

Proyecto Fin de Grado

Ingeniería de Tecnologías Industriales

Diseño Automático de Tanques de Acero con Techo Fijo, según API 650

Autor: Christian Jódar Arce

Tutor: Jose Manuel Galán Fernández

**Dep. Ingeniería de la Construcción y Proyectos
de Ingeniería
Universidad de Sevilla**

Sevilla, 2015



Diseño Automático de Tanques de Acero

Autor:

Christian Jódar Arce

Tutor:

Jose Manuel Galán Fernández

Profesor titular

Dep. Ingeniería de la Construcción y Proyectos de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2015

Proyecto Fin de Grado: Diseño Automático de Tanques de Acero

Autor: Christian Jódar Arce

Tutor: Jose Manuel Galán Fernández

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

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2015

El Secretario del Tribunal

A mi familia

A mi pareja

A mi tutor

Agradecimientos

En primer lugar quiero agradecer a mi tutor, José Manuel Galán Fernández, por la paciencia y dedicación que me ha prestado en la realización de este proyecto fin de grado, así como permitirme realizar este trabajo, el cual me ha sido muy útil para aumentar mis conocimientos sobre materia de estructuras y construcción, y culmina un duro trabajo que empezó hace 4 años. Le doy las gracias también, no sólo por la ayuda recibida en este proyecto, sino también por el resto de asignaturas que me ha impartido y me ayudaron a tomar la decisión de realizar mi proyecto fin de grado con él, así como la ayuda recibida en otras materias en las que sus consejos me resultaron muy útiles.

Por supuesto también quiero agradecer este trabajo a mi familia, la cual me ha apoyado a lo largo de toda mi vida en todas las decisiones importantes que he tomado. Les doy las gracias por permitirme realizar unos estudios, que en mi opinión son un privilegio hoy en día. Por último también le quiero agradecer todo el apoyo recibido a mi pareja, la cual me ha dado fuerzas para seguir adelante en los momentos difíciles y me ha prestado su ayuda cuando realmente la necesitaba.

Christian Jódar Arce

Sevilla, 2015

Resumen

En el presente proyecto se describe el procedimiento de diseño de tanques atmosféricos verticales de tipo cilíndrico y fondo plano para el almacenamiento de crudo, productos derivados del petróleo y otros productos líquidos, de acuerdo a la norma *API 650-2007 “Welded Steel Tanks for Oil Storage”*.

El trabajo realizado consiste en el desarrollo y programación de un algoritmo mediante el programa Matlab, el cual realiza los cálculos de forma automática para el diseño de los diferentes elementos estructurales de tanques según los requisitos de la normativa mencionada.

Para este algoritmo general descrito según API 650, se ha realizado el cálculo de un tanque específico en base a unos datos iniciales para ilustrar los diferentes pasos de los que se compone el procedimiento de diseño, empleando el programa desarrollado; así como un diagrama de flujo que representa la secuencia de pasos generales a seguir para diseñar cada elemento del tanque.

Finalmente se han realizado varios modelos de elementos finitos en el programa Ansys para el estudio de diversas partes específicas del tanque que requieren un análisis más preciso. Los modelos realizados son:

- Análisis de esfuerzos sobre los arriostramientos entre rigidizadores de cubierta para el cálculo de los mismos.
- Análisis de la unión cuerpo-fondo del tanque sometido a la presión del producto.

Índice

Agradecimientos	5
Resumen	6
Índice	7
Índice de Tablas	11
Índice de Figuras	12
Abreviaturas	14
Preliminares	15
<i>Introducción</i>	15
<i>Objetivos</i>	15
<i>Limitaciones</i>	15
<i>Organización del proyecto</i>	16
1 Generalidades	17
1.1 <i>Tipo de Tanque</i>	17
1.2 <i>Materiales</i>	17
1.3 <i>Montaje</i>	18
1.4 <i>Prueba</i>	18
1.5 <i>Economía</i>	18
1.6 <i>Uniones y Soldaduras</i>	18
1.6.1 <i>Uniones Verticales y Horizontales entre Virolas</i>	19
1.6.2 <i>Unión Cuerpo-Fondo del Tanque</i>	20
1.6.3 <i>Uniones Solapadas-Soldadas entre Chapas del Fondo del Tanque</i>	21
1.6.4 <i>Uniones Solapadas-Soldadas entre Anillos Anulares</i>	21
1.6.5 <i>Juntas de Cubierta y del Ángulo Superior</i>	22
1.7 <i>Accesorios</i>	23
1.8 <i>Datos Iniciales para la Resolución del Ejemplo de Diseño de un Tanque según la norma API 650</i>	24
2 Espesores de Virolas	27
2.1 <i>Nomenclatura</i>	27
2.2 <i>Diseño del Cuerpo del Tanque</i>	27
2.2.1 <i>General</i>	27
2.2.2 <i>Tensión Admisible</i>	28
2.2.3 <i>Cálculo del Espesor de cada Virola</i>	28
2.3 <i>Diagrama de Flujo del Cálculo de los Espesores de Virola</i>	30
2.4 <i>Ejemplo de Dimensionamiento del Cuerpo del Tanque</i>	30
3 Rigidizadores Secundarios en la Envolvente del Tanque	33
3.1 <i>Nomenclatura</i>	33
3.2 <i>Vigas Intermedias de Rigidización frente al Viento</i>	33
3.2.1 <i>Altura Máxima sin Rigidizar</i>	33
3.2.2 <i>Altura Transformada Equivalente</i>	34
3.3 <i>Verificación del Apéndice V de la norma API-650</i>	34

3.3.1	Placas Sin Rigidizar	34
3.4	<i>Diagrama de Flujo de la Rigidización de la Envolvente</i>	36
3.5	<i>Ejemplo de Dimensionamiento de la Rigidización de la Envolvente</i>	37
4	Fondo	39
4.1	<i>Nomenclatura</i>	39
4.2	<i>General</i>	39
4.3	<i>Espesor de la Chapa del Fondo del Tanque</i>	40
4.3.1	Espesor Adoptado	40
4.4	<i>Verificación del Apéndice V de la norma API-650</i>	41
4.5	<i>Chapa Anular de Fondo</i>	41
4.5.1	Ancho de la Chapa Anular	41
4.5.2	Espesor de la Chapa Anular	42
4.6	<i>Diagrama de Flujo del Cálculo del Fondo del Tanque</i>	43
4.7	<i>Ejemplo de Dimensionamiento del Fondo del Tanque</i>	43
5	Cubierta	45
5.1	<i>Nomenclatura</i>	45
5.2	<i>Diseño Simplificado de la Cubierta según EC-3 4-2</i>	48
5.2.1	General	48
5.3	<i>Procedimiento 1: Diseño de Cubierta Fija</i>	49
5.3.1	General	49
5.3.2	Geometría de la Cubierta del Depósito	49
5.3.3	Espesor Mínimo de la Chapa de Cubierta según API 650-2007 y EN 1993 Part 4-2, 2007	49
5.3.4	Tensión Admisible	50
5.3.5	Estructura de la Cubierta	50
5.4	<i>Procedimiento 2: Verificación de Pandeo Elástico de la Lámina de Cubierta para no disponer Rigidización según EN 1993 Part 4-2</i>	56
5.5	<i>Anillos Circunferenciales en Cubierta según EC-3</i>	57
5.5.1	Anillos Circunferenciales de Arriostramiento de Vigas	57
5.5.2	Anillos Circunferenciales de Compresión en la Unión Cuerpo-Cubierta	59
5.6	<i>Soporte Central de Cubierta según EN 1993 Part 4-2</i>	61
5.7	<i>Diagrama de Flujo del Cálculo de la Cubierta Fija</i>	63
5.8	<i>Ejemplo de Dimensionamiento de la Cubierta Fija</i>	66
5.8.1	Perfiles IPE utilizados del Catálogo de Arcelor Mittal	66
5.8.2	Perfiles L utilizados del Catálogo de Arcelor Mittal	68
5.8.3	Dimensionamiento de la Cubierta Fija con Estructura Rigidizadora	68
5.8.4	Dimensionamiento de la Cubierta Fija Autoportante sin Estructura Rigidizadora	74
5.8.5	Dimensionamiento de los Anillos Circunferenciales de Arriostramiento entre Rigidizadores	74
5.8.6	Dimensionamiento del Anillo Circunferenciales de la Unión Cuerpo-Cubierta	81
5.8.7	Dimensionamiento del Soporte Central	82
6	Verificación del Efecto del Viento	84
6.1	<i>Nomenclatura</i>	84
6.2	<i>Carga de Viento sobre el Tanque (Estabilidad frente al Vuelco)</i>	84
6.3	<i>Diagrama de Flujo de la Verificación del Efecto del Viento</i>	86
6.4	<i>Ejemplo de Verificación del Efecto del Viento</i>	87
7	Verificación del Efecto Sísmico	89
7.1	<i>Nomenclatura</i>	89
7.2	<i>General</i>	91
7.3	<i>Espesor Uniforme del Tanque y Centros de Gravedad de Fuerzas</i>	92
7.4	<i>Emplazamientos No Definidos en la Norma ASCE-7</i>	93
7.5	<i>Modificaciones por las Condiciones del Emplazamiento</i>	94
7.6	<i>Período de Vibración Estructural</i>	95

7.7	<i>Espectro de Respuesta de Aceleraciones</i>	96
7.8	<i>Factores de Diseño Sísmico</i>	97
7.9	<i>Diseño</i>	97
7.9.1	Cargas de Diseño	97
7.9.2	Peso Efectivo del Producto	98
7.9.3	Centro de Acción de Fuerzas Laterales Eficaces	98
7.10	<i>Efecto Sísmico Vertical</i>	99
7.11	<i>Fuerzas Dinámicas Circunferenciales en el Cuerpo del Tanque debido al Líquido</i>	99
7.12	<i>Momentos del Vuelco</i>	101
7.13	<i>Interacción Suelo-Estructura</i>	101
7.14	<i>Resistencia a las Cargas de Diseño</i>	101
7.14.1	Anclajes	101
7.14.2	Máxima Tensión de Compresión Longitudinal de Membrana en Virolas	105
7.14.3	Cimentación	106
7.14.4	Tensiones en el Aro del Cuerpo	106
7.15	<i>Detalles de los Requisitos</i>	107
7.15.1	Anclajes	107
7.16	<i>Resistencia al Deslizamiento</i>	107
7.17	<i>Diagrama de Flujo de la Verificación del Efecto Sísmico</i>	108
7.18	<i>Ejemplo de Verificación del Efecto Sísmico</i>	110
8	Anexo: Cálculo de Pesos	119
8.1	<i>Nomenclatura</i>	119
8.2	<i>Peso Efectivo del Tanque (DL)</i>	120
8.2.1	Peso de las Virolas que componen el Cuerpo del Tanque	120
8.2.2	Peso de la Placa de Fondo del Tanque	121
8.2.3	Peso del Anillo Anular del Fondo	121
8.2.4	Peso de la Placa de Cubierta	121
8.2.5	Peso de la Estructura Rigidizadora de Cubierta	121
8.2.6	Peso del Anillo Circunferencial de Compresión de la Unión Cuerpo-Cubierta	121
8.2.7	Peso del Soporte Central de Cubierta	121
8.2.8	Peso de los Anillos Circunferenciales de Arriostamiento entre Rigidizadores de Cubierta	121
8.3	<i>Peso del Líquido para la Verificación del Efecto del Viento, según API 650</i>	121
8.4	<i>Peso Total del Cuerpo del Tanque más Accesorios</i>	122
8.5	<i>Peso Total de la Cubierta Fija, Accesorios más el 10% de la Carga de Nieve</i>	122
8.6	<i>Peso Total del Fondo</i>	122
8.7	<i>Peso Efectivo de los Contenidos del Tanque con Densidad del Producto</i>	122
8.8	<i>Peso del Cuerpo del Tanque más la Estructura Rigidizadora de Cubierta que absorbe el Cuerpo del Tanque</i>	122
8.9	<i>Peso Efectivo del Tanque que contribuye a la Respuesta del Sismo</i>	122
8.10	<i>Ejemplo del Cálculo de Pesos</i>	123
9	Modelo de Elementos Finitos de la Unión Cuerpo-Fondo del Tanque	125
9.11	<i>Nomenclatura</i>	125
9.12	<i>Flexión Vertical del Cuerpo</i>	126
9.13	<i>Conexión Cuerpo-Fondo</i>	127
9.14	<i>Rotación y Esfuerzos en la Articulación</i>	128
9.15	<i>Análisis Analítico según la Teoría de H. Kroon</i>	129
9.15.1	Resolución Analítica	130
9.16	<i>Análisis Numérico mediante Ansys</i>	133
9.17	<i>Conclusiones</i>	139
	Conclusiones Generales	140
	Glosario	141

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1–1. Espesores de soldadura en función del espesor del primer anillo.	20
Tabla 1–2. Perfil mínimo del anillo circunferencial superior.	22
Tabla 2–1. Espesores mínimos de virola.	28
Tabla 4–1. Espesor del anillo anular en función del espesor y esfuerzo de la primera virola	42
Tabla 5–1. Área y módulo resistente en función de la clase de sección del perfil.	56
Tabla 5–2. Perfiles IPE utilizados (I).	66
Tabla 5–3. Perfiles IPE utilizados (II).	67
Tabla 5–4. Perfiles L utilizados.	68
Tabla 5–5. Optimización perfiles IPE y número de rigidizadores (I).	70
Tabla 5–6. Optimización perfiles IPE y número de rigidizadores (II).	70
Tabla 5–7. Optimización perfiles IPE y número de rigidizadores (III).	71
Tabla 7–1. Valor de F_a en función de la clase de sitio.	94
Tabla 7–2. Valor de F_v en función de la clase de sitio.	94
Tabla 7–3. Factores de modificación de respuesta para métodos ASD.	97
Tabla 7–4. Factor de importancia y clasificación del grupo sísmico.	97
Tabla 7–5. Ratio de anclaje, J.	103

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1. Tipos de soldaduras.	19
Figura 1-2. Detalles de soldaduras.	19
Figura 1-3. Tipos de juntas verticales y horizontales entre virolas.	20
Figura 1-4. Unión cuerpo-fondo del tanque.	21
Figura 1-5. Uniones entre chapas del fondo del tanque.	21
Figura 1-6. Uniones entre anillos anulares.	21
Figura 1-7. Uniones entre chapas de cubierta y cuerpo-cubierta.	22
Figura 1-8. Dimensiones del tanque elegido.	24
Figura 2-1. Diagrama de flujo para el cálculo de los espesores de virola.	30
Figura 3-1. Diagrama de flujo para la rigidización de la envolvente.	36
Figura 4-1. Requisitos unión virola de fondo-anillo anular.	41
Figura 4-2. Anillo anular de fondo.	42
Figura 4-3. Diagrama de flujo del cálculo del fondo del tanque.	43
Figura 5-1. Estructura del tanque.	48
Figura 5-2. Geometría de la cubierta esférica.	49
Figura 5-3. Coordenadas de la cubierta esférica del tanque.	54
Figura 5-4. Distribución de Cruces de San Andrés en la cubierta del tanque.	58
Figura 5-5. Áreas de participación en el anillo circunferencial de compresión.	60
Figura 5-6. Sección del soporte central de cubierta.	62
Figura 5-7. Diagrama de flujo del cálculo de la cubierta fija (Parte 1).	63
Figura 5-8. Diagrama de flujo del cálculo de la cubierta fija (Parte 2).	64
Figura 5-9. Diagrama de flujo del cálculo de los anillos circunferenciales de cubierta.	65
Figura 5-10. Diagrama de flujo del cálculo del soporte central de cubierta.	65
Figura 5-11. Disposición de anillos circunferenciales de arriostramiento.	75
Figura 5-12. Curvatura inicial del rigidizador debido a imperfecciones y fuerzas estabilizadoras equivalentes.	75
Figura 5-13. Modelo del sistema de arriostramiento incluido condiciones de contorno.	76
Figura 5-14. Conjunto de arriostramiento formado por montantes y diagonales en ambas direcciones.	76
Figura 5-15. Esfuerzos axiles en el caso 1.	77
Figura 5-16. Conjunto de arriostramiento formado por montantes y diagonales en un dirección.	77
Figura 5-17. Esfuerzos axiles en el caso 2.	78
Figura 5-18. Conjunto de arriostramiento formado por montantes y diagonales en la otra dirección.	78
Figura 5-19. Esfuerzos axiles en el caso 3.	79

Figura 5-20. Longitud del arriostramiento.	80
Figura 6-1. Momentos de vuelco sobre la unión cuerpo-fondo del tanque.	86
Figura 6-2. Diagrama de flujo de la verificación del efecto del viento.	86
Figura 7-1. Representación de los modos de vibración para sismo horizontal y movimiento del fluido en el tanque.	92
Figura 7-2. Espectro de respuesta definido.	93
Figura 7-3. Definición de las clases de sitio.	95
Figura 7-4. Altura de la ola sísmica causada por el modo convectivo de vibración del líquido.	96
Figura 7-5. Diagrama de flujo de la verificación del efecto sísmico.	108
Figura 7-6. Diagrama de flujo de tanques auto-anclados.	109
Figura 7-7. Diagrama de flujo de tanques anclados mecánicamente.	110
Figura 9-1. Deformación radial de la pared del tanque.	127

Abreviaturas

ASD	Método de diseño mediante tensiones admisibles
SRSS	Método del cortante total en la base en función del cortante de diseño en la base debido a las componentes impulsiva y convectiva del peso efectivo del tanque y sus contenidos

PRELIMINARES

Introducción

Actualmente la sociedad es dependiente de productos derivados del petróleo, como son los plásticos, pinturas, lubricantes, combustibles y otros productos, por tanto la industria petrolera ha experimentado un aumento que se traduce en la exigencia de construcciones de tanques de almacenamiento que sean capaces de albergar dichos productos de una manera eficiente, económica y segura, sin riesgos que pongan en peligro la vida humana y las instalaciones industriales que se encuentren alrededor.

En el ámbito de la ingeniería, los tanques verticales de tipo cilíndrico son construidos con la finalidad de almacenar dichos productos, soportando grandes presiones internas originadas por el volumen ocupado del líquido y presiones externas originadas por los factores climatológicos a los que está expuesto el tanque debido a su emplazamiento. La densidad del producto influye directamente en el dimensionamiento de los espesores de las virolas del cuerpo que conforman el tanque y el fondo del mismo.

Por ello, es necesario realizar el dimensionamiento de tanques que cumpla con los requisitos exigidos, acorde al procedimiento descrito por la norma *API 650-2007*, la cual es la más utilizada en este ámbito; así como las comprobaciones pertinentes de estabilidad del tanque en cuanto a los efectos climatológicos y sísmicos de la zona donde se sitúan.

Objetivos

El presente proyecto tiene por objeto describir los pasos necesarios para el diseño de un tanque de acero atmosférico de tipo cilíndrico y fondo plano, cumpliendo los requisitos exigidos en la norma *API 650-2007* para poder almacenar productos líquidos de forma segura. El resultado de esta etapa es establecer una metodología de diseño de las diferentes partes que componen un tanque en base a unos requisitos iniciales de diseño, y poder examinar factores como la zona sísmica y el efecto del viento.

Otro de los objetivos de este trabajo ha sido programar un algoritmo en Matlab para obtener de forma automática los datos necesarios para la construcción de un tanque de cualquier dimensión, acorde a la normativa anteriormente mencionada.

Como último objetivo, se realiza un modelo de la unión del cuerpo-fondo del tanque mediante Ansys para analizar la deformación de la pared del tanque debido a las presiones a las que está sometido.

Limitaciones

El procedimiento para la construcción de tanques atmosféricos descritos en este proyecto se limita únicamente al diseño de las distintas partes estructurales de dicho tanque para el almacenamiento del producto, sin contemplar el diseño de otras partes auxiliares como: bocas de entrada y salida del líquido a través de las tuberías, plataformas y escaleras para el acceso de personal de mantenimiento, drenaje, etc.

El diseño de tanques descritos resulta válido para el almacenamiento de productos a temperatura ambiente, por tanto no es válido para el almacenamiento de sales, los cuales varían fuertemente su temperatura a lo largo de la vida útil del tanque.

Otro aspecto tenido en cuenta en la realización del diseño del tanque es que el mismo apoya sobre una losa de cimentación suficientemente rígida, sin detallar el cálculo necesario para el dimensionamiento de dicha cimentación.

Organización del proyecto

El proyecto ha sido organizado por capítulos, dentro de los cuales se desarrolla el procedimiento de diseño de una parte estructural del tanque, de acuerdo a la normativa aplicable; junto con un anexo donde se especifican los cálculos realizados en función de los datos iniciales de un ejemplo concreto. En cada capítulo también se expone el algoritmo realizado en Matlab, empleado para el cálculo del tanque.

En el primer capítulo se definen las generalidades del trabajo como son el tipo de tanque escogido, los materiales empleados, la economía de dicha construcción y los datos iniciales utilizados para el diseño concreto del tanque.

En el último capítulo se desarrolla el análisis de elementos finitos de la unión cuerpo-fondo realizados mediante Ansys. El otro modelo del sistema de arriostramiento de cubierta realizado mediante Ansys se detalla en el capítulo 5.

Los distintos capítulos de los que se compone el proyecto y sus respectivos archivos Matlab son:

- **Capítulo 1:** Generalidades
Archivo Matlab: “*dato.m*”
- **Capítulo 2:** Espesores de las virolas que componen el cuerpo del tanque
Archivo Matlab: “*espesores_virolas.m*”
- **Capítulo 3:** Rigidizadores intermedios en la envolvente del cuerpo
Archivos Matlab: “*rigidizador_secundario.m*” y “*comprueba_rigidizador_secundario.m*”
- **Capítulo 4:** Fondo del tanque
Archivo Matlab: “*fondo.m*”
- **Capítulo 5:** Cubierta fija
Archivos Matlab: “*cubierta.m*”, “*comprueba_pandeo.m*”, “*área_reducida_clase4.m*”, “*clase_seccion.m*” y “*comprueba_soporte_central.m*”
- **Capítulo 6:** Verificación del efecto del viento
Archivo Matlab: “*verif_viento.m*”
- **Capítulo 7:** Verificación del efecto sísmico
Archivo Matlab: “*verif_sismico.m*”
- **Capítulo 8:** Anexo cálculo de pesos
Archivo Matlab: “*pesos.m*”
- **Capítulo 9:** Modelo de elementos finitos de la unión cuerpo-fondo del tanque
Archivo Matlab: “*articulación*.”

1 GENERALIDADES

Esta norma establece los requisitos mínimos para materiales, diseño, construcción y pruebas para tanques de almacenamiento cilíndricos verticales, apoyados sobre el suelo, cerrados o abiertos, soldados, de varios tamaños y capacidades, sometidos a presiones internas (aproximadamente la presión atmosférica) que no exceden el peso de la chapa de cubierta. Sólo es aplicable a tanques cuyo fondo está totalmente soportado uniformemente y a tanques de servicio no refrigerados con una temperatura máxima de operación de 93 °C.

Además, proporciona a la industria tanques seguros y razonadamente económicos para almacenar petróleo, productos derivados del petróleo y otros productos líquidos, sin limitar el tamaño de los mismos.

1.1 Tipo de Tanque

Para la realización de este proyecto se ha optado por el diseño de un tanque cilíndrico vertical de fondo plano, debido a que son los más utilizados en la industria, a un bajo coste, para almacenar grandes volúmenes de productos para su posterior procesamiento y comercialización, limitados a presiones atmosférica o relativamente pequeñas. Los tanques horizontales quedan restringidos para volúmenes de líquido más pequeño, además de experimentar fallas en corte y flexión.

Además, actualmente los tanques verticales pueden clasificarse según el tipo de cubierta como:

- **Cubiertas fijas:** son utilizados para el almacenamiento de productos no volátiles como son el agua, petróleo crudo, etc. Además, se impide que el polvo, agua de lluvia y otros elementos puedan perturbar la composición del producto. Se clasifican a su vez en cubiertas cónicas o esféricas que pueden ser autoportantes o soportados por una estructura.
- **Cubiertas flotantes:** estas cubiertas son apropiadas para almacenar productos volátiles como el alcohol, gasolina, etc. Con este sistema se elimina la cámara de aire entre el nivel del líquido y la cubierta, reduciendo la formación de gases inflamables que contaminan el ambiente. Además, suelen ser sistemas de flotación que está patentados y su diseño requiere información que está en posesión de los titulares de esas patentes.
- **Sin cubierta:** estos tanques se utilizan para almacenar productos donde no es un problema su contaminación al exponerse al ambiente atmosférico y tampoco es importante su evaporación al mismo.

En este trabajo se desarrollan los pasos a seguir para el diseño de una cubierta fija, tanto autoportante como soportada por una estructura rigidizadora, según las normas [1] y [2].

1.2 Materiales

En los tanques de acero para almacenamiento hay dos alternativas en cuanto a la elección del material:

- Acero inoxidable.
- Acero al carbono con imprimación.

El empleo de acero inoxidable supone el ahorro de la imprimación, la posibilidad de no tener que vaciar el tanque para su inspección durante la vida útil del tanque y la no consideración de espesores de sobrecorrosión. Tres aspectos que inciden directamente en el coste de fabricación del tanque y explotación de la planta. Por el contrario, el acero inoxidable requiere un mayor espesor de pared para soportar la misma presión y, lo que es más importante, su precio es sensiblemente más caro que el acero al carbono.

El empleo de acero al carbono con imprimación en el 100% de su superficie interior supone el tener que vaciar el tanque y acceder a su interior cada 10-12 años de operación.

Las placas de acuerdo con *EN 10025* en los grados S 275 y S 355 son aceptables dentro de las siguientes limitaciones:

- Grado S 275 en calidades J0 y J2 para placas con un espesor máximo de 40 mm.
- Grado S 355 en calidades J0, J2 y K2 para placas con un espesor máximo de 45 mm.

1.3 Montaje

Antes de construir el tanque, lo primero que debe realizarse es una losa de hormigón sobre la que se soporta. Una vez realizada la cimentación, se dispone el plato base del tanque y el anillo anular perimetral que recibe la carga del cuerpo, y se comienzan a montar las distintas virolas que componen dicho cuerpo. Por último se procede a la construcción de la cubierta y los anillos circunferenciales que dan rigidez al conjunto.

