\text{int}((3.142 * 49.213 / 10) + .999), 4) \\ &= 16 \text{ bolts} \end{aligned}$$

Shell Compressive Stress per E.6.2.2.1-1b [Sigma_c]:

$$\begin{aligned} &= (w_t (1.0 + 0.4 * A_v) + (1.273 * M_{rw} / (D^2))) \\ &\quad / (12.0 * t_s) \\ &= (828.602 (1.0 + 0.4 * 0.188) + (1.273 * 9291681 / (49.213^2))) \\ &\quad / (12.0 * 0.374) \\ &= 1286.677 \text{ psi} \quad [8871.120 \text{ KPa}] \end{aligned}$$

APLICACIÓN INFORMÁTICA PARA EL DIMENSIONAMIENTO INTEGRAL DE TANQUES
MEDIANTE LA NORMA API 620.

LUIS JULIO MARTÍNEZ BARTHE

Shell Allowable Stress [Sa/Fc]:

$$\begin{aligned} &= \min ((1.0E6 * ts / (2.5 * D)) \\ &\quad + (600 * \text{sqrt}(G * H)), (Fty / 2)) \\ &= \min ((1.0E6 * 0.374 / (2.5 * 49.213)) \\ &\quad + (600 * \text{sqrt}(0.770 * 49.213)), (38000.000 / 2)) \\ &= 6733.474 \text{ psi} \quad [46424.605 \text{ KPa}] \end{aligned}$$

Seismic Hoop combined Force/Stress Calculations for Shell Course: 8

Impulsive Hoop Membrane Force per E.6.1.4-2b [Ni]:

$$\begin{aligned} &= (2.77 * Ai * G * D^2) \\ &\quad * ((Y / D * 0.75) - (0.5 * (Y / D * 0.75)^2)) \\ &= (2.77 * 0.125 * 0.770 * 49.213^2) \\ &\quad * ((3.281 / 49.213 * 0.75) - (0.5 * (3.281 / 49.213 * 0.75)^2)) \\ &= 54.845 \text{ lb./in.} \quad [96.043 \text{ N./cm.}] \end{aligned}$$

Convective Hoop Membrane Force per E.6.1.4-4b [Nc]:

$$\begin{aligned} &= \cosh (3.68 * (H - Y) / D) / \cosh (3.68 * H / D) \\ &\quad * 0.98 * Ac * G * D^2 \\ &= \cosh (3.68 * (49.213 - 3.281) / 49.213) \\ &\quad * 0.98 * 0.026 * 0.770 * 49.213^2 \\ &= 37.475 \text{ lb./in.} \quad [65.626 \text{ N./cm.}] \end{aligned}$$

Product Hydrostatic Membrane Force [Nh]:

$$\begin{aligned} &= 0.0361 * G * Y * 12.0 * D * 12.0 / 2.0 \\ &= 0.0361 * 0.770 * 3.281 * 12.0 * 49.213 * 12.0 / 2.0 \\ &= 323.141 \text{ lb./in.} \quad [565.878 \text{ N./cm.}] \end{aligned}$$

Total Combined Hoop Stress per E.6.1.4-6:

$$\begin{aligned} &= (\text{sqrt}(Ni^2 + Nc^2 + (AV * Nh / 2.5)^2) + Nh) / Thk \\ &= (\text{sqrt}(54.845^2 + 37.475^2 + (0.188 * 323.141 / 2.5)^2) + 323.141) / 0.197 \\ &= 2000.870 \text{ psi} \quad [13795.200 \text{ KPa}] \end{aligned}$$

Seismic Hoop Allowable for Shell Course: 8

Allowable Hoop Stress per E.6.2.4:

$$\begin{aligned} &= \min([0.9 * \min(Fy, Fyweld) * je * Mred], ShellAll * 1.33) \\ &= \min([0.9 * \min(38000, 38000) * 1.00 * 1.00], 21000 * 1.33) \\ &= 27930.0 \text{ psi} \quad [192566.2 \text{ KPa}] \end{aligned}$$

Seismic Hoop combined Force/Stress Calculations for Shell Course: 7

Impulsive Hoop Membrane Force per E.6.1.4-2b [Ni]:

APLICACIÓN INFORMÁTICA PARA EL DIMENSIONAMIENTO INTEGRAL DE TANQUES
MEDIANTE LA NORMA API 620.

LUIS JULIO MARTÍNEZ BARTHE

$$\begin{aligned} &= (2.77 * A_i * G * D^2) \\ &\quad * ((Y / D * 0.75) - (0.5 (Y / D * 0.75)^2)) \\ &= (2.77 * 0.125 * 0.770 * 49.213^2) \\ &\quad * ((9.843/49.213 * 0.75) - (0.5 (9.843/49.213 * 0.75)^2)) \\ &= 149.229 \text{ lb./in. } [261.327 \text{ N./cm.}] \end{aligned}$$

Convective Hoop Membrane Force per E.6.1.4-4b [Nc]:

$$\begin{aligned} &= \cosh (3.68 (H - Y) / D) / \cosh (3.68 * H / D) \\ &\quad * 0.98 * A_c * G * D^2 \\ &= \cosh (3.68 (49.213 - 9.843) / 49.213) \\ &\quad * 0.98 * 0.026 * 0.770 * 49.213^2 \\ &= 22.983 \text{ lb./in. } [40.247 \text{ N./cm.}] \end{aligned}$$

Product Hydrostatic Membrane Force [Nh]:

$$\begin{aligned} &= 0.0361 * G * Y * 12.0 * D * 12.0 / 2.0 \\ &= 0.0361 * 0.770 * 9.843 * 12.0 * 49.213 * 12.0 / 2.0 \\ &= 969.422 \text{ lb./in. } [1697.633 \text{ N./cm.}] \end{aligned}$$