1.4 Prueba

Una vez finalizado el tanque y recibido la conformidad de la inspección de las soldaduras, se procede a la prueba de fugas.

1.5 Economía

Una vez seleccionado el material, el coste del tanque viene determinado mayoritariamente por la cantidad de acero utilizado en él. En general, para tanques bajos y muy anchos, se necesita un espesor de virola no demasiado elevado. Sin embargo, el radio del tanque provoca que la superficie exterior del mismo aumente. Si al contrario, el tanque es demasiado alto, el espesor de las virolas inferiores debe ser elevado, puesto que la presión del producto es mayor, aunque el radio del tanque sea más pequeño.

También hay que tener en cuenta que cuando el tanque es alto, las cargas de viento afectan más a la estructura.

1.6 Uniones y Soldaduras

Los distintos tipos de soldaduras que pueden ser empleados en este tipo de tanques se representan en la siguiente figura.

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

Figura 1-1. Tipos de soldaduras.

Un resumen de las diferentes uniones entre partes del tanque que se describen a continuación, se puede representar en la siguiente imagen.

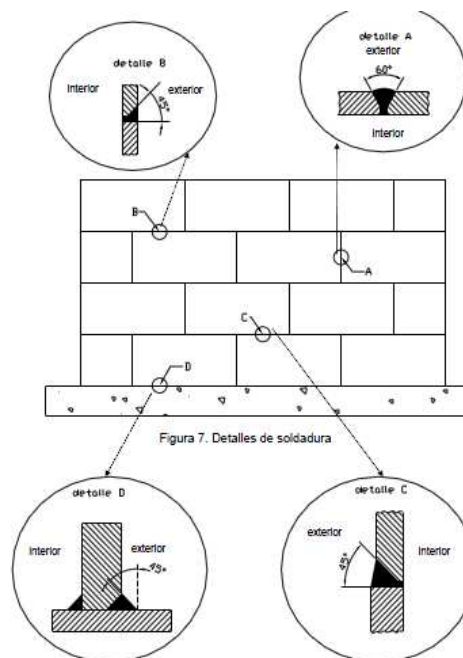


Figura 1-2. Detalles de soldaduras.

La soldadura entre virolas del mismo nivel se representa en el detalle A; en el detalle B se muestra la soldadura entre virolas del mismo espesor colocadas en distintos niveles; la soldadura entre virolas de diferente espesor se representa en el detalle C; y en el detalle D se muestra la soldadura entre la virola y el fondo.

1.6.1 Uniones Verticales y Horizontales entre Virolas

Los anillos deben quedar perfectamente verticales. A menos que se especifique otra cosa, las placas de la envolvente en las juntas horizontales a tope tienen su eje vertical en común.

Las superficies interiores de todas las virolas deben coincidir en una misma vertical.

Las juntas verticales de los anillos adyacentes no deben ser colineales, estando separadas por una distancia mínima de $5 \cdot t$, siendo t el espesor de la placa más gruesa en la junta. El bisel en V o en U puede quedar hacia el interior o exterior de la envolvente.

Las juntas verticales deben ser juntas a tope, de penetración y fusión completa para conseguir doble soldadura

o por otros métodos con los cuales se obtenga la misma calidad de depósito de soldadura en el interior y exterior de las superficies a soldar.

Las juntas horizontales deben ser de penetración y fusión completas también, o uniendo los ángulos superiores a traslape con la envolvente con doble soldadura.

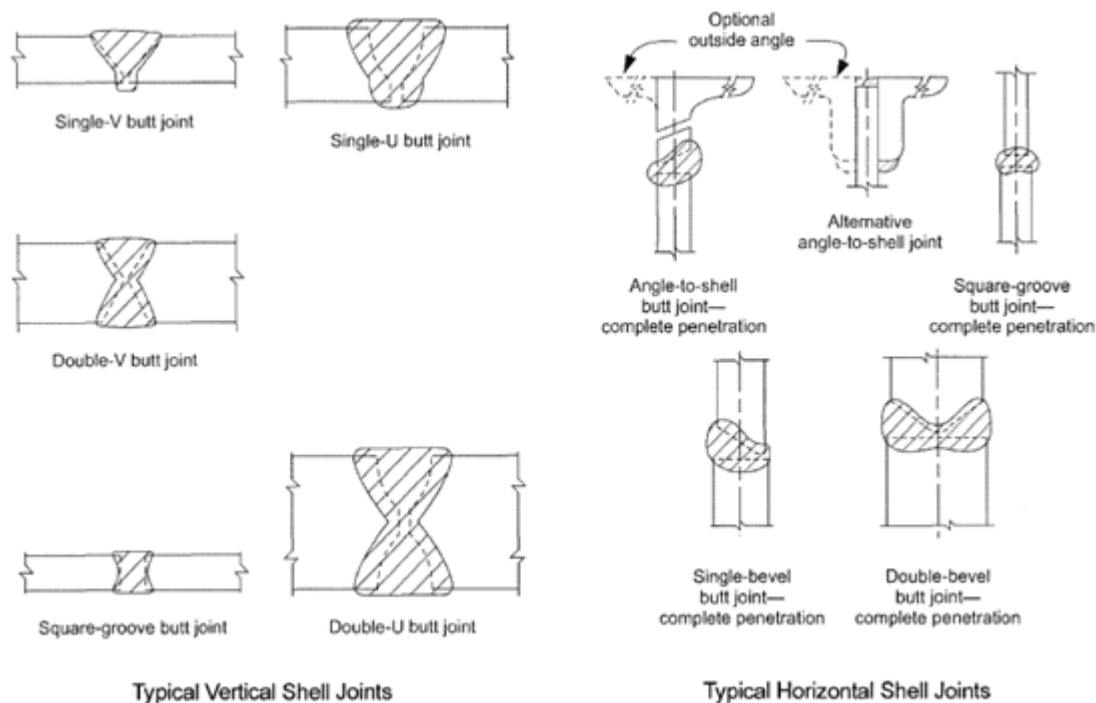


Figura 1-3. Tipos de juntas verticales y horizontales entre virolas.

1.6.2 Unión Cuerpo-Fondo del Tanque

La fijación del borde inferior del primer anillo de la envolvente con las placas del fondo debe hacerse con soldadura de filete continuo sobre ambos lados de la placa de la envolvente. El tamaño de cada soldadura de filete no debe ser mayor de 13 mm ni menor que el espesor de la placa más delgada en la junta, de acuerdo con los valores mínimos que se indican a continuación:

Tabla 1–1. Espesores de soldadura en función del espesor del primer anillo.

Espesor nominal de la virola de fondo (mm)	Tamaño mínimo del cordón de soldadura (mm)
5	5
$5 < t_s \leq 20$	6
$20 < t_s \leq 32$	8
$t_s > 32$	10

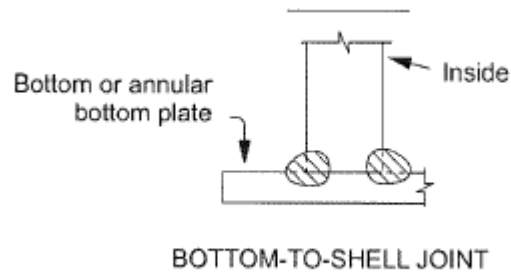


Figura 1-4. Unión cuerpo-fondo del tanque.

1.6.3 Uniones Solapadas-Soldadas entre Chapas del Fondo del Tanque

Las chapas del fondo serán razonablemente rectangulares, con longitudes y anchos comerciales, bordes rectangulares o laminados y se colocarán solapadas para evitar las deformaciones que se pueda presentar en la cimentación. Las placas de fondo tendrán sus bordes paralelos preparados para soldarlos a tope, ya sea con ranura cuadrada o en V, logrando una penetración completa.

La unión entre placas mediante otra placa se realizará con un ancho mínimo de 300 mm de la placa y una distancia mínima de la pared del tanque de 300 mm.

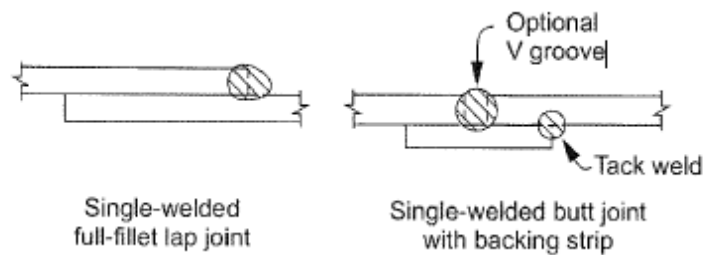


Figura 1-5. Uniones entre chapas del fondo del tanque.

1.6.4 Uniones Solapadas-Soldadas entre Anillos Anulares

Se dispondrán con un solape mínimo entre placas de 300 mm, con una completa penetración y fusión de la soldadura.

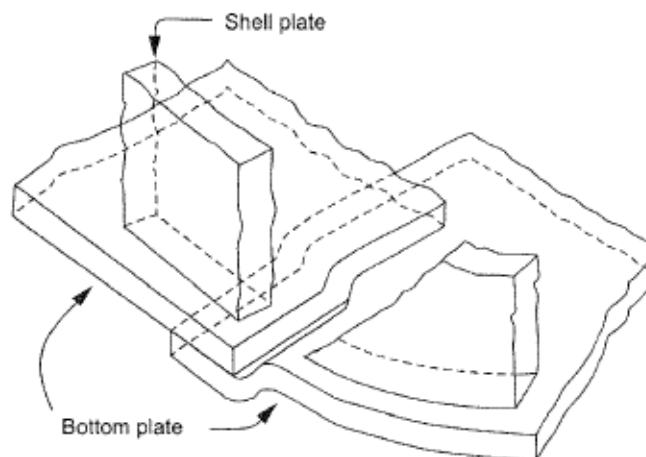


Figura 1-6. Uniones entre anillos anulares.

1.6.5 Juntas de Cubierta y del Ángulo Superior

Estas uniones dependen de los siguientes requisitos:

- Las placas de cubierta, como mínimo, deben soldarse con un filete de soldadura completo y continuo sobre todas las juntas en la parte superior. También se permiten las soldaduras a tope.
- Las placas de cubierta se deben soldar al ángulo superior del tanque con soldadura de filete continuo, solamente sobre el lado superior.
- El ángulo superior mínimo que se dispone en la parte superior del cuerpo del tanque será:

Tabla 1-2. Perfil mínimo del anillo circunferencial superior.

Díámetro nominal del tanque, D (m)	Tamaño mínimo del angular superior (mm)
$D \leq 11$	50 x 50 x 5
$11 < D \leq 18$	50 x 50 x 6
$D > 18$	75 x 75 x 10

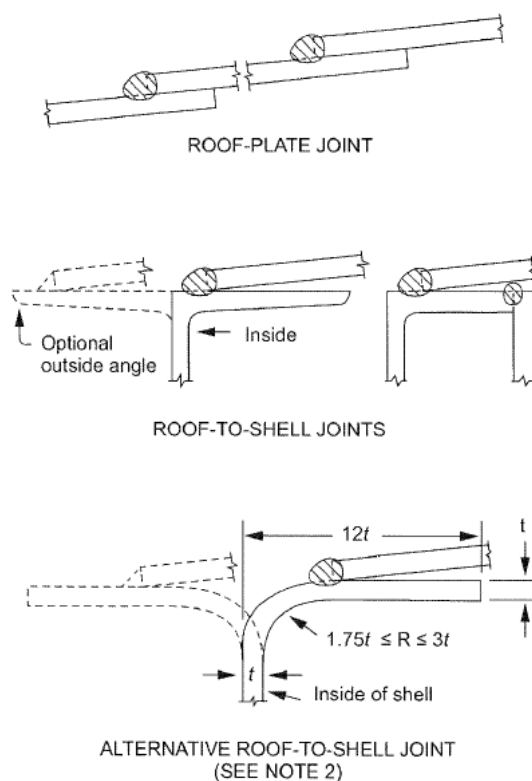


Figura 1-7. Uniones entre chapas de cubierta y cuerpo-cubierta.

1.7 Accesorios

Los accesorios necesarios para el diseño del tanque son:

- Boquillas
- Escaleras y Plataformas
- Conexión a tierra

Todos los tanques de almacenamiento deben disponer de las boquillas mínimas listadas a continuación:

- Entrada y salida de producto
- Entrada de personal de mantenimiento
- Drenaje (con o sin sumidero)
- Venteo

Las escaleras, plataformas y barandillas tienen la finalidad de situar al personal en una zona del tanque que necesite de constante mantenimiento o supervisión, generalmente sobre el techo donde se localizan diversas boquillas y la entrada del hombre, además de brindar protección y seguridad al personal.

La conexión a tierra se efectúa para proteger el tanque de las descargas eléctricas originadas por rayos, por campos electrostáticos producidos por formaciones nubosas densamente cargadas o por el fluido dentro del tanque, evitando de esta forma potenciales eléctricos que ocasionen chispas e incendios del producto almacenado.

El elemento de venteo es fundamental para evitar el riesgo que las variaciones de presión que sufre el tanque en el vaciado y llenado afecten a la estructura. El vaciado del tanque crea un vacío interno que se tiene que compensar con la entrada de aire del exterior para evitar problemas de inestabilidades en paredes y techos que deformarían la estructura. Por el contrario, el llenado contribuye a un aumento de presión interna si no se consigue evacuar el aire suficiente y puede conllevar a problemas más graves que en el vaciado (incluso la rotura).

La entrada de personal se situará en cubierta, a la que se accede a través de una escalera alrededor del tanque para permitir la inspección en servicio de la superficie interna del tanque; y otra próxima al fondo para permitir las tareas de mantenimiento.

El drenaje se situará próximo al fondo para evacuar el producto almacenado. También es útil para controlar la presión interna.

Se situará otra tubería cerca del techo para permitir la evacuación del líquido si se supera el nivel máximo establecido en las condiciones de diseño.

En el desarrollo de este trabajo no se dimensionarán los elementos antes mencionados, ya que se centra sólo en las partes estructurales de los tanques.

1.8 Datos Iniciales para la Resolución del Ejemplo de Diseño de un Tanque según la norma API 650

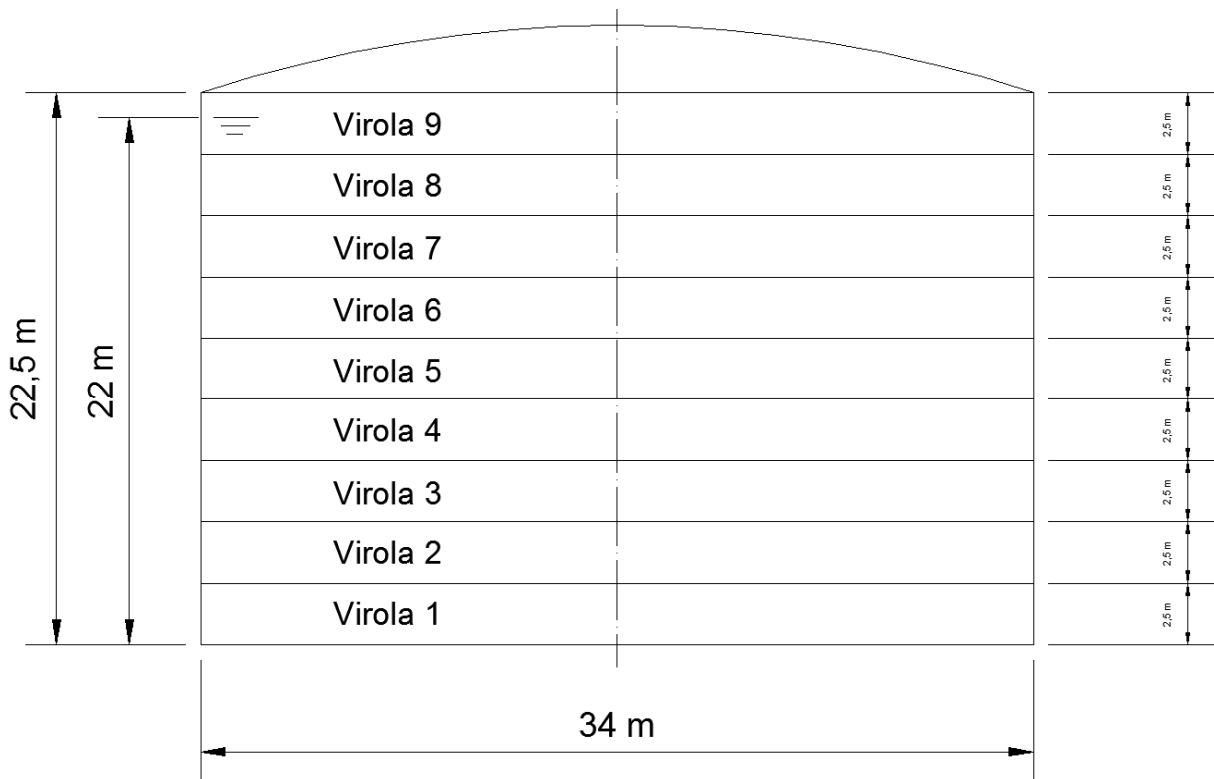


Figura 1-8. Dimensiones del tanque elegido.

Los datos relativos a la geometría del tanque son los siguientes:

- El tanque tendrá un diámetro de 34 m.
- Los espesores de sobrecorrosión para las virolas, el fondo y la cubierta son 1, 2 y 1 mm, respectivamente.
- El número de virolas que componen el cuerpo del tanque son 9.
- La altura de cada virola será de 2,5 m, por tanto la altura total del cuerpo del tanque es de 22,5 m.
- El tipo de suelo considerado según la norma [1] es tipo C.
- El grupo sísmico al que pertenece el tanque es **SUG I**.

Los datos relativos a las características del líquido que almacena el tanque son:

- La altura máxima del nivel del líquido es de 22 m, disponiendo una cámara de 0,5 m de altura donde se concentran los gases.
- La densidad específica del producto es de 1100 kg/m^3 .

Las fuerzas consideradas que actúan sobre el tanque son:

- La velocidad del viento se considera igual a 162 km/h.
- La presión de diseño externa en vacío es de -0.5 kPa.
- La sobrecarga de nieve es igual a 0.4 kPa.
- La presión de diseño interna debido a los gases es de 2 kPa.
- La aceleración de cálculo considerada para el análisis sísmico según la zona es de 0.04.
- El esfuerzo axial máximo que actúa en los elementos de arriostramiento, según el análisis realizado en Ansys, es igual a 8.22 kN.

Por último se definen las características del acero empleado en cada parte del tanque.

- El límite elástico y el límite último del acero S 355 J2 empleado en las virolas son 355 y 470 MPa, respectivamente.
- El límite elástico y el límite último del acero S 275 JR empleado en las chapas del fondo del tanque son 275 y 430 MPa, respectivamente.
- El límite elástico y el límite último del acero S 275 JR empleado en los elementos de cubierta del tanque son 275 y 430 MPa, respectivamente.
- El módulo de elasticidad es 210,000 MPa.
- La densidad del acero es 7850 kg/m³.

2 ESPESORES DE VIOLAS

Existen dos métodos para calcular el espesor de las virolas que componen la envolvente de un tanque, los cuales son definidos a continuación. Cada método aplica dos procedimientos de diseño del espesor: por condición de diseño en base al nivel del líquido, tomando la densidad relativa del producto a almacenar; y por condiciones de prueba hidrostática considerando el mismo nivel de diseño, pero utilizando la densidad relativa del agua. La opción más desfavorable permite obtener el espesor óptimo.

Este capítulo que describe el diseño de la envolvente del tanque está definido en el apartado 5.6 de la norma [1].

2.1 Nomenclatura

CA	Espesor de sobre corrosión de virola [mm]
D	Diámetro del tanque [m]
dw	Densidad del producto [kg/m ³]
F _u	Resistencia mínima de agotamiento a tracción del acero del cuerpo [MPa]
F _y	Límite elástico del acero del cuerpo [MPa]
G	Gravedad específica de diseño del líquido [-]
H _w	Altura del nivel de líquido dentro del depósito [m]
n _{vir}	Número de virolas que componen el cuerpo del tanque
S _d	Tensión de diseño del producto [MPa]
S _t	Tensión de prueba hidrostática [MPa]
t _{adopt}	Espesores adoptados en las virolas que componen el cuerpo del tanque [mm]
t _d	Espesor de diseño de la virola “i” [mm]
t _i	Espesor de prueba hidrostática de la virola “i” [mm]

2.2 Diseño del Cuerpo del Tanque

2.2.1 General

El espesor del cuerpo del tanque requerido será mayor que el espesor de diseño de virola, t_d , incluyendo cualquier sobreespesor de corrosión, y mayor que el espesor de prueba hidrostática, t_i , pero no menor que los siguientes:

Tabla 2–1. Espesores mínimos de virola.

Diámetro nominal del tanque, D (m)	Espesor nominal de virola (mm)
$D < 15$	5
$15 < D \leq 36$	6
$36 < D \leq 60$	8
$D > 60$	10

Notas:

1. A menos que se especifique lo contrario por parte del cliente, el diámetro nominal del tanque será el diámetro desde el eje del tanque hasta la línea central de la virola de fondo.
2. Para diámetros del tanque inferiores a 15 m, pero mayores que 3.2 m, el espesor nominal de la virola más delgada no será menor de 6 mm.

A menos que se acuerde lo contrario con el cliente, el ancho nominal mínimo de cada virola será de 1800 mm.

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

La proyección de la superficie interior de cada virola no deberá sobresalir más que la proyección de la superficie interior de la virola inferior.

El tanque será comprobado frente a estabilidad por pandeo debido al viento. Si se requiere por estabilidad, se dispondrán rigidizadores intermedios y/o se incrementarán los espesores de cada virola.

Las cargas radiales aisladas en el cuerpo del tanque, tales como las causadas por cargas pesadas en plataformas y pasarelas elevadas entre tanques, se distribuirán sobre perfiles laminados estructurales.

2.2.2 Tensión Admisible

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

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

$$S_d = \min\left(\frac{2}{3} * F_y, \frac{2}{5} * F_u\right) \quad (2-1)$$

$$S_t = \min\left(\frac{3}{4} * F_y, \frac{3}{7} * F_u\right) \quad (2-2)$$

2.2.3 Cálculo del Espesor de cada Virola

Para tanques con un diámetro inferior a 61 m, el método de cálculo de los espesores de virola es el “**Método del Pie**”. Para tanques con un diámetro superior a 61 m, el método de diseño utilizado para el cálculo de los espesores de las virolas es el “**Método del Punto Variable**”. En el desarrollo de este proyecto se emplea el primer método.

Otro método de cálculo de los espesores es mediante “**Análisis Elástico**”. Este método se emplea en tanques donde la relación L/H es mayor que 1000/6, y muestra las tensiones circunferenciales calculadas en el cuerpo que son inferiores a las tensiones admisibles. Las condiciones de contorno para este análisis asumen un momento plástico completo causado por la fluencia de la chapa bajo el cuerpo y un crecimiento radial nulo.

2.2.3.1 Método del Pie

El método del pie calcula los espesores requeridos en un punto de diseño situado a 0.3 m sobre el fondo de cada virola.

Los espesores mínimos requeridos de cada virola serán mayores que los calculados mediante las siguientes expresiones:

$$t_d = \frac{4.9 * D * (H_w - 0.3) * G}{S_d} + CA \quad (2-3)$$

$$t_t = \frac{4.9 * D * (H_w - 0.3)}{S_t} \quad (2-4)$$

La altura del nivel del líquido, H_w , para el cálculo del espesor de cada virola se mide desde la parte inferior de la virola objeto de cálculo.

La gravedad específica de diseño del líquido a almacenar será especificada por el cliente.

$$G = \frac{dw}{1000} \quad (2-5)$$

2.3 Diagrama de Flujo del Cálculo de los Espesores de Virola

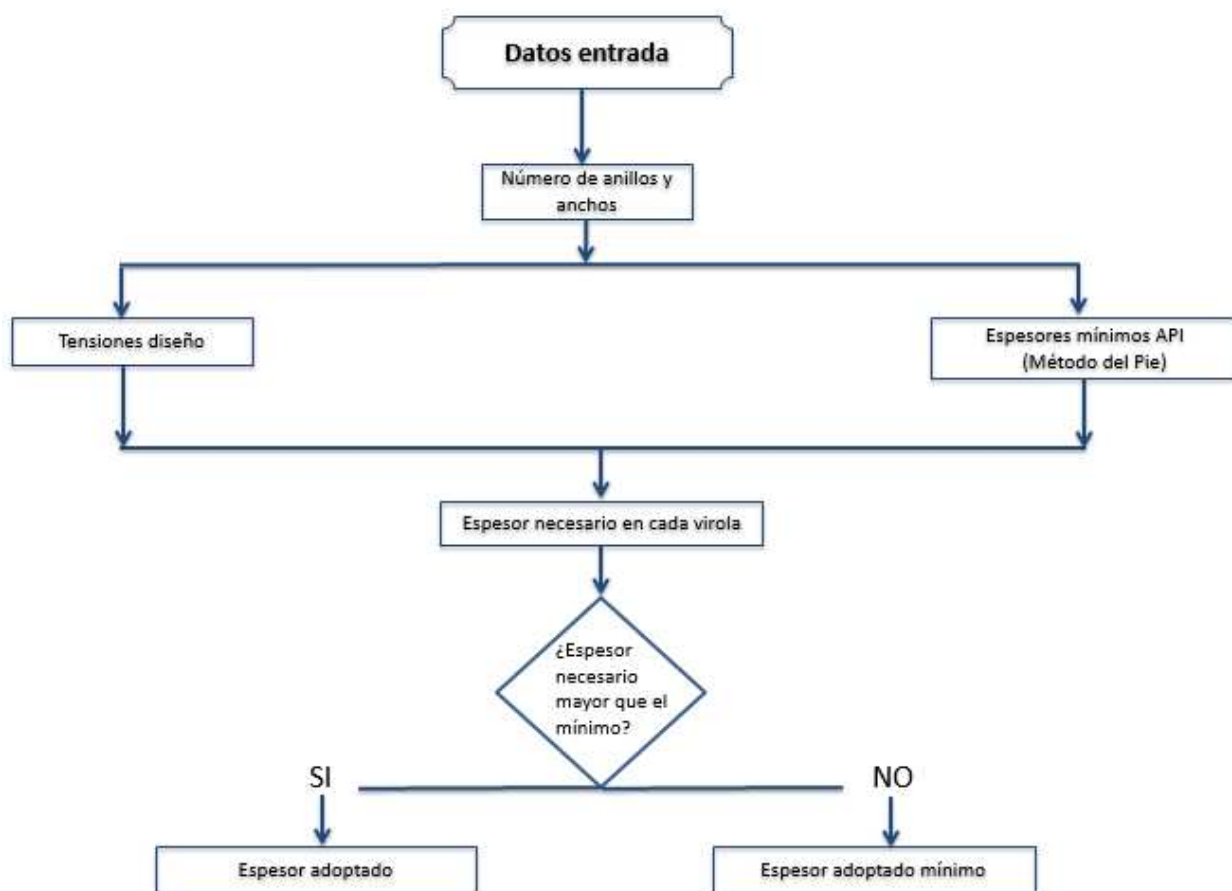


Figura 2-1. Diagrama de flujo para el cálculo de los espesores de virola.

2.4 Ejemplo de Dimensionamiento del Cuerpo del Tanque

Para la realización de las virolas se empleará un acero S 355 J2.

Puesto que el diámetro del tanque es inferior a 61 m, se aplicará el Método del Pie para calcular los espesores de las virolas que componen el cuerpo del tanque.

El espesor mínimo de virola según la tabla 2-1 para un diámetro de 34 m es de 6 mm.

Las tensiones básicas de cálculo, de diseño y de prueba hidrostática respectivamente, según las ecuaciones 2-1 y 2-2 son:

$$S_d = \min \left(\frac{2}{3} * 355, \frac{2}{5} * 470 \right) = \min(236.7, 188) = 188 \text{ MPa}$$

$$S_t = \min \left(\frac{3}{4} * 355, \frac{3}{7} * 470 \right) = \min(266.3, 201.4) = 201.4 \text{ MPa}$$

La gravedad específica del producto según la ecuación 2-5 es:

$$G = \frac{1100}{1000} = 1.1$$

El espesor de cada una de las 9 virolas que componen el cuerpo será el mayor valor obtenido entre las ecuaciones 2-3, 2-4 y el espesor mínimo estipulado.

- Virola 1:

$$t_d = \frac{4.9 * 34 * (22 - 0.3) * 1.1}{188} + 1 = 22.2 \text{ mm}$$

$$t_t = \frac{4.9 * 34 * (22 - 0.3)}{201.4} = 18 \text{ mm}$$

$$t_{adopt,1} = \text{máx}(22.2, 18, 6) = 22.2 \text{ mm}$$

- Virola 2:

$$t_d = \frac{4.9 * 34 * (22 - 2.5 - 0.3) * 1.1}{188} + 1 = 19.8 \text{ mm}$$

$$t_t = \frac{4.9 * 34 * (22 - 2.5 - 0.3)}{201.4} = 15.9 \text{ mm}$$

$$t_{adopt,2} = \text{máx}(19.8, 15.9, 6) = 19.8 \text{ mm}$$

- Virola 3:

$$t_d = \frac{4.9 * 34 * (22 - 2.5 * 2 - 0.3) * 1.1}{188} + 1 = 17.3 \text{ mm}$$

$$t_t = \frac{4.9 * 34 * (22 - 2.5 * 2 - 0.3)}{201.4} = 13.9 \text{ mm}$$

$$t_{adopt,3} = \text{máx}(17.3, 13.9, 6) = 17.3 \text{ mm}$$

- Virola 4:

$$t_d = \frac{4.9 * 34 * (22 - 2.5 * 3 - 0.3) * 1.1}{188} + 1 = 14.9 \text{ mm}$$

$$t_t = \frac{4.9 * 34 * (22 - 2.5 * 3 - 0.3)}{201.4} = 11.8 \text{ mm}$$

$$t_{adopt,4} = \text{máx}(14.9, 11.8, 6) = 14.9 \text{ mm}$$

- Virola 5:

$$t_d = \frac{4.9 * 34 * (22 - 2.5 * 4 - 0.3) * 1.1}{188} + 1 = 12.5 \text{ mm}$$

$$t_t = \frac{4.9 * 34 * (22 - 2.5 * 4 - 0.3)}{201.4} = 9.7 \text{ mm}$$

$$t_{adopt,5} = \text{máx}(12.5, 9.7, 6) = 12.5 \text{ mm}$$

- Virola 6:

$$t_d = \frac{4.9 * 34 * (22 - 2.5 * 5 - 0.3) * 1.1}{188} + 1 = 10 \text{ mm}$$

$$t_t = \frac{4.9 * 34 * (22 - 2.5 * 5 - 0.3)}{201.4} = 7.7 \text{ mm}$$

$$t_{adopt,6} = \text{máx}(10, 7.7, 6) = 10 \text{ mm}$$

- Virola 7:

$$t_d = \frac{4.9 * 34 * (22 - 2.5 * 6 - 0.3) * 1.1}{188} + 1 = 7.6 \text{ mm}$$

$$t_t = \frac{4.9 * 34 * (22 - 2.5 * 6 - 0.3)}{201.4} = 5.6 \text{ mm}$$

$$t_{adopt,7} = \text{máx}(7.6, 5.6, 6) = 7.6 \text{ mm}$$

- Virola 8:

$$t_d = \frac{4.9 * 34 * (22 - 2.5 * 7 - 0.3) * 1.1}{188} + 1 = 5.1 \text{ mm}$$

$$t_t = \frac{4.9 * 34 * (22 - 2.5 * 7 - 0.3)}{201.4} = 3.5 \text{ mm}$$

$$t_{adopt,8} = \text{máx}(5.1, 3.5, 6) = 6 \text{ mm}$$

- Virola 9:

$$t_d = \frac{4.9 * 34 * (22 - 2.5 * 8 - 0.3) * 1.1}{188} + 1 = 2.7 \text{ mm}$$

$$t_t = \frac{4.9 * 34 * (22 - 2.5 * 8 - 0.3)}{201.4} = 1.5 \text{ mm}$$

$$t_{adopt,9} = \text{máx}(2.7, 1.5, 6) = 6 \text{ mm}$$

Los espesores resultantes de las virolas son:

$$t_{adopt} = [22.2, 19.8, 17.3, 14.9, 12.5, 10, 7.6, 6, 6] \text{ mm}$$

3 RIGIDIZADORES SECUNDARIOS EN LA ENVOLVENTE DEL TANQUE

Según la normativa existen dos maneras de resolver la rigidización de la envoltura del tanque frente al viento. Por un lado, se pueden disponer elementos rigidizadores intermedios y superior que impidan la deformación de las virolas. La otra forma de resolver el problema, la cual es la que se desarrolla en este capítulo, es aumentar el espesor de las virolas para evitar la rigidización de la envoltura, disponiendo únicamente de un rigidizador superior que se dimensionará en el capítulo 5.

Los pasos descritos a continuación se definen en el apartado 5.9 y apéndice V.8 de la norma [1].

3.1 Nomenclatura

D	Diámetro del tanque [m]
E	Módulo de Young del acero [MPa]
F _y	Límite elástico del acero del cuerpo [MPa]
H ₁	Altura máxima sin rigidizar [m]
h _i	Altura de cada virola [m]
n _{vir}	Número de virolas que componen el cuerpo del tanque
P _e	Presión de diseño externa en vacío [kPa]
P _s	Presión total de diseño [kPa]
t _{actual}	Espesor de la virola “i” [mm]
t _{adopt}	Espesores adoptados en las virolas que componen el cuerpo del tanque [mm]
t _{última virola}	Espesor de la virola más delgada situada en la parte superior del cuerpo [mm]
v	Velocidad de diseño del viento [km/h]
W	Presión máxima del viento [kPa]
W _{tr}	Altura transformada equivalente [m]
φ ₁ , φ ₂	Factores de estabilidad [-]

3.2 Vigas Intermedias de Rigidización frente al Viento

3.2.1 Altura Máxima sin Rigidizar

La altura máxima sin rigidizar del cuerpo del tanque entre viga intermedia y el anillo de compresión superior del cuerpo se calcula mediante la siguiente expresión:

$$H_1 = 9.47 * t_{\text{última virola}} * \sqrt{\left(\frac{t_{\text{última virola}}}{D}\right)^3 * \left(\frac{190}{v}\right)^2} \quad (3-1)$$

3.2.2 Altura Transformada Equivalente

Después de determinar la máxima altura del cuerpo sin rigidizar, la altura del cuerpo transformado será calculada según lo definido a continuación mediante la siguiente expresión, cambiando el ancho real de cada virola por un ancho traspuesto de cada virola que tiene el espesor de la virola superior (más delgada):

$$W_{tr} = \sum_1^{n_{vir}} h_{(i)} * \sqrt{\left(\frac{t_{\text{última virola}}}{t_{\text{actual (i)}}}\right)^5} \quad (3-2)$$

Para tanques con virolas de varios espesores, la altura transformada del cuerpo, W_{tr} , para el cuerpo del tanque es determinada de acuerdo con el siguiente procedimiento:

- La altura transformada del cuerpo es calculada como la suma de las anchuras transformadas de cada virola individual según lo descrito en b.
- El ancho transformado de cada virola individual es calculado mediante la multiplicación de la altura de virola actual por el ratio $(t_{s1}/t_{act})^{2.5}$. Para la virola superior del cuerpo $t_{s1}=t_{act}$.

Siempre que la altura transformada equivalente sea mayor que la altura máxima sin rigidizar será necesario disponer de rigidizadores intermedios en la envolvente del tanque.

Para el diseño del cuerpo del tanque desarrollado en esta memoria, se empleará un espesor de virola para no disponer de rigidizadores intermedios frente al viento, como se ha mencionado previamente. Si se optara por emplear rigidizadores intermedios, hay que cumplir los requisitos expuestos en el apartado 5.9.7 de la norma API 650-2007.

3.3 Verificación del Apéndice V de la norma API-650

Los procedimientos de diseño presentados en este apéndice están destinados a permitir al usuario evaluar el diseño de la placa de fondo, cuerpo y cubierta fija del tanque, que operan bajo condiciones de vacío parcial.

En este apartado se desarrolla la parte correspondiente al cuerpo del tanque sin rigidizar.

3.3.1 Placas Sin Rigidizar

El procedimiento utiliza el espesor nominal más delgado del cuerpo del tanque y el método del cuerpo transformado para establecer el número de refuerzos y donde se sitúan. Las ecuaciones definidas a continuación en este apartado contienen factores de estabilidad, ψ , que depende del valor de presión de diseño externa en vacío. Las ecuaciones también incluyen un factor de disminución igual a 0.8 para imperfecciones en la geometría del cuerpo del tanque. Las placas serán comprobadas frente a 2 condiciones:

- La combinación de viento más presión en vacío.
- Para presión en vacío únicamente.

Cada condición será comprobada usando el factor de estabilidad adecuado.

3.3.1.1 Factores de Estabilidad para Placas no Rigidizadas

- Condición 1:** tiene en cuenta la presión no uniforme (Viento + Presión de diseño externa en vacío)

Los valores que adopta ψ son:

1. Igual a 1 para el caso de viento más presión en vacío (cuando la presión en vacío (P_e) es menor o igual que 0.25 kPa). Para este caso el apéndice V no es obligatorio.
2. Igual a $(P_e + 0.70)/0.95$ para el caso de viento más presión en vacío (cuando la presión en vacío (P_e) es mayor que 0.25 kPa, pero menor o igual que 0.70 kPa).
3. Igual a $P_e/0.48$ para el caso de viento más presión en vacío (cuando la presión en vacío (P_e) es mayor que 0.70 kPa; sin embargo, ψ no necesita ser superior a 2.5).

$$\varphi_1 = \frac{[|P_e| + 0.70]}{0.95} \quad (3-3)$$

- **Condición 2:** tiene en cuenta la presión uniforme (Sólo presión de diseño externa en vacío)

El valor del factor de estabilidad para esta condición es independiente de la presión en vacío.

$$\varphi_2 = 3 \quad (3-4)$$

3.3.1.2 Criterio de Pandeo

Para cuerpos de tanques sin rigidización sujetos a una presión externa suficiente para causar pandeo, dicho pandeo ocurrirá elásticamente si se satisface el siguiente criterio. Si no se satisface este criterio, los efectos de la presión externa deberán evaluarse de acuerdo con los requisitos de la norma *ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section VIII, División 1*.

$$\left(\frac{D}{t_{\text{última virola}}}\right)^{0.75} * \left[\left(\frac{W_{tr}}{D}\right) * \left(\frac{F_y}{E}\right)^{0.5}\right] \geq 0.00675 \quad (3-5)$$

Siempre que se cumpla el criterio de pandeo elástico se pueden aplicar las expresiones que se definen a continuación.

3.3.1.3 Comprobación de P_e y P_s

La presión externa de diseño (usando el factor de estabilidad correspondiente) y la presión de vacío externa (usando $\psi = 3$) cumplirán las siguientes expresiones para tanques sin rigidizar.

$$P_s \leq \frac{E}{15.203 * \varphi_1 * \left(\frac{W_{tr}}{D}\right) * \left(\frac{D}{t_{\text{última virola}}}\right)^{2.5}} \quad (3-6)$$

$$P_e \leq \frac{E}{15.203 * \varphi_2 * \left(\frac{W_{tr}}{D}\right) * \left(\frac{D}{t_{\text{última virola}}}\right)^{2.5}} \quad (3-7)$$

La presión externa de diseño para el diseño del cuerpo, P_s , se define como el mayor valor entre:

1. La presión de diseño externa en vacío, P_e , excluyendo la carga de viento, W .

$$P_{s1} = |P_e| - W \quad (3-8)$$

2. $W + 0.4 * P_e$

$$W = 1.48 * \left(\frac{v}{190}\right)^2 \quad (3-9)$$

$$P_{s2} = W + 0.4 * |P_e| \quad (3-10)$$

La ecuación anterior puede ser reescrita para calcular el espesor nominal de la virola más delgada requerida para la presión externa de diseño especificada.

$$t_{\text{última virola}} \geq \frac{47.07 * (\text{máx}(\varphi_1 * P_s, \varphi_2 * P_e) * W_{tr})^{0.4} * D^{0.6}}{E^{0.4}} \quad (3-11)$$

La altura del cuerpo transformada es un modelo analítico del tanque real. El cuerpo transformado tiene un espesor uniforme igual al espesor de la virola superior del cuerpo y una altura igual a la altura transformada. Este modelo analítico del tanque real tendrá una resistencia equivalente al pandeo debido a la presión externa como en el tanque real.

3.4 Diagrama de Flujo de la Rigidización de la Envoltente

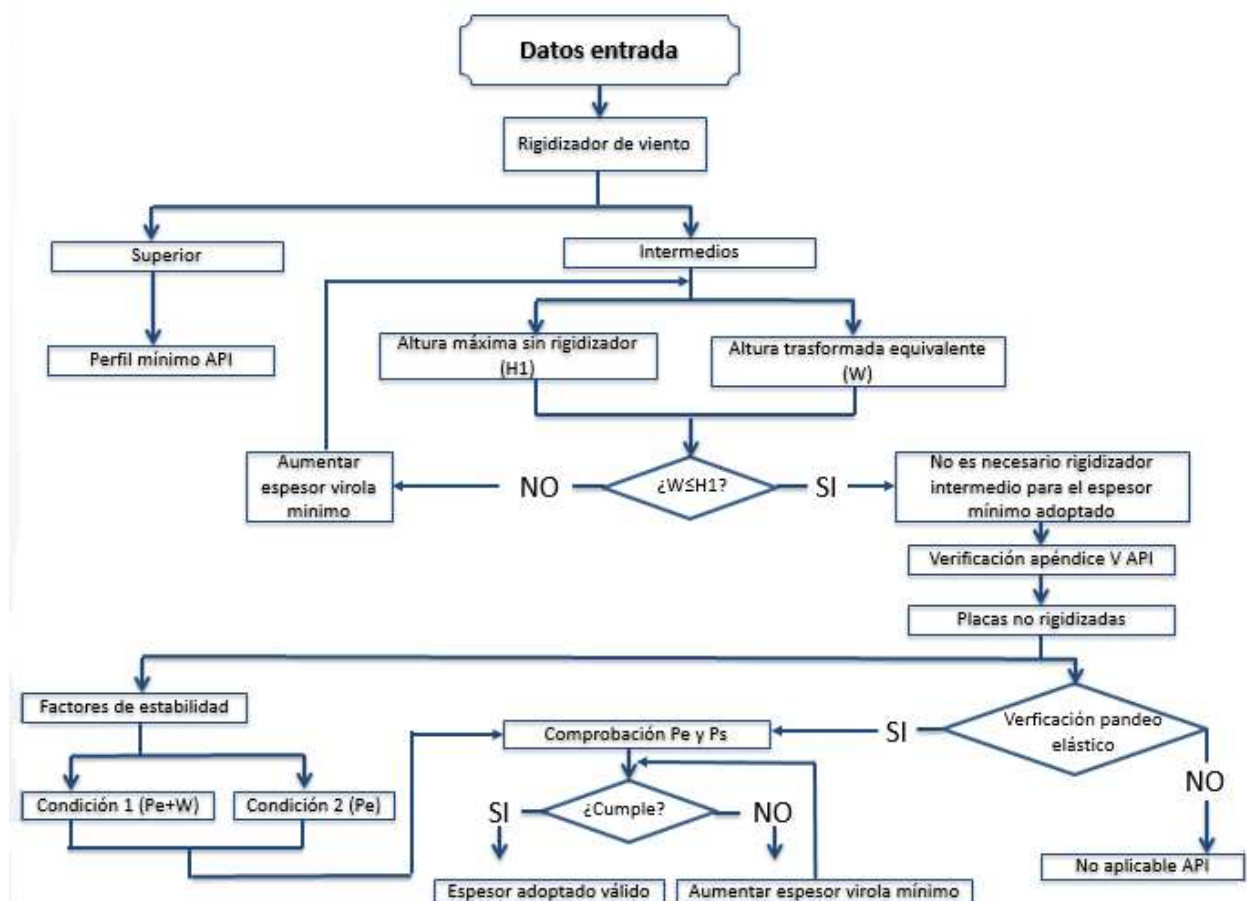


Figura 3-1. Diagrama de flujo para la rigidización de la envoltente.

3.5 Ejemplo de Dimensionamiento de la Rigidización de la Envolvente

El método empleado para la resolución de este ejemplo es el de aumentar el espesor de las virolas para evitar disponer rigidizadores intermedios, colocando un único rigidizador a modo de anillo circunferencial de compresión en la parte superior del cuerpo del tanque, que se dimensionará en el capítulo 5.

La altura máxima del tanque que no requiere rigidización intermedia se calcula mediante la ecuación 3-1.

$$H_1 = 9.47 * 6 * \sqrt{\left(\frac{6}{34}\right)^3} * \left(\frac{190}{162}\right)^2 = 5.79 \text{ m}$$

La altura transformada equivalente del cuerpo, según la ecuación 3-2 es:

$$W_{tr} = 2.5 * \left(\sqrt{\left(\frac{6}{22.2}\right)^5} + \sqrt{\left(\frac{6}{19.8}\right)^5} + \sqrt{\left(\frac{6}{17.3}\right)^5} + \sqrt{\left(\frac{6}{14.9}\right)^5} + \sqrt{\left(\frac{6}{12.5}\right)^5} + \sqrt{\left(\frac{6}{10}\right)^5} + \sqrt{\left(\frac{6}{7.6}\right)^5} + 2 * \sqrt{\left(\frac{6}{6}\right)^5} \right) = 8.13 \text{ m}$$

Como la altura transformada equivalente es mayor que la altura máxima sin rigidizar, es necesario disponer de rigidizadores secundarios. Mediante el archivo “*comprueba_rigidizador_secundario.m*” en Matlab, se calcula el espesor mínimo necesario para igualar ambas alturas y evitar disponer de rigidizadores secundarios en la envolvente del tanque.

El espesor mínimo de virola que se extrae es 7.7 mm. Por tanto, hay que modificar el espesor de las últimas tres virolas.

$$t_{adopt} = [22.2, 19.8, 17.3, 14.9, 12.5, 10, 7.7, 7.7, 7.7] \text{ mm}$$

- Verificación del Apéndice V:

El factor de estabilidad según la condición 1 para valores de P_e entre 0.25 y 0.70 kPa es:

$$\varphi_1 = \frac{[|-0.5| + 0.70]}{0.95} = 1.3$$

El factor de estabilidad según la condición 2 es independiente de P_e y adopta un valor de 3.

$$\left(\frac{34}{7.7}\right)^{0.75} * \left[\left(\frac{10.77}{34}\right) * \left(\frac{355}{210000}\right)^{0.5}\right] = 0.0397 \geq 0.00675$$

Se verifica el criterio de pandeo elástico, por tanto podemos aplicar las comprobaciones de P_e y P_s .

La presión externa de diseño para el diseño del cuerpo adoptará el mayor valor de las ecuaciones 3-8 a 3-10:

$$P_{s1} = |-0.5| - 1.08 = -0.58 \text{ kPa}$$

$$W = 1.48 * \left(\frac{162}{190}\right)^2 = 1.08 \text{ kPa}$$

$$P_{s2} = 1.08 + 0.4 * |-0.5| = 1.28 \text{ kPa}$$

$$P_s = \max(|-0.58|, 1.28) = 1.28 \text{ kPa}$$

Según las ecuaciones 3-6 y 3-7:

$$1.28 \text{ kPa} \leq \frac{210000}{15.203 * 1.3 * \left(\frac{10.77}{34}\right) * \left(\frac{34}{7.7}\right)^{2.5}} * \frac{1}{1000} = 0.82 \text{ kPa}$$

$$|-0.5| \text{ kPa} \leq \frac{210000}{15.203 * 3 * \left(\frac{10.77}{34}\right) * \left(\frac{34}{7.7}\right)^{2.5}} * \frac{1}{1000} = 0.35 \text{ kPa}$$

No cumple ninguna de las dos comprobaciones, por tanto se recalcula el espesor mínimo de virola para que cumpla y la altura transformada equivalente.

$$W_{tr} = 13.88 \text{ m}$$

$$t_{\text{última virola}} \geq \frac{47.07 * (\text{máx}(1.3 * 1.28, 3 * 0.5) * 13.8)^{0.4} * 34^{0.6}}{210000^{0.4}} = 10.1 \text{ mm}$$

Modificando los espesores de virola que no cumplan la restricción se obtiene:

$$t_{adopt} = [22.2, 19.8, 17.3, 14.9, 12.5, 10.1, 10.1, 10.1, 10.1]$$

4 FONDO

Las placas de fondo de tanques son fabricadas normalmente de acero con un espesor menor al utilizado para el cuerpo. Esto es posible debido a que el fondo se encuentra soportado por una base de hormigón que soporta el peso de la columna de líquido. Por ello, la función principal del fondo es de lograr un recipiente hermético que impida la filtración del líquido por la base del tanque.

El cálculo del fondo del tanque cumple los requisitos del apartado 5.4, 5.5 y apéndice V.9 de la norma [1].

4.1 Nomenclatura

CA	Espesor de sobrecorrosión de virola [mm]
CA _f	Espesor de sobrecorrosión de la chapa del fondo [mm]
D	Diámetro del tanque [m]
G	Gravedad específica de diseño del líquido [-]
H _w	Altura del nivel de líquido dentro del depósito [m]
P _e	Presión de diseño externa en vacío [kPa]
S _d	Tensión de diseño del producto [MPa]
S _t	Tensión de prueba hidrostática [MPa]
t _{beff}	Espesor adoptado en la chapa anular [mm]
t _{f,adopt}	Espesor adoptado en el fondo del depósito [mm]
t _{f,min}	Espesor mínimo del fondo del depósito, según [1] [mm]
t _s	Espesor de la 1ª virola del depósito, situada en la parte inferior [mm]
w _{chapa}	Ancho adoptado en la chapa anular [mm]
W _f	Presión del peso de la placa del fondo por unidad de área [kPa]
w _{min}	Ancho mínimo de la chapa anular, según API [mm]
W _p	Presión del mínimo producto por unidad de área [kPa]
W _{tot}	Presión total en el fondo por unidad de área [kPa]

4.2 General

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

- La cimentación sobre la que apoya el tanque.
- El método empleado para evacuar el producto desde el interior del tanque.

- El grado de sedimentación de sólidos en suspensión.
- La corrosión del fondo y el tamaño del tanque.

4.3 Espesor de la Chapa del Fondo del Tanque

Todas las chapas de fondo tendrán un espesor corroído no menor de 6 mm. A menos que se especifique lo contrario por parte del cliente, todas las placas rectangulares (placas de fondo sobre la que descansa el cuerpo que tiene forma final rectangular) tendrán un ancho nominal no menor de 1800 mm.

$$t_{f,min} = 6 \text{ mm} \quad (4-1)$$

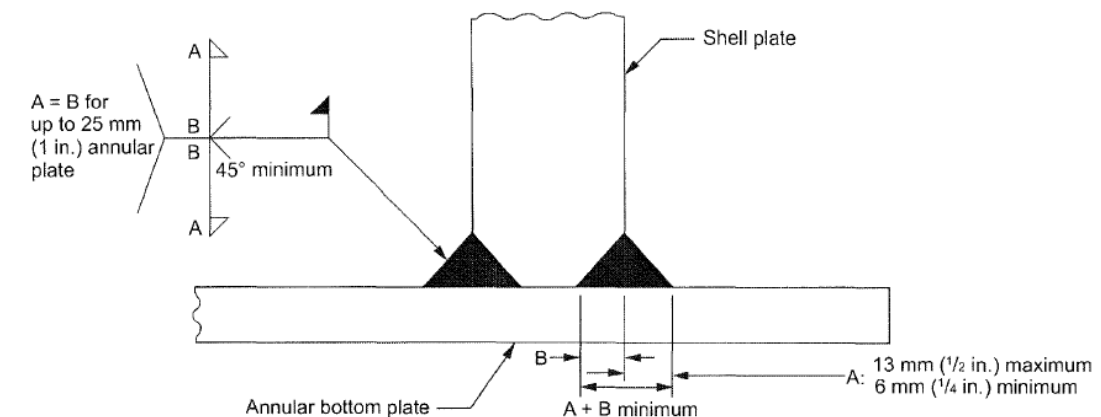
4.3.1 Espesor Adoptado

Si se incluye el sobreespesor de corrosión definido para la chapa del fondo, el espesor final de la misma será:

$$t_{f,adopt} = t_{f,min} + CA_f \quad (4-2)$$

Las chapas de fondo de suficiente tamaño se dispondrán de forma que, cuando se corten, al menos un ancho de 50 mm se proyectará fuera del cuerpo en forma de vuelo o reunirá los requisitos definidos a continuación; el mayor de ambos. Los requisitos impuestos son:

- Para chapas de fondo y anillos anulares con un espesor nominal menor o igual a 13 mm, la unión entre el final del fondo de la virola más baja y la chapa de fondo se realizará mediante una soldadura continua a ambos lados de la virola. El tamaño de cada soldadura no será mayor de 13 mm y no será menor que el espesor nominal de la virola más baja, que el espesor del anillo anular o de los espesores definidos en la tabla 1.1.
- Para anillos anulares con un espesor nominal mayor de 13 mm, la soldadura será dimensionada tal que o bien el cordón de soldadura o la profundidad de la ranura más el cordón de soldadura tenga un tamaño igual al espesor del anillo anular, pero no excederá el espesor de la virola.