Total Combined Hoop Stress per E.6.1.4-6:

$$\begin{aligned} &= (\text{sqrt}(N_i^2 + N_c^2 + (A_V * N_h / 2.5)^2) + N_h) / T_{hk} \\ &= (\text{sqrt}(149.229^2 + 22.983^2 + (0.188 * 969.422 / 2.5)^2) + 969.422) / 0.236 \\ &= 4813.685 \text{ psi } [33188.430 \text{ KPa}] \end{aligned}$$

Seismic Hoop Allowable for Shell Course: 7

Allowable Hoop Stress per E.6.2.4:

$$\begin{aligned} &= \min([0.9 * \min(F_y, F_{yweld}) * j_e * M_{red}], \text{ShellAll} * 1.33) \\ &= \min([0.9 * \min(38000, 38000) * 1.00 * 1.00], 21000 * 1.33) \\ &= 27930.0 \text{ psi } [192566.2 \text{ KPa}] \end{aligned}$$

Seismic Hoop combined Force/Stress Calculations for Shell Course: 6

Impulsive Hoop Membrane Force per E.6.1.4-2b [Ni]:

$$\begin{aligned} &= (2.77 * A_i * G * D^2) \\ &\quad * ((Y / D * 0.75) - (0.5 (Y / D * 0.75)^2)) \\ &= (2.77 * 0.125 * 0.770 * 49.213^2) \\ &\quad * ((16.404/49.213 * 0.75) - (0.5 (16.404/49.213 * 0.75)^2)) \\ &= 223.206 \text{ lb./in. } [390.874 \text{ N./cm.}] \end{aligned}$$

Convective Hoop Membrane Force per E.6.1.4-4b [Nc]:

$$\begin{aligned} &= \cosh (3.68 (H - Y) / D) / \cosh (3.68 * H / D) \\ &\quad * 0.98 * A_c * G * D^2 \\ &= \cosh (3.68 (49.213 - 16.404) / 49.213) \\ &\quad * 0.98 * 0.026 * 0.770 * 49.213^2 \end{aligned}$$

APLICACIÓN INFORMÁTICA PARA EL DIMENSIONAMIENTO INTEGRAL DE TANQUES
MEDIANTE LA NORMA API 620.

LUIS JULIO MARTÍNEZ BARTHE

$$= 14.135 \text{ lb./in. [24.753 N./cm.]}$$

Product Hydrostatic Membrane Force [Nh]:

$$\begin{aligned} &= 0.0361 * G * Y * 12.0 * D * 12.0 / 2.0 \\ &= 0.0361 * 0.770 * 16.404 * 12.0 * 49.213 * 12.0/2.0 \\ &= 1615.704 \text{ lb./in. [2829.390 N./cm.]} \end{aligned}$$

Total Combined Hoop Stress per E.6.1.4-6:

$$\begin{aligned} &= (\text{sqrt}(Ni^2 + Nc^2 + (AV * Nh / 2.5)^2) + Nh) / Thk \\ &= (\text{sqrt}(223.206^2+14.135^2+(0.188*1615.704/2.5)^2)+1615.704)/0.276 \\ &= 6786.249 \text{ psi [46788.473 KPa]} \end{aligned}$$

Seismic Hoop Allowable for Shell Course: 6

Allowable Hoop Stress per E.6.2.4:

$$\begin{aligned} &= \min([0.9 * \min(Fy, Fyweld) * je * Mred], ShellAll * 1.33) \\ &= \min([0.9 * \min(38000, 38000) * 1.00 * 1.00], 21000 * 1.33) \\ &= 27930.0 \text{ psi [192566.2 KPa]} \end{aligned}$$

Seismic Hoop combined Force/Stress Calculations for Shell Course: 5

Impulsive Hoop Membrane Force per E.6.1.4-2b [Ni]:

$$\begin{aligned} &= (2.77 * Ai * G * D^2) \\ &\quad * ((Y / D * 0.75) - (0.5 (Y / D * 0.75)^2)) \\ &= (2.77 * 0.125 * 0.770 * 49.213^2) \\ &\quad * ((22.966/49.213 * 0.75) - (0.5 (22.966/49.213 * 0.75)^2)) \\ &= 276.776 \text{ lb./in. [484.684 N./cm.]} \end{aligned}$$

Convective Hoop Membrane Force per E.6.1.4-4b [Nc]:

$$\begin{aligned} &= \cosh (3.68 (H - Y) / D) / \cosh (3.68 * H / D) \\ &\quad * 0.98 * Ac * G * D^2 \\ &= \cosh (3.68 (49.213 - 22.966) / 49.213) \\ &\quad * 0.98 * 0.026 * 0.770 * 49.213^2 \\ &= 8.760 \text{ lb./in. [15.340 N./cm.]} \end{aligned}$$

Product Hydrostatic Membrane Force [Nh]:

$$\begin{aligned} &= 0.0361 * G * Y * 12.0 * D * 12.0 / 2.0 \\ &= 0.0361 * 0.770 * 22.966 * 12.0 * 49.213 * 12.0/2.0 \\ &= 2261.985 \text{ lb./in. [3961.146 N./cm.]} \end{aligned}$$

Total Combined Hoop Stress per E.6.1.4-6:

$$\begin{aligned} &= (\text{sqrt}(Ni^2 + Nc^2 + (AV * Nh / 2.5)^2) + Nh) / Thk \\ &= (\text{sqrt}(276.776^2+8.760^2+(0.188*2261.985/2.5)^2)+2261.985)/0.276 \\ &= 9386.995 \text{ psi [64719.574 KPa]} \end{aligned}$$

APLICACIÓN INFORMÁTICA PARA EL DIMENSIONAMIENTO INTEGRAL DE TANQUES
MEDIANTE LA NORMA API 620.

LUIS JULIO MARTÍNEZ BARTHE

Seismic Hoop Allowable for Shell Course: 5

Allowable Hoop Stress per E.6.2.4:

$$\begin{aligned} &= \min([0.9 * \min(F_y, F_{yweld}) * j_e * M_{red}], ShellAll * 1.33) \\ &= \min([0.9 * \min(38000, 38000) * 1.00 * 1.00], 21000 * 1.33) \\ &= 27930.0 \text{ psi} \quad [192566.2 \text{ KPa}] \end{aligned}$$

Seismic Hoop combined Force/Stress Calculations for Shell Course: 4

Impulsive Hoop Membrane Force per E.6.1.4-2b [Ni]:

$$\begin{aligned} &= (2.77 * A_i * G * D^2) \\ &\quad * ((Y / D * 0.75) - (0.5 * (Y / D * 0.75)^2)) \\ &= (2.77 * 0.125 * 0.770 * 49.213^2) \\ &\quad * ((29.528/49.213 * 0.75) - (0.5 * (29.528/49.213 * 0.75)^2)) \\ &= 309.938 \text{ lb./in.} \quad [542.757 \text{ N./cm.}] \end{aligned}$$

Convective Hoop Membrane Force per E.6.1.4-4b [Nc]:

$$\begin{aligned} &= \cosh(3.68 * (H - Y) / D) / \cosh(3.68 * H / D) \\ &\quad * 0.98 * A_c * G * D^2 \\ &= \cosh(3.68 * (49.213 - 29.528) / 49.213) \\ &\quad * 0.98 * 0.026 * 0.770 * 49.213^2 \\ &= 5.536 \text{ lb./in.} \quad [9.695 \text{ N./cm.}] \end{aligned}$$

Product Hydrostatic Membrane Force [Nh]:

$$\begin{aligned} &= 0.0361 * G * Y * 12.0 * D * 12.0 / 2.0 \\ &= 0.0361 * 0.770 * 29.528 * 12.0 * 49.213 * 12.0 / 2.0 \\ &= 2908.267 \text{ lb./in.} \quad [5092.901 \text{ N./cm.}] \end{aligned}$$

Total Combined Hoop Stress per E.6.1.4-6:

$$\begin{aligned} &= (\sqrt{ Ni^2 + Nc^2 + (AV * Nh / 2.5)^2 } + Nh) / Thk \\ &= (\sqrt{ 309.938^2 + 5.536^2 + (0.188 * 2908.267 / 2.5)^2 } + 2908.267) / 0.315 \\ &= 10438.238 \text{ psi} \quad [71967.477 \text{ KPa}] \end{aligned}$$

Seismic Hoop Allowable for Shell Course: 4

Allowable Hoop Stress per E.6.2.4:

$$\begin{aligned} &= \min([0.9 * \min(F_y, F_{yweld}) * j_e * M_{red}], ShellAll * 1.33) \\ &= \min([0.9 * \min(38000, 38000) * 1.00 * 1.00], 21000 * 1.33) \\ &= 27930.0 \text{ psi} \quad [192566.2 \text{ KPa}] \end{aligned}$$

Seismic Hoop combined Force/Stress Calculations for Shell Course: 3

Impulsive Hoop Membrane Force per E.6.1.4-2b [Ni]:

APLICACIÓN INFORMÁTICA PARA EL DIMENSIONAMIENTO INTEGRAL DE TANQUES
MEDIANTE LA NORMA API 620.

LUIS JULIO MARTÍNEZ BARTHE

$$\begin{aligned} &= (2.77 * A_i * G * D^2) \\ &\quad * ((Y / D * 0.75) - (0.5 (Y / D * 0.75)^2)) \\ &= (2.77 * 0.125 * 0.770 * 49.213^2) \\ &\quad * ((36.089/49.213 * 0.75) - (0.5 (36.089/49.213 * 0.75)^2)) \\ &= 322.692 \text{ lb./in. } [565.093 \text{ N./cm.}] \end{aligned}$$

Convective Hoop Membrane Force per E.6.1.4-4b [Nc]:

$$\begin{aligned} &= \cosh (3.68 (H - Y) / D) / \cosh (3.68 * H / D) \\ &\quad * 0.98 * A_c * G * D^2 \\ &= \cosh (3.68 (49.213 - 36.089) / 49.213) \\ &\quad * 0.98 * 0.026 * 0.770 * 49.213^2 \\ &= 3.672 \text{ lb./in. } [6.430 \text{ N./cm.}] \end{aligned}$$

Product Hydrostatic Membrane Force [Nh]:

$$\begin{aligned} &= 0.0361 * G * Y * 12.0 * D * 12.0 / 2.0 \\ &= 0.0361 * 0.770 * 36.089 * 12.0 * 49.213 * 12.0 / 2.0 \\ &= 3554.548 \text{ lb./in. } [6224.658 \text{ N./cm.}] \end{aligned}$$

Total Combined Hoop Stress per E.6.1.4-6:

$$\begin{aligned} &= (\text{sqrt}(N_i^2 + N_c^2 + (A_V * N_h / 2.5)^2) + N_h) / T_{hk} \\ &= (\text{sqrt}(322.692^2 + 3.672^2 + (0.188 * 3554.548 / 2.5)^2) + 3554.548) / 0.354 \\ &= 11214.339 \text{ psi } [77318.383 \text{ KPa}] \end{aligned}$$

Seismic Hoop Allowable for Shell Course: 3

Allowable Hoop Stress per E.6.2.4:

$$\begin{aligned} &= \min([0.9 * \min(F_y, F_{yweld}) * j_e * M_{red}], \text{ShellAll} * 1.33) \\ &= \min([0.9 * \min(38000, 38000) * 1.00 * 1.00], 21000 * 1.33) \\ &= 27930.0 \text{ psi } [192566.2 \text{ KPa}] \end{aligned}$$