Notes:

1. A = Fillet weld size limited to 13 mm (1/2 in.) maximum.
2. A + B = Thinner of shell or annular bottom plate thickness.
3. Groove weld B may exceed fillet size A only when annular plate is thicker than 25 mm (1 in.).

Figura 4-1. Requisitos unión virola de fondo-anillo anular.

4.4 Verificación del Apéndice V de la norma API-650

La base del tanque será evaluada para una presión externa si es aplicable alguna de las siguientes condiciones. Estas condiciones no necesitan ser consideradas de forma simultánea, a menos que se especifique por parte del cliente:

1. Si la presión externa de diseño total sobre el fondo excede de la suma de los pesos de la chapa de fondo más el peso de cualquier producto almacenado requerido por el cliente cuando la presión externa actúa, los esfuerzos de membrana en el fondo serán evaluados.
2. Si el área alrededor del tanque está sujeto a inundación debido al líquido, las disposiciones serán incluidas en el diseño del tanque y sus procedimientos operativos para garantizar que el tanque contiene líquido suficiente para contrarrestar la elevación inferior resultante de las condiciones de inundación externa. Si el tanque no puede ser rellenado con suficiente profundidad del líquido para contrarrestar el levantamiento debido a la presión inferior del tanque, las tensiones de membrana en el fondo deberán ser evaluadas.

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

La condición que hay que cumplir para evitar el levantamiento del fondo del depósito es:

$$W_{tot} = W_f + W_p \geq |P_e| \quad (4-3)$$

4.5 Chapa Anular de Fondo

Cuando la virola de fondo del cuerpo esté diseñada usando el criterio de límite elástico para materiales pertenecientes al grupo IV, IVA, V o VI descritos en la norma [1], se dispondrá de una chapa anular soldada a tope. Cuando el material de la virola de fondo pertenece al grupo IV, IVA, V o VI y la tensión del producto máxima para la primera virola es menor o igual de 160 MPa o la tensión máxima de prueba hidrostática para dicha virola es menor o igual a 171 MPa, se puede utilizar una placa de fondo solapada en lugar de una chapa anular soldada a tope.

4.5.1 Ancho de la Chapa Anular

La chapa anular del fondo tendrá un ancho radial de al menos 600 mm entre la parte interna del cuerpo y cualquier junta de solape del resto del fondo. La proyección de dicha chapa anular hacia el exterior del cuerpo del tanque tendrá una longitud mínima de 50 mm según los requisitos definidos anteriormente. El ancho radial del anillo anular se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$w_{mín} = \frac{215 * t_{beff}}{(H_w * G)^{0.5}} \geq 600 \text{ mm} \quad (4-4)$$

$$Vuelo \text{ mínimo} = 50 \text{ mm} \quad (4-5)$$

$$w_{chapa} = w_{mín} + t_s + Vuelo \text{ mínimo} \quad (4-6)$$

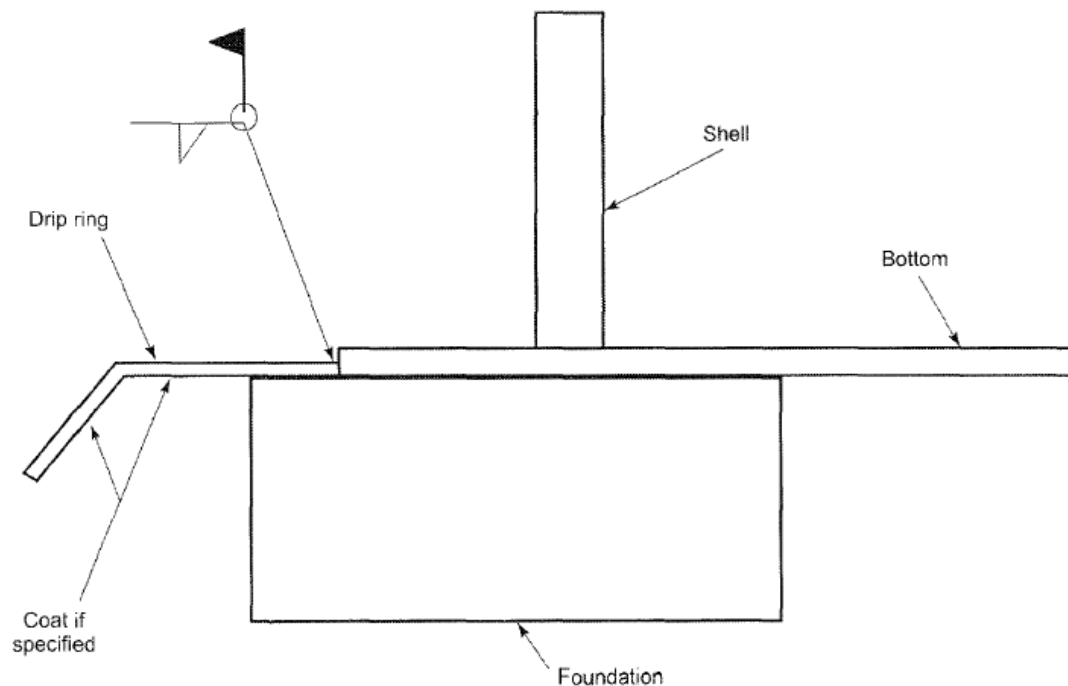


Figura 4-2. Anillo anular de fondo.

4.5.2 Espesor de la Chapa Anular

El espesor de la chapa anular no será menor que el espesor mayor determinado en la tabla 4-1a para una tensión de diseño del producto (más cualquier sobreespesor de corrosión indicado) o para una tensión de diseño de prueba hidrostática. Dichas tablas son aplicables para alturas efectivas del producto $H_w \cdot G \leq 23$ m y depende del espesor de la virola más baja del cuerpo. Más allá de esta altura se requiere un análisis elástico para determinar el espesor de la chapa anular.

Tabla 4-1. Espesor del anillo anular en función del espesor y esfuerzo de la primera virola

Espesor de la virola de fondo, t_s (mm)	Esfuerzo sobre la virola de fondo (MPa)			
	≤ 190	≤ 210	≤ 220	≤ 250
$t_s \leq 19$	6	6	7	9
$19 < t_s \leq 25$	6	7	10	11
$25 < t_s \leq 32$	6	9	12	14
$32 < t_s \leq 40$	8	11	14	17
$40 < t_s \leq 45$	9	13	16	19

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

$$S_d = \frac{4.9 * D * (H_w - 0.3) * G}{t_s - CA} \quad (4-7)$$

$$S_t = \frac{4.9 * D * (H_w - 0.3)}{t_s} \quad (4-8)$$

$$\text{Esfuerzo sobre 1ª virola} = \max(S_d, S_t) \quad (4-9)$$

4.6 Diagrama de Flujo del Cálculo del Fondo del Tanque

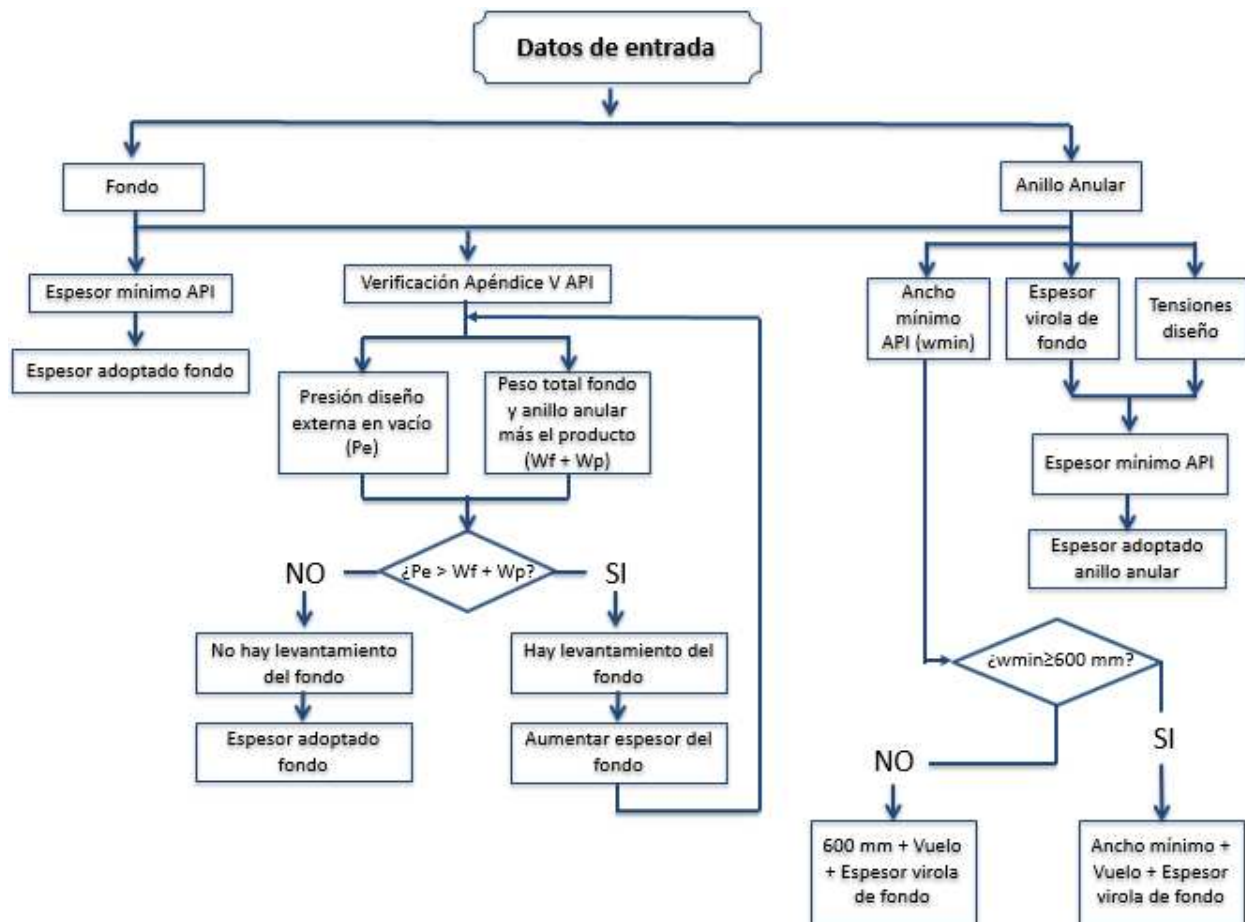


Figura 4-3. Diagrama de flujo del cálculo del fondo del tanque.

4.7 Ejemplo de Dimensionamiento del Fondo del Tanque

El tipo de acero empleado en las placas del fondo será S 275 JR.

El espesor adoptado para las chapas del fondo del tanque según la ecuación 4-2 será de 8 mm.

- Verificación del Apéndice V:

Las cargas debido al peso del fondo del tanque y a una altura de 0.3 m del producto contenido en el mismo son:

$$W_f = 7850 * \frac{8}{1000} * \frac{9.81}{1000} = 0.616 \text{ kPa}$$

$$W_p = \frac{1100 * 0.3 * 9.81}{1000} = 3.237 \text{ kPa}$$

$$W_{tot} = 0.616 + 3.237 = 3.853 \text{ kPa} \geq |-0.5| \text{ kPa}$$

Se cumple la condición para que no haya levantamiento del fondo del tanque, por tanto el espesor de la chapa de fondo es válido.

- Chapa Anular de Fondo:

El espesor mínimo para el anillo anular se extrae de la tabla 4-1. Su valor depende del espesor de la primera virola y del esfuerzo al que está sometido la misma.

El espesor de la primera virola calculado en el capítulo anterior es de 22.2 mm. Para calcular la tensión máxima sobre dicha virola hay que tomar el mayor valor entre la tensión de diseño del producto y la tensión de diseño de prueba hidrostática, según las ecuaciones 4-7 y 4-8.

$$S_d = \frac{4.9 * 34 * (22 - 0.3) * 1.1}{22.2 - 1} = 187.6 \text{ MPa}$$

$$S_t = \frac{4.9 * 34 * (22 - 0.3)}{22.2} = 162.8 \text{ MPa}$$

$$\text{Esfuerzo sobre 1ª virola} = \text{máx} (187.6, 162.8) = 187.6 \text{ MPa}$$

El espesor del anillo anular según la tabla 4-1 es de 6 mm. Sumando el sobreespesor de corrosión de 2 mm considerado para las chapas del fondo, se obtiene un espesor adoptado en el anillo anular de 8 mm.

El ancho mínimo de dicho anillo se calcula mediante la ecuación 4-4.

$$w_{\min} = \frac{215 * 8}{(22 * 1.1)^{0.5}} = 349.6 \text{ mm} < 600 \text{ mm}$$

Puesto que el ancho mínimo obtenido es inferior a 600 mm que indica la norma [1], se tomará un valor de 600 mm.

$$Vuelo \text{ mínimo} = 50 \text{ mm}$$

$$w_{chapa} = 600 + 22.2 + 50 = 672.2 \text{ mm}$$

El ancho adoptado para el anillo anular será de 672.2 mm.

5 CUBIERTA

En este capítulo se desarrollan los pasos a seguir para el diseño de una cubierta fija esférica, tanto autoportante como soportada por una estructura rigidizadora, según el diseño simplificado descrito en el apartado 11 de la norma [2].

5.1 Nomenclatura

A	Área del perfil IPE adoptado [mm^2]
A_{arr}	Área necesaria del perfil de arriostramiento de cubierta [mm^2]
A_{casq}	Área del casquete esférico de la cubierta [m^2]
A_{ef}	Área efectiva del perfil IPE adoptado [cm^2]
$A_{\text{eff,an}}$	Área efectiva del anillo circunferencial de compresión
A_h	Área en proyección horizontal de la cubierta [m^2]
A_{nec}	Área efectiva necesaria en el anillo de compresión [mm^2]
$A_{\text{p,1}}$	Área de participación de la cubierta [mm^2]
$A_{\text{p,2}}$	Área de participación de la última virola [mm^2]
$A_{\text{p,3}}$	Área del perfil adoptado en el anillo de compresión [mm^2]
b	Ancho del perfil IPE adoptado [cm]
b_k	Ancho del perfil del soporte central [cm]
CA	Espesor de sobrecorrosión de virola [mm]
CA_r	Espesor de sobrecorrosión de la chapa de cubierta [mm]
C_{my}	Coeficiente de momento equivalente [-]
D	Diámetro del taque [m]
DL	Peso efectivo del tanque [kg]
E	Módulo de Young del acero [MPa]
e_o	Excentricidad del soporte central [m]
$e_{o,\text{arr}}$	Excentricidad del sistema de arriostramiento de cubierta [m]
F_{ur}	Resistencia mínima de agotamiento a tracción del acero de cubierta [MPa]
F_y	Límite elástico del acero del cuerpo [MPa]
F_{yd}	Valor del límite elástico del acero, incluyendo el coeficiente de minoración [MPa]
F_{yr}	Límite elástico del acero de cubierta [MPa]
g	Aceleración de la gravedad [m/s^2]
gH	Presión del peso muerto de la chapa de cubierta [kN/m^2]
gR	Presión del peso muerto de la estructura de cubierta [kN/m^2]
G_{vigas}	Peso por unidad de longitud del perfil del rigidizador de cubierta [kg/m]
h_k	Altura del soporte central medido entre ejes de las alas [cm]

h_{rig}	Altura total del rigidizador de cubierta [cm]
H_{roof}	Altura de la cubierta esférica [m]
i_k	Radio de giro del perfil de arriostramiento de cubierta [mm]
$I_{y,min,rig}$	Inercia mínima requerida, según [2] [cm ⁴]
$I_{y,rig}$	Momento de inercia del rigidizador de cubierta [cm ⁴]
j	Coeficiente de eficiencia [-]
K_m	Coeficiente reductor del número de elementos estabilizados en cubierta [-]
k_{yy}	Coeficiente de interacción en el eje y [-]
k_{zy}	Coeficiente de interacción en el eje z [-]
L_{arr}	Longitud del arriostramiento de cubierta [mm]
$L_{e,e}$	Longitud del elemento estabilizado por el sistema de arriostramiento [m]
LR	Carga viva mínima de cubierta en proyección horizontal [kPa]
L_{vigas}	Longitud del rigidizador de cubierta en verdadera magnitud [m]
L_y	Longitud de pandeo alrededor del eje y [m]
L_z	Longitud de pandeo alrededor del eje z [m]
$M_{F,Ed}$	Momento de flexión en la mitad de los rigidizadores [mN]
M_{Ed}	Momento de diseño máximo en el extremo del rigidizador [mkN]
M_{max}	Momento máximo flector en el rigidizador de cubierta, según [2] [mkN]
M_S	Momento de diseño mínimo en el rigidizador [mkN]
$M_{r,Ed}$	Valor de diseño del momento flector en el extremo inferior del rigidizador [mkN]
$M_{s,Ed}$	Momento de flexión en la conexión anillo circunferencial-rigidizador [mN]
$M_{y,rk}$	Momento de cálculo de la sección del perfil IPE adoptado [mkN]
$N_{2,Ed}$	Valor de diseño de la fuerza en el cordón inferior del soporte central [kN]
$N_{anillos}$	Número de anillos de arriostramiento entre rigidizadores
N_{Ed}	Carga total axil en el rigidizador de cubierta, según [2] [kN]
$N_{Ed,arr}$	Esfuerzo de compresión al que está sometido el arriostramiento de cubierta [N]
$N_{Ed,c}$	Fuerza anular [kN]
$N_{Ed,sop}$	Valor de diseño total del axil en el rigidizador de cubierta [kN]
$N_{rig,max}$	Número máximo de rigidizadores de cubierta
N_{rk}	Resistencia de cálculo a pandeo por flexión del perfil IPE adoptado [kN]
n_{vigas}	Número de rigidizadores de la estructura de cubierta
$nvir$	Número de virolas que componen el cuerpo del tanque
p	Presión según la combinación más desfavorable [kN/m ²]
p_1, p_2	Presiones según combinaciones de carga de [1] [kN/m ²]
PB	Presión de pandeo de la lámina de cubierta [kPa]
P_e	Presión de diseño externa en vacío [kPa]
P_{Ed}	Carga concentrada sobre el rigidizador de cubierta, según [2] [kN]
$p_{i,ed}$	Presión normal de cubierta distribuida uniformemente hacia el interior [kPa]
$p_{o,Ed}$	Presión normal de cubierta distribuida uniformemente hacia el exterior [kPa]
p_{tot}	Presión total de la cubierta en proyección vertical [kPa]
$p_{v,Ed}$	Presión total de la cubierta [kN/m ²]
q	Fuerza equivalente por efecto de imperfecciones por unidad de longitud [N/m]
Q_c	Peso total de la estructura de cubierta [kN]
R_c	Radio de curvatura de la cubierta esférica [m]

r_k	Radio medido desde el eje del depósito al eje del soporte central [m]
S_{dr}	Tensión de diseño del producto para el acero de cubierta [MPa]
S_{snow}	Sobrecarga de nieve [kPa]
S_{tr}	Tensión de prueba hidrostática para el acero de cubierta [MPa]
T	Mayor combinación de cargas e_1 y e_2 con carga de nieve equilibrada [kPa]
t_1, t_2	Espesores de las alas del perfil armado del soporte central [cm]
t_{adopt}	Espesores adoptados en las virolas que componen el cuerpo del tanque [mm]
$t_{r,\text{adopt}}$	Espesor adoptado de la chapa de cubierta [mm]
$t_{r,\text{min}}$	Espesor mínimo de la chapa de cubierta, según [1] [mm]
t_{sop}	Espesor adoptado en las alas del perfil armado del soporte central [cm]
$t_{\text{última virola}}$	Espesor de la virola más delgada situada en la parte superior del cuerpo [mm]
U	Mayor combinación de cargas e_1 y e_2 con carga de nieve desequilibrada [kPa]
w_c	Longitud de participación de la última virola [mm]
$W_{\text{efect},y}$	Módulo resistente efectivo del perfil IPE adoptado [cm ³]
$W_{\text{elast},y}$	Módulo resistente elástico del perfil IPE adoptado [cm ³]
$W_{\text{elast},y,\text{sop}}$	Módulo resistente elástico del soporte central [cm ³]
$W_{\text{plast},y}$	Módulo resistente plástico del perfil IPE adoptado [cm ³]
w_r	Longitud de participación de la cubierta [mm]
x	Coordenada desde el eje del tanque hasta el punto analizado de cubierta [m]
α	Posición de la fibra neutra de la sección [-]
α_s	Coefficiente que relaciona los momentos máximos, positivo y negativo [-]
β	Coefficiente, según [2] [-]
β_k	Coefficiente según las condiciones de contorno del arriostramiento de cubierta [-]
γ_{MO}	Coefficiente de minoración, según [2] [-]
δ_q	Flecha del sistema de arriostramiento en el plano de estabilización [m]
ϵ	Factor de 2º orden, según [2] [-]
θ	Ángulo de la cubierta esférica para una proyección horizontal igual al radio del tanque [°]
θ_2	Ángulo de la cubierta esférica para una proyección horizontal igual al 10% del radio del tanque [°]
λ_k	Esbeltez mecánica [-]
λ_{red}	Esbeltez reducida [-]
λ_{ref}	Esbeltez de referencia [-]
ρ_{acero}	Densidad del acero [kg/m ³]
σ_{adm}	Tensión máxima admisible en el rigidizador de cubierta [MPa]
σ_c	Tensión de compresión longitudinal en el cuerpo [MPa]
σ_{max}	Tensión máxima en el rigidizador de cubierta [MPa]
$\sigma_{\text{max},c}$	Tensión máxima en el anillo de compresión [MPa]
$\sigma_{\text{max},\text{sop}}$	Tensión máxima en el soporte central [MPa]
Φ_k	Coefficiente auxiliar para calcular el coeficiente de pandeo [-]
χ	Coefficiente de pandeo [-]
ψ	Coefficiente que relaciona los momentos en los extremos del rigidizador [-]
A_1, A_2	Áreas de las alas del perfil armado del soporte central [cm]
F_1	Fuerza equivalente por efecto de imperfecciones [N]
F_2	Condición impuesta para el efecto de imperfecciones, según <i>EAE Cap. V</i> [N]

5.2 Diseño Simplificado de la Cubierta según EC-3 4-2

5.2.1 General

El análisis simplificado puede ser aplicado cuando se satisfacen las siguientes condiciones:

- La estructura del tanque es de la forma mostrada en la siguiente figura:

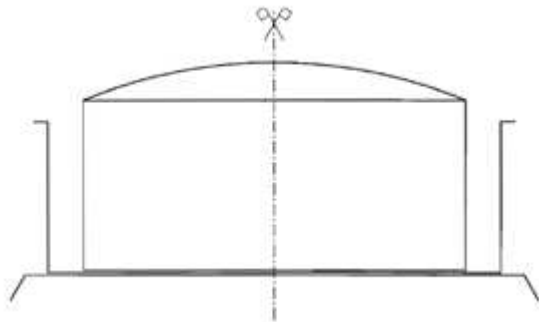


Figura 5-1. Estructura del tanque.

- Las únicas acciones internas son la presión del líquido y la presión del gas sobre la superficie del líquido.
- El nivel de diseño máximo del líquido no es mayor que la parte superior del cuerpo del tanque.
- Las siguientes cargas pueden no tenerse en cuenta: cargas inducidas térmicamente, cargas sísmicas, cargas resultantes de conexiones irregulares y cargas de emergencias.
- Ninguna virola se construye con un espesor menor que el de la virola superior, excepto para la zona adyacente al anillo del alero.
- El valor de diseño del esfuerzo circunferencial en el cuerpo del tanque es menor de 435 MPa.
- Para cubiertas esféricas, el radio de curvatura tendrá un valor entre 0.8 y 1.5 veces el diámetro del tanque.
- El gradiente de diseño del fondo del tanque no es mayor que 1:100.
- La base es autoportante o está soportada por vigas paralelas próximas entre sí.
- La presión característica interna no es menor de 8.5 mbar y no es mayor de 60 mbar.
- El número de ciclos de carga es tal que no hay riesgo de fallo por fatiga.

El límite elástico de diseño se tomará como:

$$F_{yd} = F_y / \gamma_{Mo} \quad (5-1)$$

La norma *EN 1993 Part 4-2, 2007* define dos procedimientos para diseñar la cubierta el tanque:

1. Cubierta fija compuesta por chapa de cubierta más estructura rigidizadora.
2. Placa de cubierta autoportante sin estructura rigidizadora.

En esta memoria y en los archivos de Matlab se desarrollarán ambos métodos, aunque para el desarrollo del ejemplo que se aplica se empleará el procedimiento 1.