Seismic Hoop combined Force/Stress Calculations for Shell Course: 2

Impulsive Hoop Membrane Force per E.6.1.4-3b [Ni]:

$$\begin{aligned} &= 1.39 * A_i * G * D^2 \\ &= 1.39 * 0.125 * 0.770 * 49.213^2 \\ &= 324.017 \text{ lb./in. } [567.413 \text{ N./cm.}] \end{aligned}$$

Convective Hoop Membrane Force per E.6.1.4-4b [Nc]:

$$\begin{aligned} &= \cosh (3.68 (H - Y) / D) / \cosh (3.68 * H / D) \\ &\quad * 0.98 * A_c * G * D^2 \\ &= \cosh (3.68 (49.213 - 42.651) / 49.213) \\ &\quad * 0.98 * 0.026 * 0.770 * 49.213^2 \\ &= 2.710 \text{ lb./in. } [4.746 \text{ N./cm.}] \end{aligned}$$

APLICACIÓN INFORMÁTICA PARA EL DIMENSIONAMIENTO INTEGRAL DE TANQUES
MEDIANTE LA NORMA API 620.

LUIS JULIO MARTÍNEZ BARTHE

Product Hydrostatic Membrane Force [Nh]:

$$\begin{aligned} &= 0.0361 * G * Y * 12.0 * D * 12.0 / 2.0 \\ &= 0.0361 * 0.770 * 42.651 * 12.0 * 49.213 * 12.0/2.0 \\ &= 4200.830 \text{ lb./in. } [7356.415 \text{ N./cm.}] \end{aligned}$$

Total Combined Hoop Stress per E.6.1.4-6:

$$\begin{aligned} &= (\text{sqrt}(Ni^2 + Nc^2 + (AV * Nh / 2.5)^2) + Nh) / Thk \\ &= (\text{sqrt}(324.017^2+2.710^2+(0.188*4200.830/2.5)^2)+4200.830)/0.394 \\ &= 11819.544 \text{ psi } [81491.023 \text{ KPa}] \end{aligned}$$

Seismic Hoop Allowable for Shell Course: 2

Allowable Hoop Stress per E.6.2.4:

$$\begin{aligned} &= \min([0.9 * \min(Fy, Fyweld) * je * Mred], ShellAll * 1.33) \\ &= \min([0.9 * \min(38000, 38000) * 1.00 * 1.00], 21000 * 1.33) \\ &= 27930.0 \text{ psi } [192566.2 \text{ KPa}] \end{aligned}$$

Seismic Hoop combined Force/Stress Calculations for Shell Course: 1

Impulsive Hoop Membrane Force per E.6.1.4-3b [Ni]:

$$\begin{aligned} &= 1.39 * Ai * G * D^2 \\ &= 1.39 * 0.125 * 0.770 * 49.213^2 \\ &= 324.017 \text{ lb./in. } [567.413 \text{ N./cm.}] \end{aligned}$$

Convective Hoop Membrane Force per E.6.1.4-4b [Nc]:

$$\begin{aligned} &= \cosh (3.68 (H - Y) / D) / \cosh (3.68 * H / D) \\ &\quad * 0.98 * Ac * G * D^2 \\ &= \cosh (3.68 (49.213 - 49.213) / 49.213) \\ &\quad * 0.98 * 0.026 * 0.770 * 49.213^2 \\ &= 2.414 \text{ lb./in. } [4.227 \text{ N./cm.}] \end{aligned}$$

Product Hydrostatic Membrane Force [Nh]:

$$\begin{aligned} &= 0.0361 * G * Y * 12.0 * D * 12.0 / 2.0 \\ &= 0.0361 * 0.770 * 49.213 * 12.0 * 49.213 * 12.0/2.0 \\ &= 4847.111 \text{ lb./in. } [8488.170 \text{ N./cm.}] \end{aligned}$$

Total Combined Hoop Stress per E.6.1.4-6:

$$\begin{aligned} &= (\text{sqrt}(Ni^2 + Nc^2 + (AV * Nh / 2.5)^2) + Nh) / Thk \\ &= (\text{sqrt}(324.017^2+2.414^2+(0.188*4847.111/2.5)^2)+4847.111)/0.433 \\ &= 12318.570 \text{ psi } [84931.617 \text{ KPa}] \end{aligned}$$

Seismic Hoop Allowable for Shell Course: 1

Allowable Hoop Stress per E.6.2.4:

APLICACIÓN INFORMÁTICA PARA EL DIMENSIONAMIENTO INTEGRAL DE TANQUES
MEDIANTE LA NORMA API 620.

LUIS JULIO MARTÍNEZ BARTHE

$$\begin{aligned} &= \min([0.9 * \min(F_y, F_{yweld}) * j_e * M_{red}], ShellAll * 1.33) \\ &= \min([0.9 * \min(38000, 38000) * 1.00 * 1.00], 21000 * 1.33) \\ &= 27930.0 \text{ psi} \quad [192566.2 \text{ KPa}] \end{aligned}$$

Height of Sloshing Wave per E.7.2:

$$\begin{aligned} &= 0.42 * D * 2.5 * K * Q * F_A * S_0 \\ &\quad * I * 4 * T_s / T_c^2 \\ &= 0.42 * 49.213 * 2.5 * 1.500 * 1.000 * 1.600 * 0.040 \\ &\quad * 1.250 * 4 * 0.719/4.057^2 \\ &= 1.083 \text{ ft.} \quad [0.330 \text{ m.}] \end{aligned}$$

Required Freeboard per Table E-7:

$$\begin{aligned} &= 0.7 * \text{wave height} \\ &= 0.7 * 1.083 \\ &= 0.758 \text{ ft.} \quad [0.231 \text{ m.}] \end{aligned}$$

Shear Resistance Force per E.7.6-1 [Vs]:

$$\begin{aligned} &= \mu U (W_S + W_R + W_F + W_{fluid}) * (1.0 - 0.4 * A_V) \\ &= 0.400 (102758.312 + 25348.471 + 28749.502 + 4492887) * (1.0 - 0.4 * 0.188) \\ &= 1720033.000 \text{ lb.} \quad [7650706.500 \text{ N.}] \end{aligned}$$

2. CASO PRÁCTICO 2

2.1. INPUTS

API-620 12th Edition, Addendum 1, November 2014

API-650 12th Edition, Addendum 2, January 2016

API-620/650/653 General Tank Data:

| | |
|--|-----------------------|
| API Design Code | 620 |
| Run Objective | Analyze |
| Design Temperature | -35.000 C |
| Design Pressure at Top | 20.000 KPa |
| Shell Material | A-573 |
| Internal Pressure Combination Factor[Fp] | 0.83000 |
| Shell Design Stress[Sd or Sts] | 0.12410E+06 KPa |
| Shell Hydro Test Stress[St] | 0.18133E+06 KPa |
| Tank Nominal Diameter[D] | 16.000 m. |
| Tank Shell Height[HTK] | 17.500 m. |
| Design Liquid Level[H] | 15.000 m. |
| Liquid Specific Gravity[G] | 0.68000 |
| Weight of Attachments/Structures..... | 0.00000 N. |
| Distance down to Top Wind Girder | 0.00000 m. |
| Joint Efficiency (App A or 653)[E] | 1.0000 |
| Wind Velocity | 29.000 M./sec. |
| Insulation Thickness | 5.0000 cm. |
| Insulation Density | 0.13599E-03 kg./cu.cm |
| Include Annular Base Plate Details | Yes |
| Include Wind Moment in Appendix F_4_2 Calculations . | Yes |
| Minimum Yield Strength of Bottom Plate: | 0.26199E+06 KPa |
| Number of Shell Courses | 7 |

Shell Course Height and Thickness:

| Course Height | Thickness | Corrosion Allowance | |
|---------------|-----------|---------------------|--------|
| # m. | cm. | cm. | |
| 1 | 2.50 | 1.1000 | 0.1500 |

APLICACIÓN INFORMÁTICA PARA EL DIMENSIONAMIENTO INTEGRAL DE TANQUES
 MEDIANTE LA NORMA API 620.

LUIS JULIO MARTÍNEZ BARTHE

| | | | | | | | |
|---|--|------|--|--------|--|--------|--|
| 2 | | 2.50 | | 0.9000 | | 0.1500 | |
| 3 | | 2.50 | | 0.8000 | | 0.1500 | |
| 4 | | 2.50 | | 0.7000 | | 0.1500 | |
| 5 | | 2.50 | | 0.7000 | | 0.1500 | |
| 6 | | 2.50 | | 0.7000 | | 0.1500 | |
| 7 | | 2.50 | | 0.7000 | | 0.1500 | |

Shell Course Material Properties:

| # | Material Name | Sd | St | Fy | UTS | Max Thk | Grade | Group |
|---|---------------|--------|--------|--------|--------|---------|-------|-------|
| | | | KPa | | | cm. | | |
| 1 | A-573 | 124102 | 181327 | 241311 | 448149 | 3.810 | 65 | 4 |
| 2 | A-573 | 124102 | 181327 | 241311 | 448149 | 3.810 | 65 | 4 |
| 3 | A-573 | 124102 | 181327 | 241311 | 448149 | 3.810 | 65 | 4 |
| 4 | A-573 | 124102 | 181327 | 241311 | 448149 | 3.810 | 65 | 4 |
| 5 | A-573 | 124102 | 181327 | 241311 | 448149 | 3.810 | 65 | 4 |
| 6 | A-573 | 124102 | 181327 | 241311 | 448149 | 3.810 | 65 | 4 |
| 7 | A-573 | 124102 | 181327 | 241311 | 448149 | 3.810 | 65 | 4 |

Roof Data Input:

| | |
|---|----------------|
| Roof Type | Cone |
| Angle Between Roof and Horizontal | 10.000 deg |
| Net Area at Roof/Shell Junction[A] | 15.207 sq.cm. |
| Thickness of Roof Plate | 1.0000 cm. |
| Roof Plate Corrosion Allowance | 0.15000 cm. |
| Ground Snow Load | 0.00000 N/M2 |
| Roof Live Load | 960.00 N/M2 |
| Roof Spherical Radius | 0.00000 m. |
| General Roof Data, No Design | |
| Weight of Roof Plates | 0.12821E+06 N. |
| Weight of Roof Framing | 0.00000 N. |
| Percent of Weights Supported by Shell | 100.00 % |
| Roof Joint Efficiency | 1.0000 |

Supported Cone Roof Data and Roof Material Specification:

| | |
|---|-----------------|
| Structural Database | |
| Preferred Rafter Type (W, WT, S, C) | |
| Preferred Girder Type (W, WT, S, C) | |
| Preferred Column Type (W, WT, S, C, DC, DI, P) | |
| Roof Plate Material | A-573 |
| Roof Plate Allowable Design Stress | 0.12410E+06 KPa |

APLICACIÓN INFORMÁTICA PARA EL DIMENSIONAMIENTO INTEGRAL DE TANQUES
 MEDIANTE LA NORMA API 620.