5.3 Procedimiento 1: Diseño de Cubierta Fija

5.3.1 General

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

5.3.2 Geometría de la Cubierta del Depósito

Se tomará como radio de curvatura de la cubierta esférica un valor de 1.5 veces el diámetro del tanque.

$$R_c = 1.5 * D \quad (5-2)$$

El ángulo que forma dicha cubierta esférica con la horizontal y la altura de la misma se calcula según las siguientes expresiones:

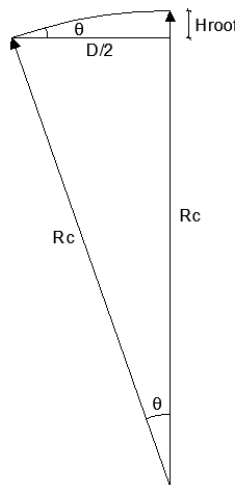


Figura 5-2. Geometría de la cubierta esférica.

$$\theta = \arcsin\left(\frac{D}{2 * R_c}\right) \quad (5-3)$$

$$\theta_2 = \arcsin\left(\frac{0.1 * D}{2 * R_c}\right) \quad (5-4)$$

$$H_{roof} = R_c * (1 - \cos(\theta)) \quad (5-5)$$

5.3.3 Espesor Mínimo de la Chapa de Cubierta según API 650-2007 y EN 1993 Part 4-2, 2007

La chapa de cubierta para cubiertas esféricas tendrá un espesor nominal que no será mayor de 13 mm y no

menor de los siguientes valores:

- 3 mm para aceros inoxidables
- 5 mm para cualquier otro tipo de acero.

$$\bullet \frac{R_c}{2.4} * \sqrt{\frac{T}{2.2}} + CA \quad (5-6)$$

$$\bullet \frac{R_c}{2.7} * \sqrt{\frac{U}{2.2}} + CA \quad (5-7)$$

$$t_{r,min} = \min(t_1, t_2, t_3) \quad (5-8)$$

siendo T la mayor combinación de cargas gravitatorias con carga de nieve equilibrada y U en el caso de carga de nieve desequilibrada, según la norma [1].

$$T = \max(DL + \max(LR, Snow) + 0.4 * |P_e|, DL + |P_e| + 0.4 * \max(Lr, Snow)) \quad (5-9)$$

$$U = \max(|(DL - \max(LR, Snow) + 0.4 * |P_e|)|, |(DL + |P_e| - 0.4 * \max(Lr, Snow))|) \quad (5-10)$$

5.3.3.1 Espesor Adoptado en la Chapa de Cubierta

Cualquier sobreespesor de corrosión requerido para chapas de cubierta será añadido para calcular el espesor adoptado, a menos que se especifique lo contrario por parte del cliente.

$$t_{r,adopt} = t_{r,min} + CA_r \quad (5-11)$$

Otra opción es calcular el espesor de la chapa mediante la teoría de grandes desplazamiento definido en la norma *EN 1993 Part 1-7*. En este trabajo se tomará un espesor de chapa igual al espesor mínimo exigido más el sobreespesor de corrosión.

5.3.4 Tensión Admisible

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

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

$$S_{dr} = \min\left(\frac{2}{3} * F_{yr}, \frac{2}{5} * F_{ur}\right) \quad (5-12)$$

$$S_{tr} = \min\left(\frac{3}{4} * F_{yr}, \frac{3}{7} * F_{ur}\right) \quad (5-13)$$

5.3.5 Estructura de la Cubierta

La chapa de cubierta tendrá una geometría igual al casquete esférico de una esfera. Por ello se calcula el área

de dicho casquete, el cual se empleará para calcular la presión ejercida por el peso muerto de la chapa.

$$A_{casq} = 2 * \pi * R_c * H_{roof} \quad (5-14)$$

La proyección horizontal de la chapa de cubierta es:

$$A_h = \frac{\pi * D^2}{4} \quad (5-15)$$

Dicha chapa de cubierta se dispondrá sobre una serie de vigas con forma de arco adaptada a la curvatura de la chapa, que sirven de estructura rigidizadora de la cubierta y se encargan de transmitir los esfuerzos al cuerpo del tanque.

La longitud de estas vigas en verdadera magnitud será:

$$L_{vigas} = \frac{2 * \pi * (\theta - \theta_2) * R_c}{360} \quad (5-16)$$

5.3.5.1 Optimización del Perfil de Cubierta y el Número de Vigas

Para obtener el perfil para el rigidizador de cubierta adecuado y el número de vigas necesaria se ha implantado un bucle en el archivo “cubierta” en Matlab, que recorre cada uno de los 22 perfiles IPE introducidos del catálogo de Arcelor Mittal.

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

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

$$I_{y,min,rig} \leq I_{y,rig} \quad (5-17)$$

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

$$\sigma_{m\acute{a}x} \leq \sigma_{adm} \quad (5-18)$$

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

$$N_{rig,m\acute{a}x} = \frac{\pi * (0.1 * D)}{2 * \frac{b}{100}} \quad (5-19)$$

$$n_{vigas} \leq N_{rig,m\acute{a}x} \quad (5-20)$$

- Se limita la separación entre rigidizadores en el punto de conexión con la pared del tanque a 3.25 m para reducir la esbeltez mecánica de los elementos secundarios de arriostramiento y evitar tener el

cuenta los momentos de flexión en el anillo de borde alrededor de su eje vertical definido en el [2].

$$Separación = \frac{2 * \pi * \left(\frac{D}{2}\right)}{n_{vigas}} \leq 3.25 \quad (5-21)$$

- El perfil del rigidizador tiene que cumplir el criterio de pandeo para piezas sometidas a flexocompresión. Se estudia el pandeo de la pieza en ambos ejes para cargas uniformes aplicadas sobre el eje fuerte del perfil. Se omite el posible pandeo lateral mediante la colocación de anillos de arriostramiento entre rigidizadores exigidos por la norma [1], así como por la chapa de cubierta.

$$\frac{\frac{N_{Ed}}{A * F_y}}{\chi_y * \frac{\gamma_{M1}}{\gamma_{M1}}} + k_{yy} * \frac{\frac{M_{Ed}}{W_y * F_y}}{\frac{\gamma_{M1}}{\gamma_{M1}}} \leq 1 \quad (5-22)$$

$$\frac{\frac{N_{Ed}}{A * F_y}}{\chi_z * \frac{\gamma_{M1}}{\gamma_{M1}}} + k_{zy} * \frac{\frac{M_{Ed}}{W_y * F_y}}{\frac{\gamma_{M1}}{\gamma_{M1}}} \leq 1 \quad (5-23)$$

5.3.5.2 Carga de Diseño y Cargas Muertas

A continuación se definen las expresiones para calcular las presiones ejercidas por los elementos de la cubierta.

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

$$Q_c = n_{vigas} * G_{vigas} * L_{vigas} * g \quad (5-24)$$

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

$$gR = \frac{Q_c}{\frac{\pi * D^2}{4}} \quad (5-25)$$

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

$$gH = \rho_{acero} * t_{r,adopt} * \frac{A_{casq}}{A_h} * g \quad (5-26)$$

5.3.5.3 Combinaciones de Cargas según API-650 y Carga Total

La carga viva mínima de cubierta en proyección horizontal tendrá un valor de 1 kPa, según la nomenclatura de la norma [1] en su apéndice V.3.

$$LR = 1 \text{ kPa} \quad (5-27)$$

La carga de nieve se calcula en función de la zona donde se sitúa el tanque. En este proyecto se ubicarán los tanques en territorios situado en España, por tanto el valor de dicha carga de define en el *CTE*.

Según el apéndice R de la norma [1], las combinaciones de carga para el diseño de la cubierta para el caso de cargas gravitatorias son:

$$p_1 = gH + \text{máx} (LR, \text{Snow}) + 0.4 * |P_e| \quad (5-28)$$

$$p_2 = gH + |P_e| + 0.4 * \text{máx} (LR, \text{Snow}) \quad (5-29)$$

$$p = \text{máx} (p_1, p_2) \quad (5-30)$$

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

$$p_{tot} = p + gR \quad (5-31)$$

5.3.5.4 Cálculo de la Estructura de Cubierta según *EN 1993 Part 4-2*

Para hallar el perfil óptimo y el número de rigidizadores necesario en el bucle de Matlab, según las condiciones definidas anteriormente, se realiza una tabla excel donde se calculan todos los esfuerzos y tensiones a los que están sometida cada una de las vigas del catálogo según las expresiones definidas a continuación.

Los requisitos impuestos por la norma son:

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

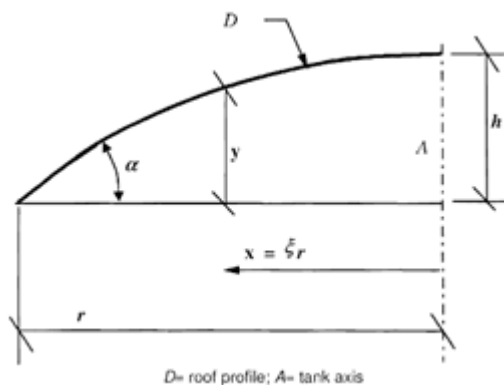


Figura 5-3. Coordenadas de la cubierta esférica del tanque.

El procedimiento de diseño descrito para cubiertas esféricas es:

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

$$P_{v,Ed} = p_{tot} \quad (5-32)$$

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

$$P_{Ed} = \beta * \left(\frac{D}{2}\right)^2 * P_{v,Ed} \quad (5-33)$$

$$\beta = \frac{\pi}{n_{vigas}} \quad (5-34)$$

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

$$N_{Ed} = 0.375 * \frac{D}{2 * H_{roof}} * P_{Ed} \quad (5-35)$$

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

$$M_{m\acute{a}x} = \frac{1}{3} * \left\{ 1 - \left(\frac{x}{\frac{D}{2}}\right)^3 - 1.10 * \left(\frac{\sqrt{R_c^2 - x^2} - (R_c - H_{roof})}{H_{roof}}\right) \right\} * \frac{D}{2} * P_{Ed} \quad (5-36)$$

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

$$I_{y,min,rig} = \frac{N_{Ed} * \left(\frac{D}{2}\right)^2}{\pi^2 * E} \quad (5-37)$$

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

$$M_{Ed} = \frac{M_{m\acute{a}x}}{1-\epsilon} \quad (5-38)$$

$$\epsilon = N_{Ed} * \frac{\left(0.6 * \frac{D}{2}\right)^2}{\pi^2 * E * I_{y,rig}} \quad (5-39)$$

La tensión máxima es debido al acoplamiento entre el esfuerzo axil y el momento flector al que se somete la viga.

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{N_{Ed}}{A_{ef}} + \frac{M_{Ed}}{W_{elast,y}} \quad (5-40)$$

5.3.5.5 Criterio de Pandeo para Piezas sometidas a Flexocompresión según EC-3

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

$$L_y = \frac{D}{2} - 0.1 * \frac{D}{2} \quad (5-41)$$

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

$$L_z = \frac{L_y}{N_{anillos} + 1} \quad (5-42)$$

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

$$\lambda_k = \frac{\beta * L_k}{i_k} \quad (5-43)$$

$$\lambda_{red,k} = \frac{\lambda_k}{\lambda_{ref}} \quad (5-44)$$

$$\lambda_{ref} = \pi * \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad (5-45)$$

$$\phi_k = 0.5 * (1 + 0.21 * (\lambda_{red,k} - 0.2) + \lambda_{red,k}^2) \quad (5-46)$$

$$\chi_k = \frac{1}{\phi_k + \sqrt{\phi_k^2 - \lambda_{red,k}^2}} \quad (5-47)$$

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

$$\alpha_s = \frac{-M_s}{M_{Ed}} \quad (5-48)$$

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

$$C_{my} = 0.1 - 0.8 * \alpha_s \geq 0.4 \quad (5-49)$$

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

$$N_{rk} = A * F_y \quad (5-50)$$

$$M_{y,rk} = W * F_y \quad (5-51)$$

Tabla 5–1. Área y módulo resistente en función de la clase de sección del perfil.

Clase	1	2	3	4
A	A	A	A	A _{ef}
W	W _{plast,y}	W _{plast,y}	W _{elast,y}	W _{efect,y}

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

$$k_{yy} = C_{my} * \left(1 + (\lambda_{red,y} - 0.2) * \frac{N_{Ed}}{\chi_y * N_{rk}/\gamma_{M1}} \right) \leq C_{my} * \left(1 + 0.8 * \frac{N_{Ed}}{\chi_y * N_{rk}/\gamma_{M1}} \right) \quad (5-52)$$

$$k_{zy} = 0.6 * k_{yy} \quad (5-53)$$

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

$$k_{yy} = C_{my} * \left(1 + 0.6 * \lambda_{red,y} * \frac{N_{Ed}}{\chi_y * N_{rk}/\gamma_{M1}} \right) \leq C_{my} * \left(1 + 0.6 * \frac{N_{Ed}}{\chi_y * N_{rk}/\gamma_{M1}} \right) \quad (5-54)$$

$$k_{zy} = 0.8 * k_{yy} \quad (5-55)$$

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

5.4 Procedimiento 2: Verificación de Pandeo Elástico de la Lámina de Cubierta para no disponer Rigidización según EN 1993 Part 4-2

El espesor adoptado para la lámina de cubierta será aquel que cumple las comprobaciones de resistencia y estabilidad, no necesitando rigidizar la cubierta.

La comprobación de resistencia bajo la presión interna de diseño para cubiertas esféricas es:

$$\frac{p_{0,Ed} * R_c}{2 * t_{r,min}} \geq j * F_{yd} \quad (5-56)$$

tomando un valor de 0.50 para el coeficiente j y un valor de 1.05 para el coeficiente de seguridad de resistencia según el apartado 2.9.2.1 del EN 1993 Part 4-2. La presión p_{0,Ed} se obtiene como la suma de la presión interna de diseño más la presión externa de diseño.

La comprobación de estabilidad de la lámina de la cubierta esférica bajo la presión externa de diseño es:

$$PB = 0.05 * \left(1.25 * E * \left(\frac{t_{r,min}}{R_c} \right)^2 \right) \geq p_{i,Ed} = gH * 1.4 \quad (5-57)$$

Se ha tomado el valor de la presión externa de diseño en el caso más desfavorable de la cubierta, que en este caso es la parte superior justo en el eje de simetría del tanque, ya que el ángulo que forma la cubierta con la horizontal es 0° , y por tanto el $\cos(0) = 1$. Se multiplica por el coeficiente de seguridad de estabilidad de 1.4 según el apartado 2.9.2.1 del *EN 1993 Part 4-2*.

5.5 Anillos Circunferenciales en Cubierta según EC-3

5.5.1 Anillos Circunferenciales de Arriostramiento de Vigas

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

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

El arriostramiento se diseñará para una fuerza estabilizadora igual al 1% de la suma de fuerzas normales en las partes estabilizadas. También hay que tener en cuenta los efectos de las imperfecciones geométricas equivalentes en el análisis de los sistemas de arriostramiento utilizados para asegurar la estabilidad lateral de elementos flectados o comprimidos, según *EAE Cap.V 22.4*, así como el criterio de pandeo elástico al tratarse de un elemento que trabaja a compresión.

$$e_{o,arr} = K_m * \frac{L_{e,e}}{500} \quad (5-58)$$

$$K_m = \sqrt{0.5 * \left(1 + \frac{1}{m}\right)} \quad (5-59)$$

Se dispondrán de 4 conjuntos de cruces de San Andrés en la cubierta para rigidizar la estructura, según la siguiente figura.

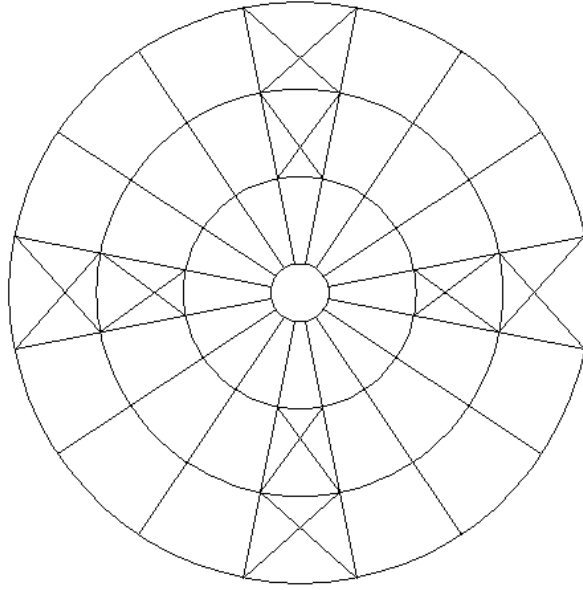


Figura 5-4. Distribución de Cruces de San Andrés en la cubierta del tanque.

Hay que considerar que en el último anillo no se colocarán dichas cruces, debido a que no se dispone de espacio suficiente para ser soldadas a los perfiles de los rigidizadores y dificultaría el proceso constructivo. Esto no resulta un inconveniente en la rigidización, ya que dicho anillo dispone de gran rigidez.

$$m = n_{vigas} / 4 \quad (5-60)$$

$$q = \sum N_{Ed} * 8 * \frac{e_o + \delta_q}{L_{e,e}^2} \quad (5-61)$$

Las comprobaciones a realizar son las siguientes:

$$\frac{F_1}{A_{arr}} \leq \sigma_{adm} \quad (5-62)$$

$$\frac{F_2}{A_{arr}} \leq \sigma_{adm} \quad (5-63)$$

$$F_2 = K_m * \frac{\sum N_{Ed}}{100} \quad (5-64)$$

Para dimensionar el elemento de arriostramiento mediante el criterio de pandeo se considera un coeficiente β igual a 1 para elementos biarticulados. El dimensionamiento se realizado mediante el archivo “cubierta” de Matlab. En dicho archivo se utiliza una función denominada “comprueba_pandeo”, el cual realiza la comprobación de pandeo para cada uno de los perfiles L hasta cumplir la condición reflejada en la ecuación 5-70.

Nota: Para resolver el dimensionado de estos elementos es necesario introducir en el archivo “dato” de Matlab el axil máximo al que estarán sometidos, calculados mediante un programa de elementos finitos. En el ejemplo que se resuelve en este capítulo se analiza el modelo del sistema de arriostramiento realizado mediante Ansys.

La esbeltez mecánica para unas condiciones de contorno biarticulada es:

$$\lambda_k = \frac{\beta_k * L_{arr}}{i_k} \quad (5-65)$$

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

$$\lambda_{red} = \frac{\lambda_k}{\lambda_{ref}} \quad (5-66)$$

$$\lambda_{ref} = \pi * \sqrt{\frac{E}{F_y}} \quad (5-67)$$

$$\phi = 0.5 * (1 + 0.21 * (\lambda_{red} - 0.2) + \lambda_{red}^2) \quad (5-68)$$

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \lambda_k^2}} \quad (5-69)$$

$$N_{Ed,arr} = \chi * A_{rr} * \frac{F_y}{\gamma_{Mo}} \quad (5-70)$$

5.5.2 Anillos Circunferenciales de Compresión en la Unión Cuerpo-Cubierta

La fuerza en el anillo circunferencial final de compresión (área donde la cubierta está conectada a la virola) debería verificar:

$$\frac{N_{Ed,c}}{A_{eff,a}} \leq f_{yd} \quad (5-71)$$

donde:

$$N_{Ed,c} = \frac{p_{v,Ed} * \left(\frac{D}{2}\right)^2}{2 * \tan(\theta - \theta_2)} \quad (5-72)$$

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

En el punto de conexión de las vigas:

$$M_{s,Ed} = - \left(\frac{p_{v,Ed} * (D/2)^3}{2 * \tan(\theta - \theta_2)} \right) * \left(1 - \frac{\beta}{\tan \beta} \right) \quad (5-73)$$

A media luz entre las vigas:

$$M_{F,Ed} = - \left(\frac{p_{v,Ed} * (D/2)^3}{2 * \tan(\theta - \theta_2)} \right) * \left(\frac{\beta}{\sin \beta} - 1 \right) \quad (5-74)$$

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

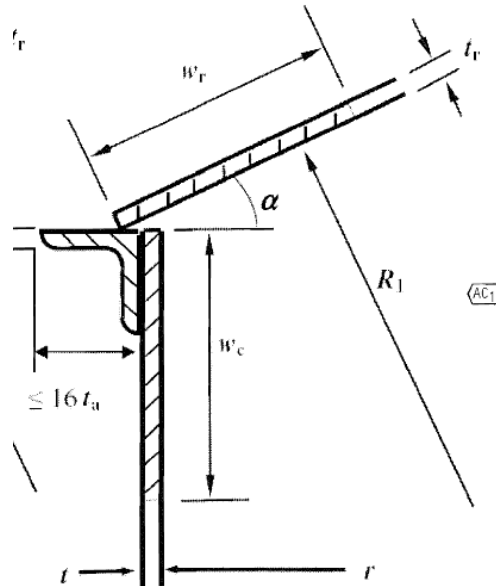


Figura 5-5. Áreas de participación en el anillo circunferencial de compresión.

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

$$w_r = 0.6 * \sqrt{R_c * (t_{r,adopt} - CA_r)} \quad (5-75)$$

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

$$w_c = 0.6 * \sqrt{\frac{D}{2} * (t_{última\ virola} - CA)} \quad (5-76)$$

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

$$A_{p,1} = w_r * (t_{r,adopt} - CA_r) \quad (5-77)$$

$$A_{p,2} = w_c * (t_{última\ virola} - CA) \quad (5-78)$$

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

$$A_{nec} = \frac{N_{Ed,c}}{\frac{2}{3} * \frac{F_{yr}}{\gamma_{M0}}} \quad (5-79)$$

Por tanto, el área final requerida se determina como:

$$F_{req} = A_{nec} - A_{p,1} - A_{p,2} \quad (5-80)$$

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

$$\sigma_{máx,c} = \frac{N_{Ed,c}}{(A_{p,1} + A_{p,2} + A_{p,3})} \quad (5-81)$$

La condición que ha de cumplirse es:

$$\sigma_{máx,c} \leq \frac{2}{3} * F_{yr} \quad (5-82)$$

5.6 Soporte Central de Cubierta según EN 1993 Part 4-2

El perfil del soporte central deberá reunir las siguientes condiciones:

$$b_k \geq 2 * h_k \quad (5-83)$$

$$A_1 \geq A_2 \quad (5-84)$$

$$I_{y,rig} \geq I_{y,mín,rig} = \frac{N_{Ed} * \left(\frac{D}{2}\right)^2}{\pi^2 * E} \quad (5-85)$$

$$h_k^2 * \left(\frac{A_1 * A_2}{A_1 + A_2}\right) \geq \frac{I_{y,rig}}{2 * \beta} \quad (5-86)$$

donde:

$$\beta = \frac{\pi}{n_{vigas}} \quad (5-87)$$

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

$$b_k = 2 * h_k \quad (5-88)$$

$$t_{sop} = t_1 = t_2 \quad (5-89)$$

$$A_1 = t_1 * b_k = A_2 = t_2 * b_k \quad (5-90)$$

$$h_k = h_{rig} + t_{sop} \quad (5-91)$$

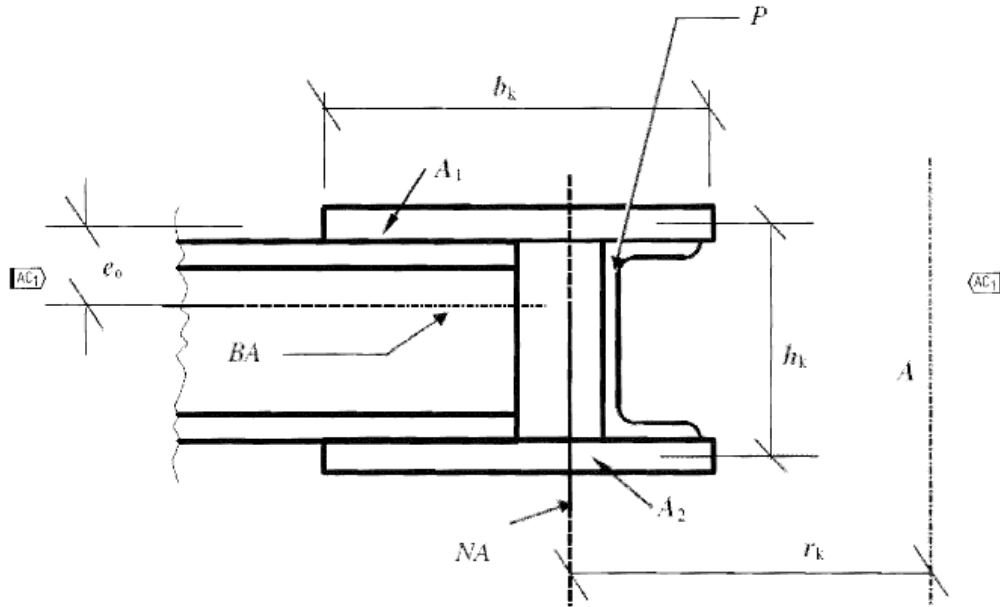
$$(h_{rig} + t_{sop})^3 * t_{sop} - \frac{I_{y,rig}}{2 * \beta} = 0 \quad (5-92)$$

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

$$e_o = \frac{h_k}{2} \quad (5-93)$$

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

$$r_k = 0.10 * \frac{D}{2} \quad (5-94)$$



P= profile section separating flanges; BA= beam axis; A= tank axis; NA= neutral axis of A1 and A2 for bending in the plane of the plates

Figura 5-6. Sección del soporte central de cubierta.

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

$$N_{Ed,sop} = \frac{N_{2,Ed}}{2 * \beta} \quad (5-95)$$

$$M_{r,Ed} = \frac{\beta}{2 * (3 + \beta^2)} * r_k * N_{2,Ed} \quad (5-96)$$

$$N_{2,Ed} = \frac{N_{Ed} * e_o}{h_k} + \frac{M_{Ed}}{h_k} \quad (5-97)$$

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

$$\sigma_{m\acute{a}x,sop} = \frac{N_{Ed,sop}}{A_2} + \frac{M_{r,Ed}}{W_{elast,y,sop}} \leq \sigma_{adm} \quad (5-98)$$

donde:

$$W_{elast,y,sop} = \frac{t_{sop} * b_k^2}{6} \quad (5-99)$$

5.7 Diagrama de Flujo del Cálculo de la Cubierta Fija

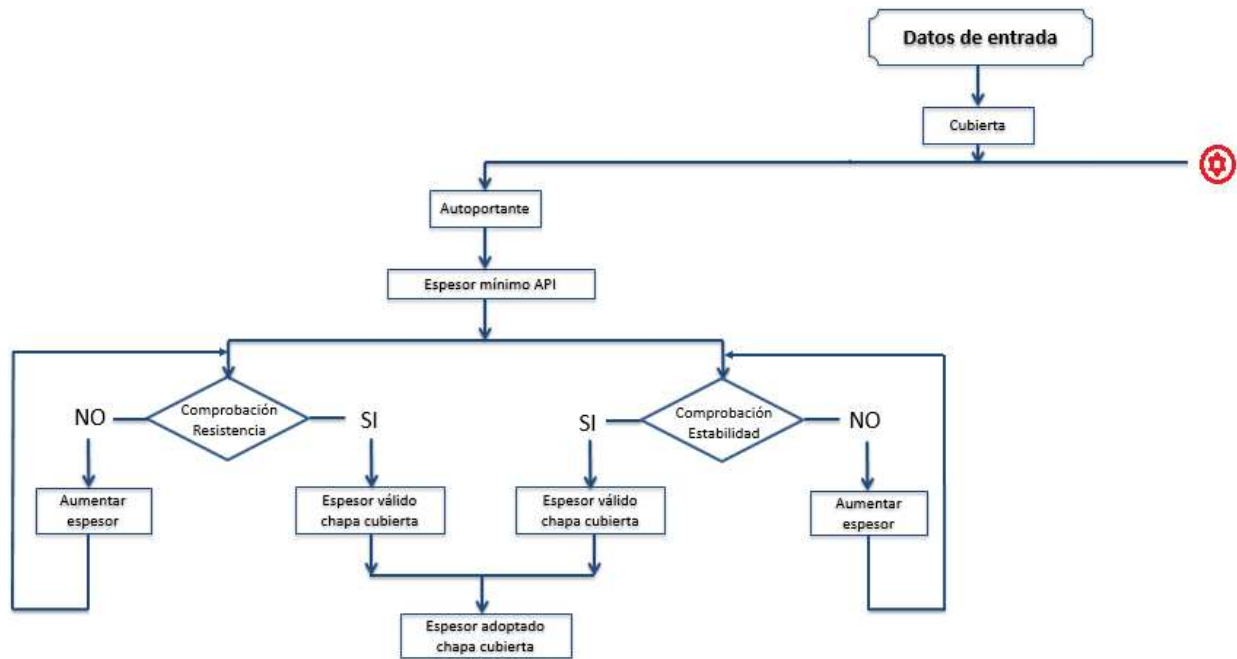


Figura 5-7. Diagrama de flujo del cálculo de la cubierta fija (Parte 1).

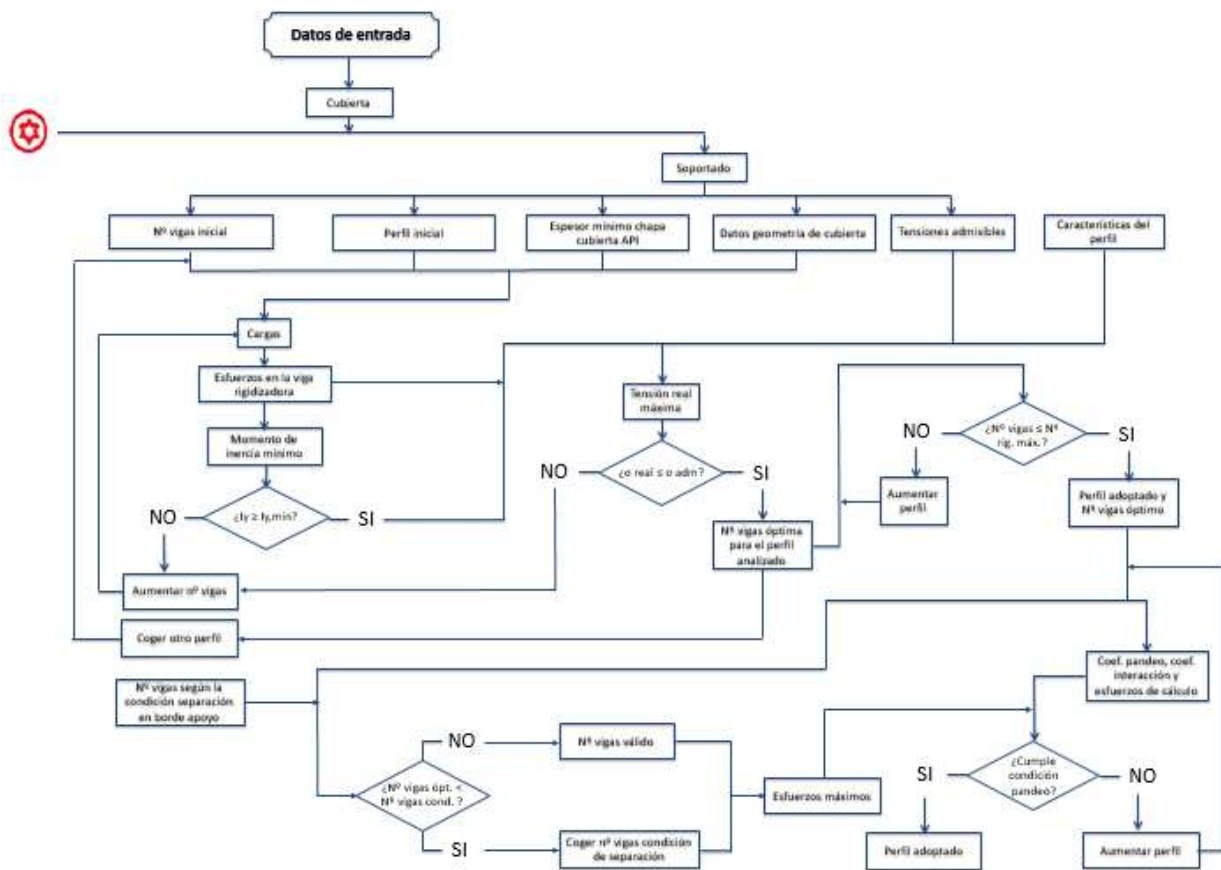


Figura 5-8. Diagrama de flujo del cálculo de la cubierta fija (Parte 2).

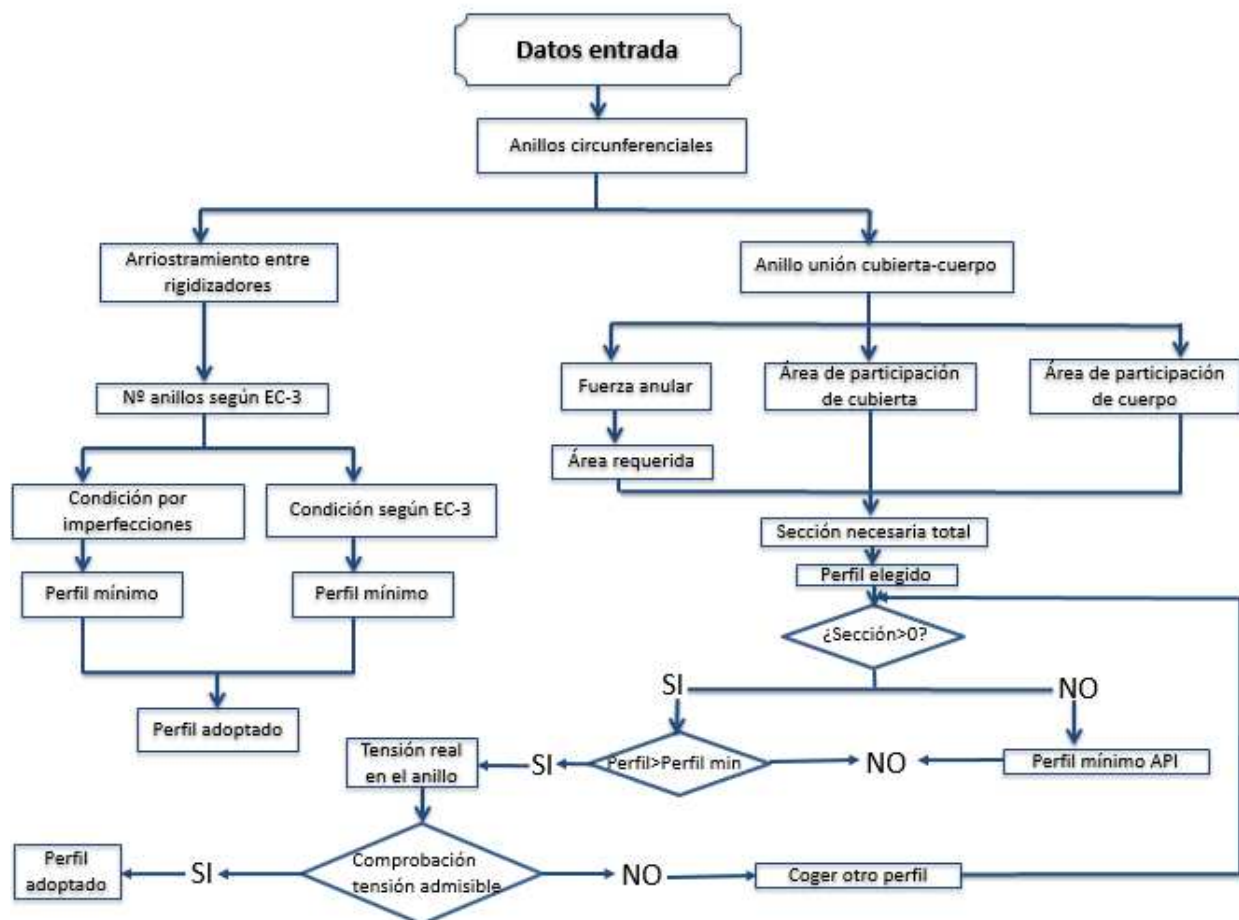


Figura 5-9. Diagrama de flujo del cálculo de los anillos circunferenciales de cubierta.

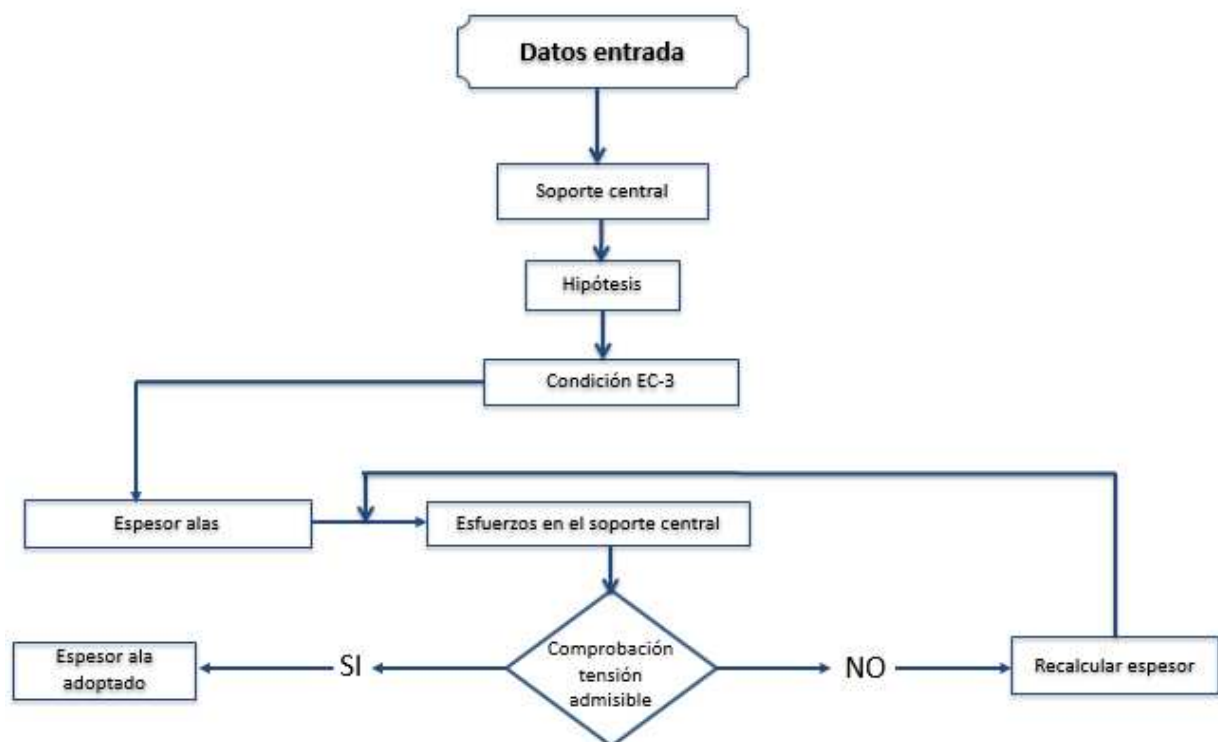


Figura 5-10. Diagrama de flujo del cálculo del soporte central de cubierta.

5.8 Ejemplo de Dimensionamiento de la Cubierta Fija

Para la realización de este proyecto se ha obtenido por realizar una cubierta esférica fija, la cual consta de varios elementos:

- La chapa de cubierta que puede ser autoportante o soportado por una estructura rigidizadora. Ambas opciones se contemplan en el cálculo siguiente, pero para un tanque de estas dimensiones es recomendable optar por una estructura soportada.
- La estructura rigidizadora, en caso de resolver la cubierta mediante esta opción, estará formada para este ejemplo por perfiles IPE que apoyan en el perímetro del tanque sobre el cuerpo del mismo, y sobre el soporte central que se sitúa en el centro del tanque. Estas vigas se encargan de transmitir los esfuerzos absorbidos por la chapa de cubierta al cuerpo del tanque.
- El soporte central que será el elemento situado en la coronación del tanque y sirve para dar estabilidad a la cúpula de cubierta, similar a la clave de un arco. Estará formado por un perfil armado circunferencial trabajando a axil.
- Anillo circunferencial de compresión en la unión cuerpo-cubierta que estará formado por perfiles en L. Este elemento se encarga de absorber los esfuerzos circunferenciales que tienden a expandir radialmente el cuerpo del tanque.
- Anillos de arriostramiento circunferenciales entre rigidizadores. También estarán formados por perfiles en L. Estos elementos sirven para dar rigidez a toda la cubierta de forma que impida el pandeo lateral de los rigidizadores.

5.8.1 Perfiles IPE utilizados del Catálogo de Arcelor Mittal

Tabla 5–2. Perfiles IPE utilizados (I).

Perfil IPE	Área (cm ²)	H (cm)	B (cm)	t _{alas} (cm)	t _{alma} (cm)	W _{elast,y} (cm ³)	W _{plast,y} (cm ³)
80	7.64	8	4.6	0.52	0.38	20	23.2
100	10.3	10	5.5	0.57	0.41	34.2	39.4
120	13.2	12	6.4	0.63	0.44	53	60.7
140	16.4	14	7.3	0.69	0.47	77.3	88.3
160	20.1	16	8.2	0.74	0.50	109	124
180	23.9	18	9.1	0.80	0.53	146	166
200	28.5	20	10	0.85	0.56	194	221
220	33.4	22	11	0.92	0.59	252	285
240	39.1	24	12	0.98	0.62	324	367
270	45.9	27	13.5	1.02	0.66	429	484
300	53.8	30	15	1.07	0.71	557	628
330	62.6	33	16	1.15	0.75	713	804
360	72.7	36	17	1.27	0.80	904	1019
400	84.5	40	18	1.35	0.86	1160	1307
450	98.8	45	19	1.46	0.94	1500	1702
500	116	50	20	1.60	1.02	1930	2194
550	134	55	21	1.72	1.11	2440	2787
600	156	60	22	1.90	1.20	3070	3512

Tabla 5–3. Perfiles IPE utilizados (II).

Perfil IPE	i_y (mm)	i_z (mm)	I_y (cm ⁴)	G (kg/m)
80	32.4	10.5	80.1	6
100	40.7	12.4	171	8.1
120	49	14.5	318	10.4
140	57.4	16.5	541	12.9
160	65.8	18.4	869	15.8
180	74.2	20.5	1317	18.8
200	82.6	22.4	1943	22.4
220	91.1	24.8	2772	26.2
240	99.7	26.9	3892	30.7
270	112	30.2	5790	36.1
300	125	33.5	8356	42.2
330	137	35.5	11770	49.1
360	150	37.9	16270	57.1
400	166	39.5	23130	66.3
450	185	41.2	33740	77.6
500	204	43.1	48200	90.7
550	224	44.5	67120	106
600	243	46.6	92080	122

5.8.2 Perfiles L utilizados del Catálogo de Arcelor Mittal

Tabla 5–4. Perfiles L utilizados.

Perfil L	Área (mm ²)	H (mm)	B (mm)	t (mm)	G (kg/m)	i _y (mm)
25x25x4	185	25	25	4	1.45	7.40
30x30x4	227	30	30	4	1.78	8.92
35x35x4	267	35	35	4	2.09	10.50
40x40x4	308	40	40	4	2.42	12.10
45x45x4	349	45	45	4	2.74	13.60
50x50x5	480	50	50	5	3.77	15.10
55x55x5	532	55	55	5	4.18	16.60
60x60x5	582	60	60	5	4.57	18.20
65x65x7	870	65	65	7	6.83	19.60
70x70x7	940	70	70	7	7.38	21.20
75x75x7	1010	75	75	7	7.93	22.80
80x80x7	1080	80	80	7	8.49	24.40
90x90x7	1220	90	90	7	9.61	27.50
100x100x7	1370	100	100	7	10.7	30.60
110x110x10	2120	110	110	10	16.6	33.50
120x120x10	2320	120	120	10	18.2	36.70
130x130x10	2520	130	130	10	19.8	39.90
150x150x12	3480	150	150	12	27.3	46.00
160x160x14	4320	160	160	14	33.9	48.90
180x180x14	4880	180	180	14	38.3	55.30
200x200x17	6550	200	200	17	51.4	61.40
250x250x21	10100	250	250	21	79.2	77.10

5.8.3 Dimensionamiento de la Cubierta Fija con Estructura Rigidizadora

El tipo de acero empleado para los elementos de cubierta es S 275 JR.

Las tensiones básicas de cálculo, de diseño y de prueba hidrostática respectivamente, para el acero empleado son:

$$S_{dr} = \min\left(\frac{2}{3} * 275, \frac{2}{5} * 430\right) = \min(183.3, 172) = 172 \text{ MPa}$$

$$S_{tr} = \min\left(\frac{3}{4} * 275, \frac{3}{7} * 430\right) = \min(206.3, 184.3) = 184.3 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{adm} = \min(172, 184.3) = 172 \text{ MPa}$$

Antes de realizar el dimensionamiento de la estructura se calculan los parámetros relacionados con la geometría de la cubierta esférica.

$$R_c = 1.5 * 34 = 51 \text{ m}$$

$$\theta = \arcsin\left(\frac{34}{2 * 51}\right) = 19.47^\circ$$

$$\theta_2 = \arcsin\left(\frac{0.1 * 34}{2 * 51}\right) = 1.91^\circ$$

$$H_{roof} = 51 * (1 - \cos(19.47)) = 2.92 \text{ m}$$

El espesor mínimo de la chapa de cubierta será el mínimo entre los siguientes valores:

$$t_1 = 5 \text{ mm}$$

$$t_2 = \frac{51}{2.4} * \sqrt{\frac{1.596}{2.2}} + 1 = 19.1 \text{ mm}$$

siendo T:

$$T = \max(1.596, 1.296) = 1.596 \text{ kPa}$$

$$t_3 = \frac{51}{2.7} * \sqrt{\frac{0.496}{2.2}} + 1 = 10 \text{ mm}$$

siendo U:

$$U = \max(0.404, 0.496) = 0.496 \text{ kPa}$$

$$t_{r,\min} = \min(5, 19.1, 10) = 5 \text{ mm}$$

El espesor adoptado para la chapa de cubierta incluyendo el sobreespesor de corrosión es de 6 mm.

El cálculo del perfil y número de vigas óptimas para la estructura rigidizadora se obtiene mediante el algoritmo implantado en el archivo de Matlab “cubierta”. En este apartado se representan los valores obtenidos en las ecuaciones 5-24 a 5-40 para cada perfil IPE del catálogo mediante una tabla excel. Los valores representados son los resultados obtenidos de la iteración para cada perfil, una vez han cumplido las restricciones definidas en las ecuaciones 5-17 a 5-21.

Antes de representar las tablas excel hay que calcular el área de la chapa de cubierta en verdadera magnitud y en proyección horizontal para poder obtener las presiones verticales aplicadas sobre la misma. También se obtiene la longitud en verdadera magnitud del arco rigidizador que se empleará para calcular la carga debido al peso de la estructura. Según las ecuaciones 5-14 a 5-16:

$$A_{casq} = 2 * \pi * 51 * 2.92 = 935.7 \text{ m}^2$$

$$A_h = \frac{\pi * 34^2}{4} = 907.9 \text{ m}^2$$

$$L_{vigas} = \frac{2 * \pi * (19.47 - 1.91) * 51}{360} = 15.63 \text{ m}$$

Las tablas Excel obtenidas para los perfiles IPE definidos son:

Tabla 5–5. Optimización perfiles IPE y número de rigidizadores (I).

Cálculos	Perfiles IPE					
	80	100	120	140	160	180
$N_{\text{vigas}} \text{ óptimas}$	891	349	188	121	82	60
Q_c [kN]	819.7	433.45	299.79	239.33	198.65	172.96
g_R [kPa]	0.903	0.477	0.330	0.264	0.219	0.190
g_H [kPa]	0.476	0.476	0.476	0.476	0.476	0.476
p_1 [kPa]	1.676	1.676	1.676	1.676	1.676	1.676
p_2 [kPa]	0.376	0.376	0.376	0.376	0.376	0.376
P [kPa]	1.676	1.676	1.676	1.676	1.676	1.676
$p_{v,Ed}$ [kPa]	2.579	2.153	2.006	1.940	1.895	1.866
β	0.0035	0.0090	0.0167	0.0260	0.0383	0.0524
P_{Ed} [kN]	2.628	5.602	9.689	14.554	20.980	28.244
N_{Ed} [kN]	5.737	12.231	21.152	31.774	45.803	61.663
$M_{\max}$ [mkN]	1.489	3.175	5.492	8.252	11.909	16.180
ε	0.3595	0.3590	0.3339	0.2948	0.2646	0.2350
M_{Ed} [mkN]	2.325	4.953	8.245	11.702	16.193	21.151
M_S [mkN]	2.073	4.416	7.348	10.425	14.409	18.648
$I_{y,\min}$ [cm ⁴]	80.00	170.54	294.94	443.05	638.67	859.81
$\sigma_{\max}$ [MPa]	123.75	156.71	171.59	170.76	171.35	170.67
σ_{adm} [MPa]	172	172	172	172	172	172

Tabla 5–6. Optimización perfiles IPE y número de rigidizadores (II).

Cálculos	Perfiles IPE					
	200	220	240	270	300	330
$N_{\text{vigas}} \text{ óptimas}$	44	34	26	20	15	12
Q_c [kN]	151.12	136.59	122.39	110.70	97.06	90.34
g_R [kPa]	0.166	0.150	0.135	0.122	0.107	0.100
g_H [kPa]	0.476	0.476	0.476	0.476	0.476	0.476
p_1 [kPa]	1.676	1.676	1.676	1.676	1.676	1.676
p_2 [kPa]	0.376	0.376	0.376	0.376	0.376	0.376
P [kPa]	1.676	1.676	1.676	1.676	1.676	1.676
$p_{v,Ed}$ [kPa]	1.842	1.826	1.811	1.798	1.783	1.776
β	0.0714	0.0924	0.1208	0.1571	0.2094	0.2618
P_{Ed} [kN]	38.018	48.772	63.233	81.619	107.915	134.335
N_{Ed} [kN]	83.002	106.481	138.052	178.192	235.603	293.282
$M_{\max}$ [mkN]	21.316	27.880	36.116	46.583	57.947	76.573
ε	0.2144	0.1928	0.1781	0.1545	0.1415	0.1251
M_{Ed} [mkN]	27.135	34.540	43.940	55.094	67.501	87.520
M_S [mkN]	24.443	30.516	38.853	48.750	63.483	77.537
$I_{y,\min}$ [cm ⁴]	1157.36	1484.74	1924.96	2484.66	3285.19	4089.45
$\sigma_{\max}$ [MPa]	168.99	168.94	170.92	167.25	164.98	169.60
σ_{adm} [MPa]	172	172	172	172	172	172

Tabla 5–7. Optimización perfiles IPE y número de rigidizadores (III).