LUIS JULIO MARTÍNEZ BARTHE

| | |
|--|-----------------|
| Structural Member Material | A-573 |
| Structural Member Allowable Design Str. | 0.12410E+06 KPa |
| Maximum Allowed Rafter Length | 0.00000 m. |
| Maximum Allowed Girder Length | 0.00000 m. |
| Center Column Cap Plate Diameter | 0.00000 m. |

Computation Control Directives:

```

-----
Roof Projection in Wind Moment = YES
Shell thick converg tolerance = 0.12700000E-01 cm.
Generate Message File = YES
Cosine curve tolerance = 0.30000001
Cosine curve iteration limit = 100.00000
Wind girder shell thickness = MAX
Shell settlement method = FOURIER_SERIES
Corroded Nozzles = NO
653 Corroded hydrotest case = NO
Thickness roundup to nearest = 0.00000000 cm.
Plate material density = 0.78500481E-02 kg./cu.cm.
Modify fluid height by pressure = NO
Round anchor bolts by = 4.0000000
Wind moment in Appendix F = Sect_5.9.7.1
Full shell weight in Appendix F = YES
Use P from F.4.1 only in F.6 = YES
    
```

2.2. INTERNAL PRESSURE CALCULATIONS

Specified Tank Radius: 26.247 ft.

Table 5-6 - Tank Radius Versus Nominal Plate Thickness |

| Tank Radius (ft) | | Nominal Plate Thickness (in.) | |
|---------------------|----------|----------------------------------|----------|
| <= 25 | | 3/16 or 0.1875 | |
| >25 to 60 | | 1/4 or 0.25 | |
| >60 to 100 | | 5/16 or 0.3125 | |
| >100 | | 3/8 or 0.375 | |

The Tank wall thickness must be at least 0.2500 inches thick + c.

APLICACIÓN INFORMÁTICA PARA EL DIMENSIONAMIENTO INTEGRAL DE TANQUES
MEDIANTE LA NORMA API 620.

LUIS JULIO MARTÍNEZ BARTHE

Roof Required Thickness due to Internal Pressure:

Determine unit Forces T1 and T2 per API 620:

Longitudinal Unit Force per API 620 5.10.2.5(b) [T1]:

$$\begin{aligned} &= (R_s / (2 * \cos(\alpha))) (P - W / A_t) \\ &= (314.961 / (2 * \cos(80.000))) (2.901 - 38393.8 / 311646.6) \\ &= 2519.009 \text{ lbs/in.} \end{aligned}$$

Circumferential Unit Force [T2]:

$$\begin{aligned} &= (P + P_{\text{static}}) R_s / \cos(\alpha) \\ &= (2.901 + 0.000) 315.0 / \cos(80.000) \\ &= 5261.471 \text{ lbs/in.} \end{aligned}$$

Required Thickness per 5.10.3.2:

$$\begin{aligned} &= \max(T_1, T_2) / (S_t s * E) + c \\ &= \max(2519.009, 5261.471) / (18000.0 * 1.00) + 0.05905 \\ &= 0.35136 \text{ in.} \end{aligned}$$

MAWP at Input Thickness [MAWP]:

$$= 3.312 \text{ lbs/in}^2 \quad \text{determined by iteration}$$

Required Thickness due to Internal Pressure for Course # 7:

Determine unit Forces T1 and T2 per API 620:

Longitudinal Unit Force per API 620 5.10.2.5(c) [T1]:

$$\begin{aligned} &= (R_s / 2) (P - W / A_t) \\ &= (314.961 / 2) (2.901 - 53617.2 / 311646.6) \\ &= 429.729 \text{ lbs/in.} \end{aligned}$$

Circumferential Unit Force [T2]:

$$\begin{aligned} &= (P + P_{\text{static}}) R_s \\ &= (2.901 + 0.000) 315.0 \\ &= 913.644 \text{ lbs/in.} \end{aligned}$$

Required Thickness per 5.10.3.2:

$$\begin{aligned} &= \max(T_1, T_2) / (S_t s * E) + c \\ &= \max(429.729, 913.644) / (18000.0 * 1.00) + 0.05906 \\ &= 0.10981 \text{ in.} \end{aligned}$$

MAWP at Input Thickness [MAWP]:

APLICACIÓN INFORMÁTICA PARA EL DIMENSIONAMIENTO INTEGRAL DE TANQUES
MEDIANTE LA NORMA API 620.

LUIS JULIO MARTÍNEZ BARTHE

$$\begin{aligned} &= E * Sts(t - c) / r - \text{Liquid Pressure} \\ &= 1.00 * 18000 (0.2756 - 0.0591) / 315.0 - 0.000 \\ &= 12.375 \text{ lbs/in}^2 \end{aligned}$$

Nominal Required Plate Thickness per Table 5-6: 0.25000 in.

Required Thickness due to Internal Pressure for Course # 6:

Determine unit Forces T1 and T2 per API 620:

Longitudinal Unit Force per API 620 5.10.2.5(c) [T1]:

$$\begin{aligned} &= (Rs/2) (P - W/At) \\ &= (314.961/2) (2.901 - 68840.7/311646.6) \\ &= 422.036 \text{ lbs/in.} \end{aligned}$$

Circumferential Unit Force [T2]:

$$\begin{aligned} &= (P + Pstatic)Rs \\ &= (2.901 + 2.417) 315.0 \\ &= 1674.845 \text{ lbs/in.} \end{aligned}$$

Required Thickness per 5.10.3.2:

$$\begin{aligned} &= \max(T1, T2) / (Sts * E) + c \\ &= \max(422.036, 1674.845) / (18000.0 * 1.00) + 0.05905 \\ &= 0.15210 \text{ in.} \end{aligned}$$

MAWP at Input Thickness [MAWP]:

$$\begin{aligned} &= E * Sts(t - c) / r - \text{Liquid Pressure} \\ &= 1.00 * 18000 (0.2756 - 0.0591) / 315.0 - 2.417 \\ &= 9.958 \text{ lbs/in}^2 \end{aligned}$$

Nominal Required Plate Thickness per Table 5-6: 0.25000 in.