Cálculos	Perfiles IPE					
	360	400	450	500	550	600
N_{vigas} óptimas	10	8	6	5	4	4
Q_c [kN]	87.55	81.33	71.39	69.54	65.01	74.83
g_R [kPa]	0.096	0.090	0.079	0.077	0.072	0.082
g_H [kPa]	0.476	0.476	0.476	0.476	0.476	0.476
p_1 [kPa]	1.676	1.676	1.676	1.676	1.676	1.676
p_2 [kPa]	0.376	0.376	0.376	0.376	0.376	0.376
P [kPa]	1.676	1.676	1.676	1.676	1.676	1.676
$p_{v,Ed}$ [kPa]	1.772	1.766	1.755	1.753	1.748	1.758
β	0.3142	0.3927	0.5236	0.6283	0.7854	0.7854
P_{Ed} [kN]	160.923	200.375	265.511	318.242	396.672	399.125
N_{Ed} [kN]	351.329	437.463	579.668	694.792	866.021	871.377
M_{max} [mkN]	91.712	114.151	151.160	181.159	225.739	227.280
ε	0.1084	0.0949	0.0862	0.0724	0.0648	0.0475
M_{Ed} [mkN]	102.862	126.125	165.427	195.290	241.372	238.615
M_s [mkN]	91.143	111.798	146.729	173.235	214.173	211.589
$I_{y,min}$ [cm ⁴]	4898.84	6099.86	8082.74	9687.99	12075.56	12150.24
σ_{max} [MPa]	162.11	160.50	168.96	161.08	163.55	133.58
σ_{adm} [MPa]	172	172	172	172	172	172

El perfil que cumple las restricciones impuestas en el apartado 5.3.5.1 es el IPE 200 con un número de vigas igual a 44.

$$I_{y,min,rig} = 1157.36 \text{ cm}^4 \leq I_{y,rig} = 1943 \text{ cm}^4$$

$$\sigma_{m\acute{a}x} = 168.99 \text{ MPa} \leq \sigma_{adm} = 172 \text{ MPa}$$

$$n_{vigas} = 44 \text{ vigas} \leq N_{rig,m\acute{a}x} = \frac{\pi * (0.1 * 34)}{2 * \frac{10}{100}} = 53.4 \text{ vigas}$$

$$n_{vigas} = 44 \text{ vigas} \geq \frac{2 * \pi * \left(\frac{34}{2}\right)}{3.25} = 32.87 \approx 33 \text{ vigas}$$

5.8.3.1 Comprobación de Pandeo del Rigidizador

Los rigidizadores están sometidos a compresión y flexión, por tanto se comprueba el criterio de pandeo a flexocompresión para perfiles IPE sometidos a carga uniforme sobre el eje fuerte. La longitud de pandeo para la comprobación sobre el eje “y” se tomará igual a la longitud de la viga, sin tener en cuenta la posible restricción al pandeo de la chapa de cubierta.

$$L_y = 17 - 0.1 * 17 = 15.3 \text{ m}$$

La longitud de pandeo para la comprobación sobre el eje “z” se toma como la distancia entre los anillos de arriostramiento entre rigidizadores de cubierta. En este caso tenemos un diámetro del tanque de 34 m, por tanto es necesario disponer de 4 anillos de arriostramiento en la cubierta, según el [2]. Estos anillos impedirán el pandeo lateral de los rigidizadores que forman la estructura soporte.

$$L_z = \frac{15.3}{4 + 1} = 3.06 \text{ m}$$

El perfil adoptado para los rigidizadores de cubierta según las restricciones del apartado anterior ha resultado ser el IPE 200. Dicho perfil cumple además el criterio de pandeo. El número de rigidizadores óptimo para dicho perfil es de 44 vigas. Los esfuerzos a los que están sometidos son los siguientes:

$$N_{ed} = 83.002 \text{ kN}$$

$$M_{Ed} = 27.135 \text{ mkN}$$

$$M_S = 24.443 \text{ mkN}$$

Aplicando las ecuaciones 5-43 a 5-47 se obtienen los coeficientes de pandeo para ambos ejes. El coeficiente β se toma igual a 1 (empotrado-desplazamiento vertical permitido).

$$\lambda_y = \frac{0.7 * 15300}{82.6} = 85.68$$

$$\lambda_z = \frac{0.7 * 3060}{22.4} = 63.94$$

$$\lambda_{ref} = \pi * \sqrt{\frac{210000}{275}} = 86.81$$

$$\lambda_{red,y} = \frac{85.68}{86.81} = 0.99$$

$$\lambda_{red,z} = \frac{63.94}{86.81} = 0.74$$

Tomando un coeficiente de imperfección igual a 0.21:

$$\phi_y = 0.5 * (1 + 0.21 * (0.99 - 0.2) + 0.99^2) = 1.073$$

$$\phi_z = 0.5 * (1 + 0.21 * (0.74 - 0.2) + 0.74^2) = 0.8305$$

$$\chi_y = \frac{1}{1.073 + \sqrt{1.073^2 - 0.99^2}} = 0.67$$

$$\chi_z = \frac{1}{0.8305 + \sqrt{0.8305^2 - 0.74^2}} = 0.83$$

El siguiente paso es clasificar la sección del perfil IPE 200 para calcular la resistencia y momento de cálculo de la sección. Suponemos agotamiento plástico en las alas del perfil.

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{F_{yr}}} = \sqrt{\frac{235}{275}} = 0.92$$

$$\frac{c}{t} = \frac{B - t_{alma}}{2 * t_{alas}} = \frac{100 - 5.6}{2 * 8.5} = 5.55 < 9 * \varepsilon = 9 * 0.92 = 8.28 \rightarrow \text{Clase 1}$$

Para el alma del perfil también suponemos agotamiento plástico.

$$\alpha = \frac{1}{2} + \frac{N_{Ed}}{2 * d * t_{alma} * F_{yr}} = \frac{1}{2} + \frac{83002}{2 * 183 * 5.6 * 275} = 0.65 \geq 0.5$$

$$\frac{c}{t} = \frac{d}{t_{alma}} = \frac{H - 2 * t_{alas}}{t_{alma}} = \frac{200 - 2 * 8.5}{5.6} = 32.7 < \frac{396 * \varepsilon}{13 * \alpha - 1} = \frac{396 * 0.92}{13 * 0.65 - 1} = 48.9 \rightarrow \text{Clase 1}$$

Por tanto, la clase de la sección del IPE 200 es 1.

La resistencia y momento de cálculo dependen del límite elástico del acero, del área del perfil y del módulo resistente plástico al tratarse de clase 1. Aplicando las ecuaciones 5-50 y 5-51:

$$N_{rk} = 2850 * \frac{275}{1000} = 783.75 \text{ kN}$$

$$M_{y,rk} = 221 * \frac{275}{1000} = 60.775 \text{ mkN}$$

Los coeficientes de interacción se obtienen mediante el coeficiente de momento equivalente, la resistencia y el momento de cálculo del perfil.

$$\alpha_s = \frac{-24.443}{27.135} = -0.90$$

$$C_{my} = 0.1 - 0.8 * (-0.90) = 0.82 \geq 0.4 \rightarrow \text{Cumple}$$

$$k_{yy} = 0.82 * \left(1 + (0.99 - 0.2) * \frac{83.002}{0.67 * 783.75 / 1.05} \right) = 0.928$$

$$k_{yy} = 0.928 < 0.82 * \left(1 + 0.8 * \frac{83.002}{0.67 * 783.75 / 1.05} \right) = 0.929 \rightarrow \text{Cumple}$$

$$k_{zy} = 0.6 * 0.928 = 0.557$$

Aplicando las ecuaciones 5-22 y 5-23 para la comprobación de pandeo por flexocompresión se obtiene:

$$\frac{83.002}{0.67 * \frac{783.75}{1.05}} + 0.928 * \frac{27.135}{\frac{60.775}{1.05}} = 0.60 \leq 1$$

$$\frac{83.002}{0.83 * \frac{783.75}{1.05}} + 0.557 * \frac{27.135}{\frac{60.775}{1.05}} = 0.40 \leq 1$$

5.8.4 Dimensionamiento de la Cubierta Fija Autoportante sin Estructura Rigidizadora

Cuando el tamaño del tanque no es relativamente grande, se puede optar por realizar una cubierta fija autoportante, compuesta únicamente por la chapa de cubierta. Para este ejemplo se va a realizar los cálculos necesarios para obtener el espesor de la chapa de cubierta, aunque la opción escogida ha sido la de realizar una estructura rigidizadora debido a las dimensiones del tanque en cuestión.

La chapa de cubierta debe cumplir las comprobaciones de resistencia y estabilidad definidas en el *EN 1993 Part 4.2*.

- Comprobación de Resistencia:

$$\frac{(2 + 0.5) * 51}{2 * t_{r,min}} \geq 0.5 * 275 * 1.05 \rightarrow t_{r,min} = 0.44 \text{ mm}$$

Es válido el espesor mínimo adoptado igual a 6 mm.

- Comprobación de Estabilidad:

$$PB = 0.05 * \left(1.25 * 210000 * \left(\frac{t_{r,min}}{51 * 1000} \right)^2 \right) * 1000 \geq p_{i,Ed} = 0.476 * 1.4 \rightarrow t_{r,min} = 11.5 \text{ mm}$$

El espesor mínimo de la chapa de cubierta sería el obtenido mediante la comprobación de estabilidad por pandeo elástico de la lámina. El espesor adoptado incluyendo el sobreespesor de corrosión sería 12.5 mm.

5.8.5 Dimensionamiento de los Anillos Circunferenciales de Arriostamiento entre Rigidizadores

En este caso tenemos un diámetro del tanque de 34 m, por tanto es necesario disponer de 4 anillos de arriostamiento en la cubierta. Estos anillos impedirán el pandeo lateral de los rigidizadores que forman la estructura soporte. Para proporcionar rigidez a la cubierta se disponen de 4 conjuntos de cruces de San Andrés, dispuestos según la figura 5-4.

El cálculo de los perfiles L necesarios se realiza en función de los efectos de las imperfecciones geométricas equivalentes y en el criterio de pandeo, ya que dichos elementos trabajan a compresión.

El dimensionamiento según el efecto de las imperfecciones se obtiene aplicando las ecuaciones 5-58 a 5-61.

$$e_{o,arr} = 0.739 * \frac{15.63}{500} = 0.0231 \text{ m}$$

$$K_m = \sqrt{0.5 * \left(1 + \frac{1}{11} \right)} = 0.739$$

$$m = 44/4 = 11$$

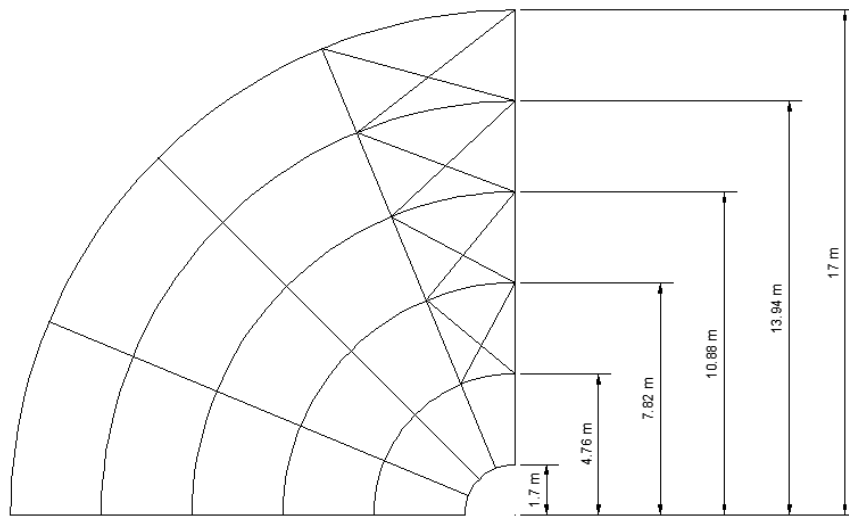


Figura 5-11. Disposición de anillos circunferenciales de arriostramiento.

Para calcular la fuerza estabilizadora equivalente que actúa sobre el conjunto de arriostramiento en el plano de la cubierta hay que tener en cuenta el axil calculado para el IPE 200, así como el número de elementos estabilizados que arriostra.

$$q = 83.002 * 11 * 8 * \frac{0.0231}{15.63^2} = 0.69 \text{ kN/m}$$

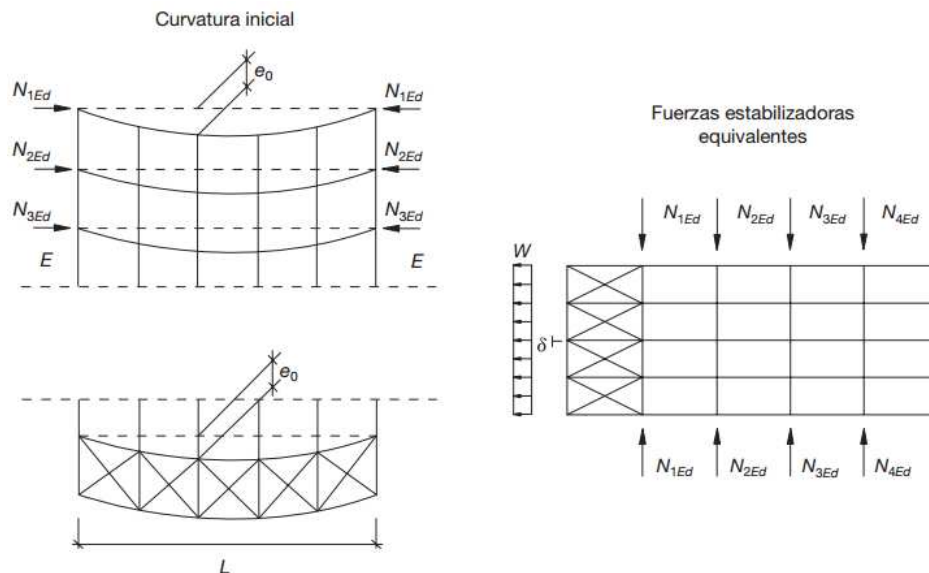


Figura 5-12. Curvatura inicial del rigidizador debido a imperfecciones y fuerzas estabilizadoras equivalentes.

Una vez obtenido la fuerza estabilizadora equivalente se utiliza un modelo de elementos finitos mediante el programa Ansys para obtener el axil máximo al que estarán sometidos los elementos de arriostramiento de cubierta.

Para el análisis se realizan 3 modelos del sistema de arriostramiento para comprobar cual es la situación más desfavorable.

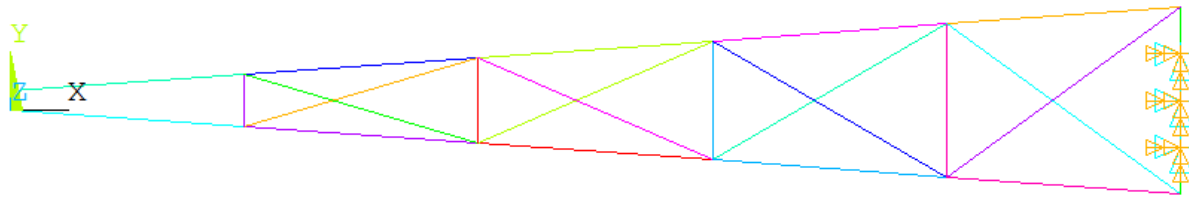


Figura 5-13. Modelo del sistema de arriostramiento incluido condiciones de contorno.

El modelo realizado pertenece a la parte de la cubierta donde se sitúan las cruces de San Andrés. Estos elementos soportan los esfuerzos de compresión de la cuarta parte de rigidizadores que se disponen en la cubierta, y por tanto resulta ser la parte más desfavorable del sistema de arriostramiento.

Para modelarlo se han utilizado como condiciones de contorno las pertenecientes a un sistema empotrado-libre, ya que se considera que la unión de la cubierta con el cuerpo del tanque permanece rígida después de la deformación, mientras que en la unión de las vigas con el soporte central está permitido el desplazamiento, tanto vertical como horizontal.

Para tener en cuenta el efecto de las imperfecciones de los rigidizadores se realiza el análisis incluyendo el efecto de grandes desplazamiento. De esta forma, se aplica el equilibrio en la situación deformada y no habría que iterar debido a la flecha, como ocurre en un análisis lineal.

- Conjunto formado por montantes y diagonales en ambas direcciones.

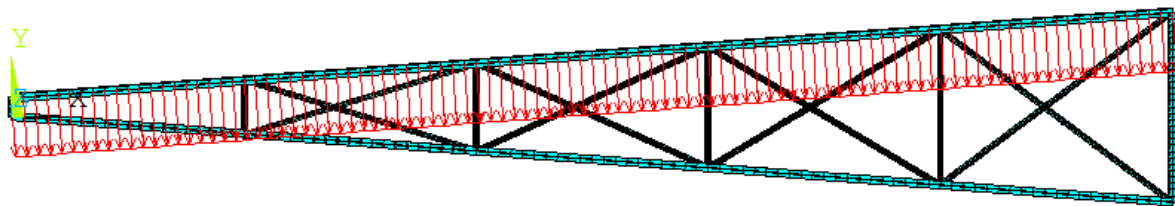


Figura 5-14. Conjunto de arriostramiento formado por montantes y diagonales en ambas direcciones.

En este caso se considera que el cortante al que está sometido el conjunto se reparte entre los montantes y las diagonales, por tanto el axil resultante en cada elemento es el menor de los 3 casos analizados.

```

1
LINE STRESS
STEP=1
SUB =1
TIME=1
AXIL_I  AXIL_J
MIN =-4681
ELEM=391
MAX =4344
ELEM=415

```

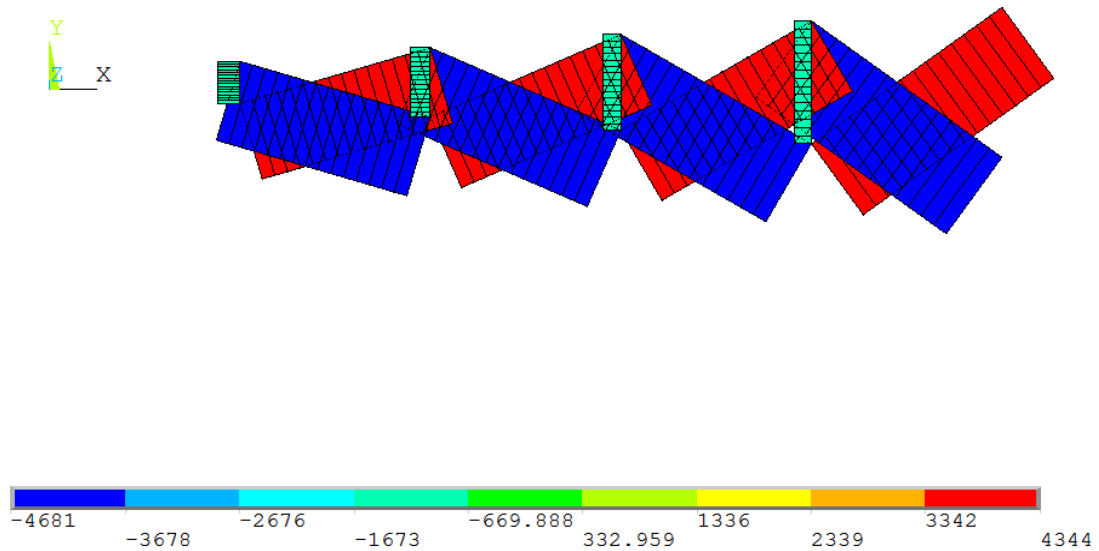


Figura 5-15. Esfuerzos axiles en el caso 1.

En la figura anterior se puede observar como los montantes trabajan a compresión, mientras que las diagonales trabajan a tracción y compresión respectivamente, según la dirección de las mismas.

- Conjunto formado por montantes y diagonales en una dirección.

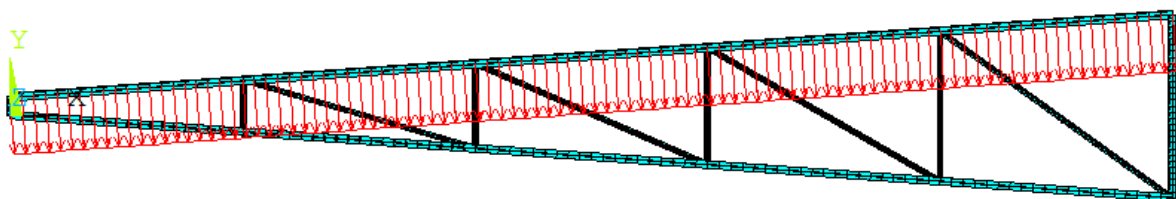


Figura 5-16. Conjunto de arriostramiento formado por montantes y diagonales en un dirección.

En el segunda caso se analiza la estructura constituida por montantes y diagonales que trabajan a compresión, similar a una celosía tipo Howe.

1
 LINE STRESS
 STEP=1
 SUB =1
 TIME=1
 AXIL_I AXIL_J
 MIN =-8966
 ELEM=347
 MAX =3677
 ELEM=298

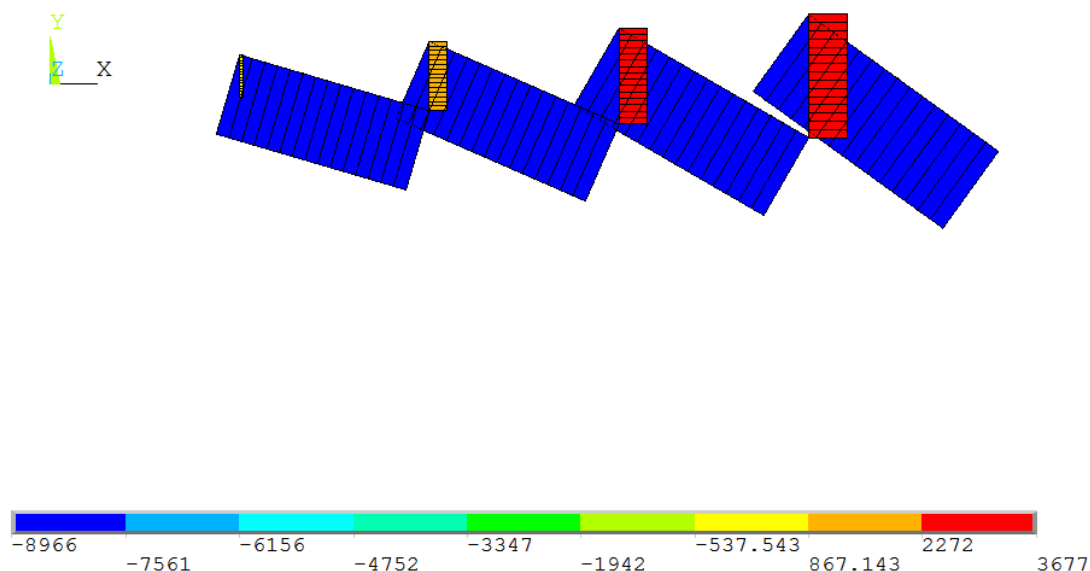


Figura 5-17. Esfuerzos axiles en el caso 2.

Los montantes están trabajando a tracción, mientras que las diagonales sólo trabajan a compresión. Este caso resulta más desfavorable que el anterior, ya que al disponer únicamente de diagonales en una dirección, el cortante al que está sometido el conjunto se reparte entre estas diagonales y los montantes.

- Conjunto formado por montantes y diagonales en la otra dirección.

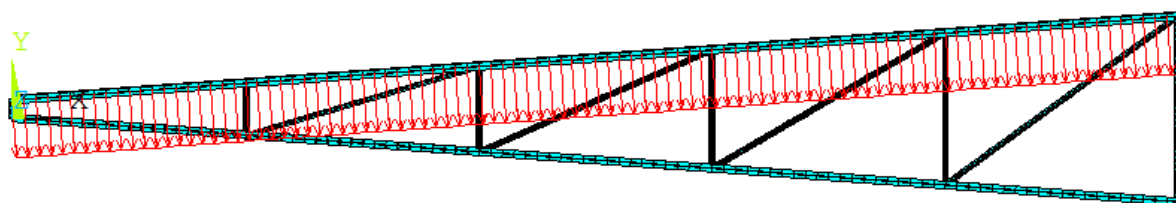


Figura 5-18. Conjunto de arriostramiento formado por montantes y diagonales en la otra dirección.

Por último se analiza el caso donde las diagonales se disponen en la dirección opuesta al caso anterior. Esta disposición del sistema es similar a la celosía tipo Pratt.

1

```

LINE STRESS
STEP=1
SUB =1
TIME=1
AXIL_I  AXIL_J
MIN =-5797
ELEM=290
MAX =8963
ELEM=347

```

ANSYS

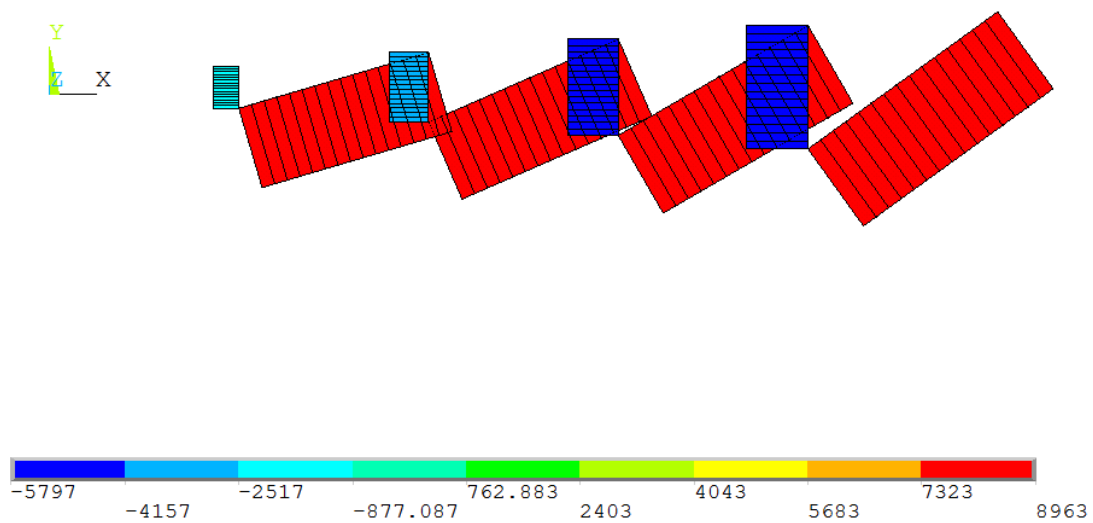


Figura 5-19. Esfuerzos axiales en el caso 3.

Los montantes trabajan a compresión, mientras que las diagonales trabajan únicamente a tracción.

El caso más desfavorable resulta ser aquel donde las diagonales trabajan a compresión (caso 2), ya que son los elementos de mayor esbeltez. Por tanto, se utiliza el axil máximo, igual a 9 kN, al que están sometidos las diagonales para dimensionar los elementos de arriostramiento por imperfecciones.

Las comprobaciones a realizar son las definidas en las ecuaciones 5-62 y 5-63.

$$\begin{aligned}
 F_1 &= 9 \text{ kN} \\
 A_{arr1} &= \frac{9 * 1000}{275} = 32.73 \text{ mm}^2 \\
 F_2 &= 0.739 * \frac{83.002 * 11}{100} = 6.75 \text{ kN} \\
 A_{arr2} &= \frac{6.75 * 1000}{275} = 24.55 \text{ mm}^2
 \end{aligned}$$

El dimensionado mediante el criterio de pandeo elástico aplica las ecuaciones 5-65 a 5-70 definidas en el apartado 5.5.1. La longitud del arriostramiento empleada para el cálculo pertenece a la diagonal situada entre el anillo de mayor perímetro y la envolvente del tanque.