Required Thickness due to Internal Pressure for Course # 5:

Determine unit Forces T1 and T2 per API 620:

Longitudinal Unit Force per API 620 5.10.2.5(c) [T1]:

$$\begin{aligned} &= (Rs/2) (P - W/At) \\ &= (314.961/2) (2.901 - 84064.2/311646.6) \\ &= 414.343 \text{ lbs/in.} \end{aligned}$$

Circumferential Unit Force [T2]:

$$\begin{aligned} &= (P + Pstatic)Rs \\ &= (2.901 + 4.834) 315.0 \end{aligned}$$

APLICACIÓN INFORMÁTICA PARA EL DIMENSIONAMIENTO INTEGRAL DE TANQUES
MEDIANTE LA NORMA API 620.

LUIS JULIO MARTÍNEZ BARTHE

$$= 2436.045 \text{ lbs/in.}$$

Required Thickness per 5.10.3.2:

$$\begin{aligned} &= \max(T1, T2) / (Sts * E) + c \\ &= \max(414.343, 2436.045) / (18000.0 * 1.00) + 0.05905 \\ &= 0.19439 \text{ in.} \end{aligned}$$

MAWP at Input Thickness [MAWP]:

$$\begin{aligned} &= E * Sts(t - c) / r - \text{Liquid Pressure} \\ &= 1.00 * 18000 (0.2756 - 0.0591) / 315.0 - 4.834 \\ &= 7.541 \text{ lbs/in}^2 \end{aligned}$$

Nominal Required Plate Thickness per Table 5-6: 0.25000 in.

Required Thickness due to Internal Pressure for Course # 4:

Determine unit Forces T1 and T2 per API 620:

Longitudinal Unit Force per API 620 5.10.2.5(c) [T1]:

$$\begin{aligned} &= (Rs/2) (P - W/At) \\ &= (314.961/2) (2.901 - 99287.6/311646.6) \\ &= 406.650 \text{ lbs/in.} \end{aligned}$$

Circumferential Unit Force [T2]:

$$\begin{aligned} &= (P + Pstatic)Rs \\ &= (2.901 + 7.250) 315.0 \\ &= 3197.245 \text{ lbs/in.} \end{aligned}$$

Required Thickness per 5.10.3.2:

$$\begin{aligned} &= \max(T1, T2) / (Sts * E) + c \\ &= \max(406.650, 3197.245) / (18000.0 * 1.00) + 0.05905 \\ &= 0.23668 \text{ in.} \end{aligned}$$

MAWP at Input Thickness [MAWP]:

$$\begin{aligned} &= E * Sts(t - c) / r - \text{Liquid Pressure} \\ &= 1.00 * 18000 (0.2756 - 0.0591) / 315.0 - 7.250 \\ &= 5.125 \text{ lbs/in}^2 \end{aligned}$$

Nominal Required Plate Thickness per Table 5-6: 0.25000 in.

Required Thickness due to Internal Pressure for Course # 3:

Determine unit Forces T1 and T2 per API 620:

APLICACIÓN INFORMÁTICA PARA EL DIMENSIONAMIENTO INTEGRAL DE TANQUES
MEDIANTE LA NORMA API 620.

LUIS JULIO MARTÍNEZ BARTHE

Longitudinal Unit Force per API 620 5.10.2.5(c) [T1]:

$$\begin{aligned} &= (R_s/2) (P - W/At) \\ &= (314.961/2) (2.901 - 116685.9/311646.6) \\ &= 397.859 \text{ lbs/in.} \end{aligned}$$

Circumferential Unit Force [T2]:

$$\begin{aligned} &= (P + P_{static}) R_s \\ &= (2.901 + 9.667) 315.0 \\ &= 3958.445 \text{ lbs/in.} \end{aligned}$$

Required Thickness per 5.10.3.2:

$$\begin{aligned} &= \max(T_1, T_2) / (S_{ts} * E) + c \\ &= \max(397.859, 3958.445) / (18000.0 * 1.00) + 0.05905 \\ &= 0.27897 \text{ in.} \end{aligned}$$

MAWP at Input Thickness [MAWP]:

$$\begin{aligned} &= E * S_{ts} (t - c) / r - \text{Liquid Pressure} \\ &= 1.00 * 18000 (0.3150 - 0.0591) / 315.0 - 9.667 \\ &= 4.958 \text{ lbs/in}^2 \end{aligned}$$

Required Thickness due to Internal Pressure for Course #2:

Determine unit Forces T1 and T2 per API 620:

Longitudinal Unit Force per API 620 5.10.2.5(c) [T1]:

$$\begin{aligned} &= (R_s/2) (P - W/At) \\ &= (314.961/2) (2.901 - 136258.9/311646.6) \\ &= 387.968 \text{ lbs/in.} \end{aligned}$$

Circumferential Unit Force [T2]:

$$\begin{aligned} &= (P + P_{static}) R_s \\ &= (2.901 + 12.084) 315.0 \\ &= 4719.646 \text{ lbs/in.} \end{aligned}$$

Required Thickness per 5.10.3.2:

$$\begin{aligned} &= \max(T_1, T_2) / (S_{ts} * E) + c \\ &= \max(387.968, 4719.646) / (18000.0 * 1.00) + 0.05905 \\ &= 0.32126 \text{ in.} \end{aligned}$$

MAWP at Input Thickness [MAWP]:

$$\begin{aligned} &= E * S_{ts} (t - c) / r - \text{Liquid Pressure} \\ &= 1.00 * 18000 (0.3543 - 0.0591) / 315.0 - 12.084 \\ &= 4.791 \text{ lbs/in}^2 \end{aligned}$$

APLICACIÓN INFORMÁTICA PARA EL DIMENSIONAMIENTO INTEGRAL DE TANQUES
MEDIANTE LA NORMA API 620.

LUIS JULIO MARTÍNEZ BARTHE

Required Thickness due to Internal Pressure for Course # 1:

Determine unit Forces T1 and T2 per API 620:

Longitudinal Unit Force per API 620 5.10.2.5(c) [T1]:

$$\begin{aligned} &= (R_s/2) (P - W/At) \\ &= (314.961/2) (2.901 - 160181.5/311646.6) \\ &= 375.880 \text{ lbs/in.} \end{aligned}$$

Circumferential Unit Force [T2]:

$$\begin{aligned} &= (P + P_{static}) R_s \\ &= (2.901 + 14.501) 315.0 \\ &= 5480.846 \text{ lbs/in.} \end{aligned}$$

Required Thickness per 5.10.3.2:

$$\begin{aligned} &= \max(T_1, T_2) / (S_{ts} * E) + c \\ &= \max(375.880, 5480.846) / (18000.0 * 1.00) + 0.05905 \\ &= 0.36355 \text{ in.} \end{aligned}$$

MAWP at Input Thickness [MAWP]:

$$\begin{aligned} &= E * S_{ts} (t - c) / r - \text{Liquid Pressure} \\ &= 1.00 * 18000 (0.4331 - 0.0591) / 315.0 - 14.501 \\ &= 6.874 \text{ lbs/in}^2 \end{aligned}$$

Required Area of the Roof/Shell Junction, Internal Pressure:

Decay Length Along the Roof [wh]:

$$\begin{aligned} &= 0.6 * \text{sqrt}(R_2 (t_h - c)) \\ &= 0.6 * \text{sqrt}(1813.786 (0.39370 - 0.05905)) \\ &= 14.78213 \text{ in.} \end{aligned}$$

Decay Length Along the Shell [wc]:

$$\begin{aligned} &= 0.6 * \text{sqrt}(R_c (t_c - c)) \\ &= 0.6 * \text{sqrt}(314.961 (0.27559 - 0.05906)) \\ &= 4.95501 \text{ in.} \end{aligned}$$

User Given Area Available in Roof/Shell Junction [Av]:

$$= 2.357 \text{ in}^2$$

Computed Area Available in Roof [ARoof]:

$$\begin{aligned} &= wh (t_h - c) \\ &= 14.782 (0.39370 - 0.05905) \\ &= 4.947 \text{ in}^2 \end{aligned}$$

APLICACIÓN INFORMÁTICA PARA EL DIMENSIONAMIENTO INTEGRAL DE TANQUES
MEDIANTE LA NORMA API 620.

LUIS JULIO MARTÍNEZ BARTHE

Computed Area Available in Shell [AShell]:

$$\begin{aligned}
 &= wc(tc - c) \\
 &= 4.955 (0.27559 - 0.05906) \\
 &= 1.073 \text{ in}^2
 \end{aligned}$$

Unit Circumferential Force at Top of Tank [T2s]:

$$\begin{aligned}
 &= P * Rc \\
 &= 2.901 * 314.961 \\
 &= 913.6 \text{ lbs/in.}
 \end{aligned}$$

Magnitude of Total Circumferential Force at Roof/Shell Junction [Q]:

$$\begin{aligned}
 &= T2*wh + T2S*wc - T1*Rc*\sin(\alpha) \\
 &= 5261.5 * 14.782 + 913.6 * 4.955 - 2519.0 * 315.0 * \sin(80.0) \\
 &= -699032.4 \text{ lbs}
 \end{aligned}$$

Required Area at Roof/Shell Junction [Ac]:

$$\begin{aligned}
 &= \max(\text{abs}(Q/15000), \text{abs}(Q/(Sts * E))) \\
 &= \max(\text{abs}(-699032.4/15000), \text{abs}(-699032.4/(18000.0 * 1.00))) \\
 &= \max(\text{abs}(-46.602), \text{abs}(-38.835)) \\
 &= 46.602 \text{ in}^2 \text{ [insufficient]}
 \end{aligned}$$

Additional Area Needed to Satisfy Reinforcing Requirements [AEx]:

$$\begin{aligned}
 &= Ac - Av \\
 &= 46.602 - 2.357 \\
 &= 44.245 \text{ in}^2
 \end{aligned}$$

Maximum Internal Pressure based on Roof Compression Area:

$$= 0.277 \text{ lbs/in.}^2$$

Summary of Internal Pressure Analysis:

| Shell Course # | Required Thickness cm. | Analysis Thickness cm. | Computed Internal MAWP KPa | Maximum MAWP per Code KPa |
|----------------|------------------------|------------------------|----------------------------|---------------------------|
| 7 | 0.6350 | 0.7000 | 85.3208 | 85.3208 |
| 6 | 0.6350 | 0.7000 | 68.6579 | 68.6579 |
| 5 | 0.6350 | 0.7000 | 51.9950 | 51.9950 |
| 4 | 0.6350 | 0.7000 | 35.3321 | 35.3321 |
| 3 | 0.7086 | 0.8000 | 34.1819 | 34.1819 |
| 2 | 0.8160 | 0.9000 | 33.0318 | 33.0318 |
| 1 | 0.9234 | 1.1000 | 47.3945 | 47.3945 |
| Roof | 0.8925 | 1.0000 | 22.8364 | 22.8364 |

APLICACIÓN INFORMÁTICA PARA EL DIMENSIONAMIENTO INTEGRAL DE TANQUES
MEDIANTE LA NORMA API 620.

LUIS JULIO MARTÍNEZ BARTHE