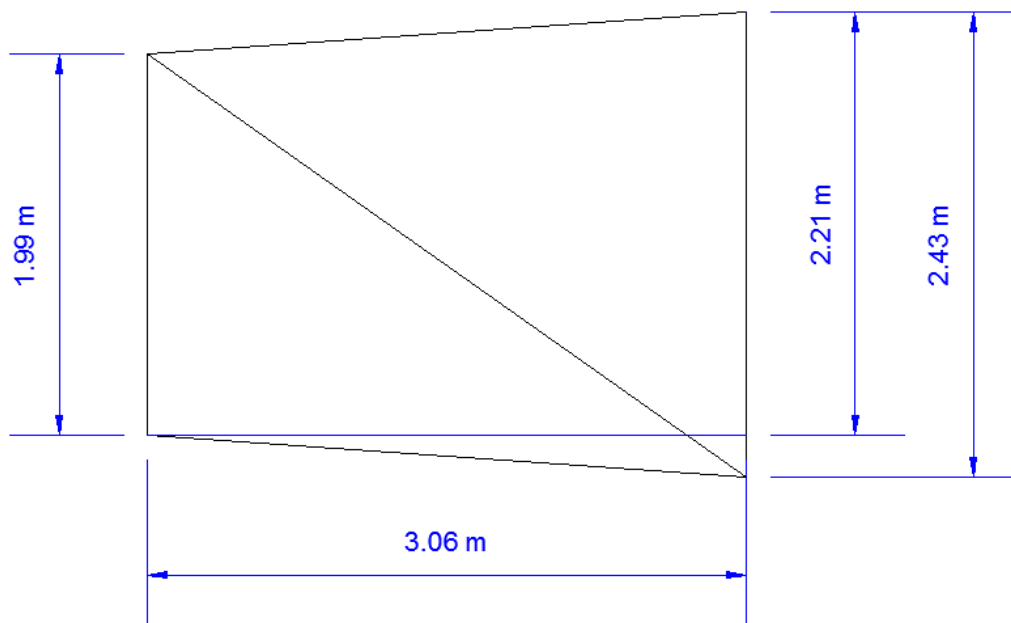


Figura 5-20. Longitud del arriostramiento.

$$L_{arr} = \sqrt{2.21^2 + 3.06^2} = 3.77 \text{ m}$$

Se limita la esbeltez mecánica de los elementos secundarios a 250.

El perfil L obtenido mediante el algoritmo de Matlab es el 50x50x5. El radio de giro de este perfil es 15.1 mm y el área igual a 480 mm². Realizando la comprobación de pandeo en función de este perfil calculado se comprueba que el perfil es válido para los elementos de arriostramiento.

$$\lambda_k = \frac{1 * 3.77 * 1000}{15.1} = 249.67$$

$$\lambda_{red} = \frac{249.67}{86.81} = 2.88$$

$$\lambda_{ref} = \pi * \sqrt{\frac{210000}{275}} = 86.81$$

$$\phi = 0.5 * (1 + 0.21 * (2.88 - 0.2) + 2.88^2) = 4.9286$$

$$\chi = \frac{1}{4.9286 + \sqrt{4.9286^2 - 2.88^2}} = 0.112$$

Para el dimensionado mediante criterio de pandeo se utiliza el esfuerzo de compresión máximo al que estará sometido el arriostramiento según el modelo de Ansys. El caso más desfavorable ocurre cuando se disponen diagonales en una sola dirección y éstas están trabajando a compresión (caso 2).

$$F_{m\acute{a}x} = 9 \text{ kN} = 0.112 * 480 * \frac{275}{1.05 * 1000} = 14.08 \text{ kN} \rightarrow \text{Se verifica}$$

5.8.6 Dimensionamiento del Anillo Circunferenciales de la Unión Cuerpo-Cubierta

Según la tabla 1-2 del capítulo 1, el perfil mínimo del anillo circunferencial en la unión cuerpo-cubierta depende del diámetro del tanque. En este caso tenemos un diámetro de 34 m, por tanto el perfil mínimo será L75x75x10.

El dimensionamiento se basa en calcular las áreas de participación de la cubierta y el cuerpo del tanque que influyen en el estado tensional del anillo. Para ello se calcula el área necesaria que tiene que cumplir dicho perfil para cumplir el criterio de plastificación.

El área de participación de la cubierta y del cuerpo respectivamente se obtiene mediante las ecuaciones 5-75 a 5-78. El espesor adoptado de la chapa de cubierta es el calculado para el caso de una cubierta con estructura rigidizadora.

$$w_r = 0.6 * \sqrt{51 * 1000 * (6 - 1)} = 302.99 \text{ mm}$$

$$w_c = 0.6 * \sqrt{\frac{34}{2} * 1000 * (10.1 - 1)} = 235.99 \text{ mm}$$

$$A_{p,1} = 302.99 * (6 - 1) = 1514.95 \text{ mm}^2$$

$$A_{p,2} = 235.99 * (10.1 - 1) = 2147.51 \text{ mm}^2$$

La fuerza en el anillo es:

$$N_{Ed,c} = \frac{1.842 * \left(\frac{34}{2}\right)^2}{2 * \tan(19.47 - 1.91)} = 841.11 \text{ kN}$$

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

$$A_{nec} = \frac{841.11 * 1000}{\frac{2}{3} * 275} = 4587.87 \text{ mm}^2$$

Por tanto, el área final requerida para el perfil será:

$$F_{req} = 4587.87 - 1514.95 - 2147.51 = 925.41 \text{ mm}^2$$

El perfil que cumple con el área requerida es el L70x70x7. Como el perfil necesario es inferior al perfil mínimo especificado en la tabla 1-2 se adopta el perfil L80x80x7 con un área de 1080 mm².

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

$$\sigma_{máx,c} = \frac{841.11 * 1000}{(1514.95 + 2147.51 + 1080)} = 177.36 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{máx,c} = 177.36 \text{ MPa} \leq \sigma_{adm} = \frac{2}{3} * 275 = 183.33 \text{ MPa}$$

El perfil adoptado es admisible.

$$Separación = \frac{2 * \pi * 17}{44} = 2.43 \text{ m}$$

Como la separación entre rigidizadores adyacentes en el punto de conexión con el cuerpo del tanque no excede de 3.25 m, la comprobación de estabilidad no es obligatoria, así como los momentos de flexión en el anillo.

5.8.7 Dimensionamiento del Soporte Central

El soporte central se compone de un perfil armado. El diseño se realiza mediante la comprobación de resistencia del ala inferior, según la norma *EN 1993 Part 4.2*.

Para obtener el perfil para el soporte central se aplican las condiciones definidas en las ecuaciones 5-83 a 5-86. Utilizando la ecuación 5-92 en la función “fzero” programada en el archivo “cubierta” de Matlab se obtiene el espesor mínimo necesario para las alas del perfil.

$$\beta = \frac{\pi}{44} = 0.0714$$

$$(20 + t_{sop})^3 * t_{sop} - \frac{1943}{2 * 0.0714} = 0 \rightarrow t_{sop} = 1.4 \text{ cm}$$

Calculando el axil de diseño y el momento al que estará solicitado el perfil armado se puede realizar la comprobación del ala inferior según las ecuaciones 5-95 a 5-97.

$$N_{2,Ed} = \frac{83.002 * \frac{21.4/100}{2}}{21.4/100} + \frac{27.135}{21.4/100} = 168.3 \text{ kN}$$

$$N_{Ed,sop} = \frac{168.3}{2 * 0.0714} = 1178.57 \text{ kN}$$

$$M_{r,Ed} = \frac{0.0714}{2 * (3 + 0.0714^2)} * 0.1 * \frac{34}{2} * 168.3 = 3.40 \text{ mkN}$$

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

$$W_{elast,y,sop} = \frac{1.4 * (2 * 21.4)^2}{6} = 427.43 \text{ cm}^3$$

$$\sigma_{máx,sop} = \frac{1178.57 * 10}{1.4 * 2 * 21.4} + \frac{3.40 * 1000}{427.43} = 204.65 \text{ MPa} \leq \sigma_{adm} = 172 \text{ MPa}$$

No cumple la comprobación impuesta, por tanto se recalcula el espesor de las alas mediante la función “comprueba_soporte_central” en Matlab. Las dimensiones finales del espesor, altura y ancho del perfil armado son 1.7, 21.7 y 43.4 cm, respectivamente.

6 VERIFICACIÓN DEL EFECTO DEL VIENTO

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

Los pasos necesarios para verificar el efecto del viento queda definido en el apartado 5.11 de la norma [1].

6.1 Nomenclatura

$A_{w,cubierta}$	Área envolvente de la cubierta para viento [m^2]
$A_{w,cuerpo}$	Área envolvente del cuerpo del tanque para viento [m^2]
D	Diámetro del tanque [m]
g	Aceleración de la gravedad [m/s^2]
H	Altura total del tanque [m]
K_v	Factor de corrección del viento [-]
M_{dl}	Momento de vuelco en la unión cuerpo-fondo debido a la altura del líquido [mN]
M_{DLR}	Momento unión cuerpo-fondo debido al peso nominal de la chapa de cubierta [mN]
M_f	Momento en la unión cuerpo-fondo debido a la altura del líquido [mN]
M_{pi}	Momento en la unión cuerpo-fondo debido a la presión interna de diseño [mN]
$M_{v,cubierta}$	Momento de vuelco de la cubierta [mN]
$M_{v,cuerpo}$	Momento de vuelco del cuerpo [mN]
M_w	Momento de vuelco en la unión cuerpo-fondo [mN]
P_{di}	Presión de diseño interna [kPa]
$p_{din,cubierta}$	Presión dinámica de la cubierta, según [1] [kPa]
$p_{din,cuerpo}$	Presión dinámica del cuerpo, según [1] [kPa]
v	Velocidad de diseño del viento [km/h]
W_4	Peso de la placa de cubierta [kg]
$W_{s,r}$	Peso del cuerpo del tanque más la estructura soporte de cubierta [kg]
w_w	Peso del líquido, según [1] [N]

6.2 Carga de Viento sobre el Tanque (Estabilidad frente al Vuelco)

La estabilidad al vuelco será calculada usando la presión del viento dada según el CTE.

Las presiones dinámicas debidas al efecto del viento sobre el tanque se determinan según el apartado 5.2.1 de la norma [1].

La presión dinámica de diseño del viento sobre el cuerpo del tanque será determinada según la siguiente

expresión, sobre el área proyectada verticalmente de la superficie del cuerpo del tanque:

$$p_{din,cuerpo} = 0.86 * \left(\frac{v}{190}\right)^2 \quad (6-1)$$

$$A_{w,cuerpo} = D * H \quad (6-2)$$

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

$$p_{din,cubierta} = 1.44 * \left(\frac{v}{190}\right)^2 \quad (6-3)$$

$$A_{w,cubierta} = \frac{\pi * D^2}{4} \quad (6-4)$$

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

$$K_v = \left(\frac{v}{190}\right)^2 \quad (6-5)$$

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

$$M_{v,cuerpo} = p_{din,cuerpo} * A_{w,cuerpo} * \frac{H}{2} \quad (6-6)$$

$$M_{v,cubierta} = p_{din,cubierta} * A_{w,cubierta} * \frac{D}{2} \quad (6-7)$$

$$M_w = M_{v,cuerpo} + M_{v,cubierta} \quad (6-8)$$

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

$$M_{pi} = P_{di} * \frac{D}{2} * \frac{\pi * D^2}{4} \quad (6-9)$$

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

$$M_{dl} = W_{s_r} * g * \frac{D}{2} \quad (6-10)$$

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

$$M_f = w_w * \frac{D}{2} \quad (6-11)$$

El momento alrededor de la unión cuerpo-fondo debido al peso de la chapa de cubierta es:

$$M_{DLR} = W_4 * g * \frac{D}{2} \quad (6-12)$$

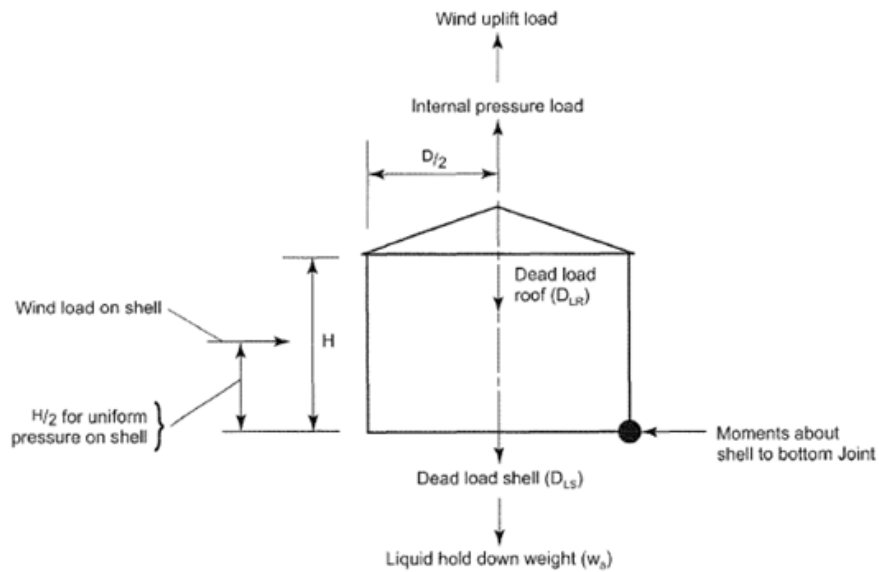


Figura 6-1. Momentos de vuelco sobre la unión cuerpo-fondo del tanque.

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

$$0.6 * M_w + M_{pi} < \frac{M_{dl}}{1.5} + M_{DLR} \quad (6-13)$$

$$M_w + 0.4 * M_{pi} < \frac{M_{dl} + M_f}{2} + M_{DLR} \quad (6-14)$$

6.3 Diagrama de Flujo de la Verificación del Efecto del Viento

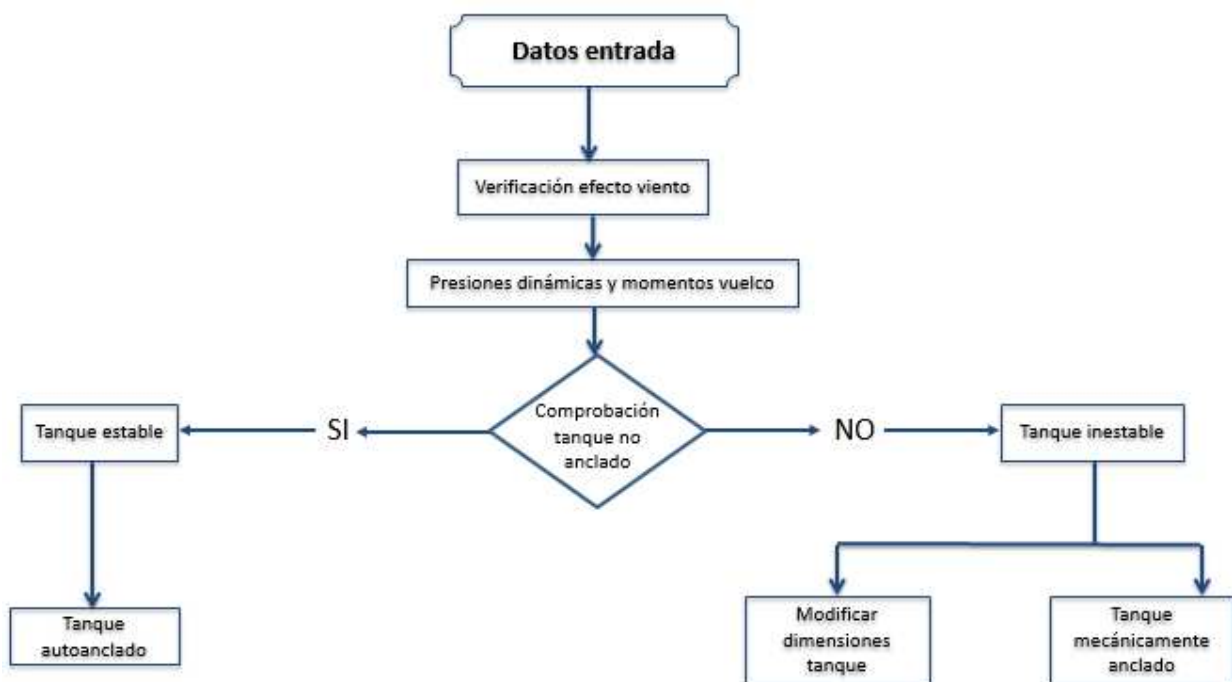


Figura 6-2. Diagrama de flujo de la verificación del efecto del viento.

6.4 Ejemplo de Verificación del Efecto del Viento

Para comprobar la estabilidad al vuelco del tanque lo primero es calcular las presiones dinámicas del cuerpo y la cubierta, respectivamente, en función de la velocidad del viento en la zona de emplazamiento del tanque, y las áreas proyectadas que se emplearán para calcular los momentos de vuelco. Aplicando las ecuaciones 6-1 a 6-4:

$$p_{din,cuerpo} = 0.86 * \left(\frac{162}{190}\right)^2 = 0.625 \text{ kPa}$$

$$A_{w,cuerpo} = 34 * 22.5 = 765 \text{ m}^2$$

$$p_{din,cubierta} = 1.44 * \left(\frac{162}{190}\right)^2 = 1.047 \text{ kPa}$$

$$A_{w,cubierta} = \frac{\pi * 34^2}{4} = 907.92 \text{ m}^2$$

El momento de vuelco alrededor de la unión cuerpo-fondo según las ecuaciones 6-6 a 6-8 es:

$$M_{v,cuerpo} = 0.625 * 1000 * 765 * \frac{22.5}{2} = 5,378,906.25 \text{ mN}$$

$$M_{v,cubierta} = 1.047 * 1000 * 907.92 * \frac{34}{2} = 16,160,068.08 \text{ mN}$$

$$M_w = 5,378,906.25 + 16,160,068.08 = 21,538,974.33 \text{ mN}$$

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

$$M_{pi} = 2 * 1000 * \frac{34}{2} * \frac{\pi * 34^2}{4} = 30,869,289.41 \text{ mN}$$

Los valores de los pesos necesarios para el cálculo de los momentos se obtienen de la resolución del ejemplo definido en el anexo pesos.

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

$$M_{dl} = 285,254.95 * 9.81 * \frac{34}{2} = 47,571,968.01 \text{ mN}$$

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

$$M_f = 69,347.59 * \frac{34}{2} = 1,178,909.03 \text{ mN}$$

El momento alrededor de la unión cuerpo-fondo debido al peso de la chapa de cubierta es:

$$M_{DLR} = 44,071 * 9.81 * \frac{34}{2} = 7,349,720.67 \text{ mN}$$

Las comprobaciones a realizar para comprobar si es necesario anclar el tanque debido al viento, según las ecuaciones 6-13 y 6-14 son las siguientes:

$$43,792,674.01 \text{ mN} < 39,064,366.01 \text{ mN}$$

$$33,886,690.09 \text{ mN} < 31,725,159.19 \text{ mN}$$

No se cumple ninguna de las comprobaciones, por tanto es necesario anclar el tanque debido al efecto del viento.

7 VERIFICACIÓN DEL EFECTO SÍSMICO

El objetivo de este estudio es realizar una revisión de los criterios básicos de diseño para tanques cilíndricos de pared delgada, en función de los efectos sísmicos a los que están sometidos, que proporcione los requisitos mínimos en el diseño de dichos tanques para la protección de la vida y la prevención de un colapso catastrófico del tanque. Para ello se aplica el apéndice E de la norma [1], la cual no implica que los daños en el tanque no ocurran durante los efectos sísmicos.

7.1 Nomenclatura

A	Coefficiente de aceleración lateral [%g]
A_c	Parámetro de espectro de aceleración convectiva [%g]
A_i	Parámetro de espectro de aceleración impulsiva [%g]
A_v	Coefficiente vertical de aceleración sísmica [%g]
D	Diámetro del tanque [m]
F	Fuerza lateral de diseño [N]
F_a	Coefficiente de amplificación del terreno [-]
F_c	Tensión sísmica longitudinal admisible [MPa]
F_{ty}	Límite elástico mínimo del acero [MPa]
F_v	Coefficiente de velocidad [-]
F_{vert}	Fuerza sísmica vertical [N]
F_y	Límite elástico del acero del cuerpo [MPa]
F_{yb}	Límite elástico mínimo del acero de la placa del fondo [MPa]
G	Gravedad específica de diseño del líquido [-]
G_e	Gravedad específica incluyendo el efecto sísmico vertical [-]
H	Altura total del tanque [m]
h_i	Altura de cada virola [m]
H_{roof}	Altura de la cubierta esférica [m]
H_w	Altura del nivel de líquido dentro del depósito [m]
I	Factor de importancia [-]
J	Ratio de anclaje [-]
K	Coefficiente ajuste de aceleración espectral, 0.5-5% amortig., según nomenclatura
K_s	Coefficiente de ajuste del espectro de aceleración amortiguada 5% [-]
L	Ancho mínimo de la chapa anular [m]
L_s	Ancho del anillo anular para proporcionar la fuerza resistente [m]
M_{rw}	Momento en el perímetro de la base debido al cuerpo [mN]
M_s	Momento en la base debido a la losa [mN]
n_A	Número de anclajes mínimos
N_c	Fuerza circunferencial en la pared del tanque debido al modo convectivo [N/mm]

N_h	Fuerza hidrostática circunferencial debido a presión del producto [N/mm]
N_i	Fuerza circunferencial en la pared del tanque debido al modo impulsivo [N/mm]
n_{vir}	Número de virolas que componen el cuerpo del tanque
P_{AB}	Carga de diseño de anclajes [N]
P_f	Fuerza soportada por vuelco basado en la máxima compresión longitudinal en la base del cuerpo [N/m]
Q	Factor de escala para espectro de aceleración, según ASCE 7 [-]
R_{wc}	Factor de reducción de fuerza para modo convectivo [-]
R_{wi}	Factor de reducción de fuerza para modo impulsivo [-]
S_1	Parámetro de respuesta, amortiguado 5%, período 1 s [%g]
S_0	Parámetro de respuesta, amortiguado 5%, período 0 s [%g]
S_p	Aceleración de cálculo de la zona [%g]
S_s	Parámetro de respuesta, amortiguado 5%, período 0.2 s [%g]
t_a	Espesor del anillo anular bajo cuerpo [mm]
t_{adopt}	Espesores adoptados en las virolas que componen el cuerpo del tanque [mm]
T_c	Período para comportamiento convectivo [seg]
T_L	Período local para períodos largos [seg]
T_o	Coeficiente definido en la nomenclatura de la norma [1] <i>Apéndice E</i>
T_s	Coeficiente definido en la nomenclatura de la norma [1] <i>Apéndice E</i>
t_s	Espesor de la 1ª virola del depósito, situada en la parte inferior [mm]
t_u	Espesor uniforme del tanque [mm]
V	Esfuerzo cortante en la base [N]
V_c	Esfuerzo cortante por componente convectivo del peso efectivo de bailoteo [N]
V_i	Esfuerzo cortante por componente impulsiva del peso efectivo del tanque y contenidos [N]
V_s	Esfuerzo cortante admisible [N]
w_a	Fuerza resistente de los contenidos por unidad de longitud circunferencial [N/m]
w_{AB}	Carga de levantamiento de diseño sobre anclajes por unidad de longitud [N/m]
W_c	Peso eficaz convectivo del líquido [N]
W_{eff}	Peso efectivo de tanque que contribuye a la respuesta del sismo [N]
W_f	Presión del peso de la placa del fondo por unidad de área [kPa]
w_f	Presión del peso de la placa del fondo por unidad de longitud circunferencial [N/m]
W_{fd}	Peso total de la cimentación del tanque [N]
W_g	Peso del producto aplicado directamente sobre la cimentación [N]
W_i	Peso eficaz impulsivo del líquido [N]
w_{int}	Carga de diseño del producto por unidad de longitud circunferencial [N/m]
W_p	Presión del mínimo producto por unidad de área [kPa]
W_r	Peso de la cubierta fija más accesorios y 10% de carga de nieve [N]
w_{rs}	Peso de cubierta que actúa sobre el cuerpo más el 10% de carga de nieve [N/m]
W_s	Peso total del cuerpo del tanque y accesorios [N]
w_t	Peso del tanque y cubierta actuando en la base del cuerpo [N/m]
W_{tot}	Presión total en el fondo por unidad de área [kPa]
X_c	Altura desde el fondo al centro acción fuerzas laterales (convectivo en anillo) [m]
X_{cs}	Altura desde el fondo al centro acción fuerzas laterales (convectivo en losa) [m]

X_i	Altura desde fondo al centro acción fuerzas laterales (impulsivo en anillo) [m]
X_{is}	Altura desde el fondo al centro acción fuerzas laterales (impulsivo en losa) [m]
X_R	Altura desde la coronación al centro de gravedad de la cubierta [m]
X_S	Altura desde el fondo al centro de gravedad del cuerpo del tanque [m]
Y	Distancia desde la superficie del líquido al punto analizado [m]
z_i	Altura desde el fondo al centro de gravedad de cada virola [m]
μ	Coefficiente de fricción ante deslizamiento [-]
σ_{adm}	Tensión máxima admisible en el rigidizador de cubierta [MPa]
σ_c	Tensión de compresión longitudinal en el cuerpo [MPa]
σ_h	Tensión circunferencial en la pared del tanque debido a la presión hidrostática [MPa]
σ_S	Tensión circunferencial en la pared del tanque debido al sismo [MPa]
σ_T	Tensión circunferencial total en la pared del tanque [MPa]

7.2 General

El apéndice E de la norma está basado en métodos de diseño de tensión admisible con la combinación de cargas especificadas en el mismo. Los métodos usan un análisis de fuerza lateral equivalente que aplican fuerzas estáticas laterales equivalentes a un modelo matemático lineal del tanque basado en una pared rígida.

Los requisitos de movimiento de tierras de este apéndice se derivan de la norma ASCE-7, que se basa en un terremoto considerando el movimiento máximo como el movimiento del suelo debido a un efecto con el 2% de probabilidad de exceder en un plazo de 50 años.

Los movimientos sísmicos toman importancia en el diseño de tanques cilíndricos verticales, sobre todo en zonas con alto grado de sismicidad. Estos movimientos provocan dos tipos de reacciones en el tanque:

- Los movimientos de alta frecuencia que provocan un movimiento lateral del terreno donde está construido el tanque.
- Los movimientos de baja frecuencia que provocan un movimiento de la masa del líquido contenido, provocando oleaje dentro del tanque. Este movimiento lateral genera fuerzas que actúan en el centro de gravedad del tanque, ocasionando la inestabilidad del conjunto, que multiplicado por la distancia respecto al fondo, originan un momento de vuelco que produce compresión longitudinal y deforma el cuerpo. Se diseña para resistir este fenómeno.

Los procedimientos de diseño pseudo-dinámicos 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:** es el primer modo de vibración del líquido contenido en el tanque. El líquido experimenta un movimiento oscilatorio respecto a un eje horizontal que coincide con el diámetro del tanque.

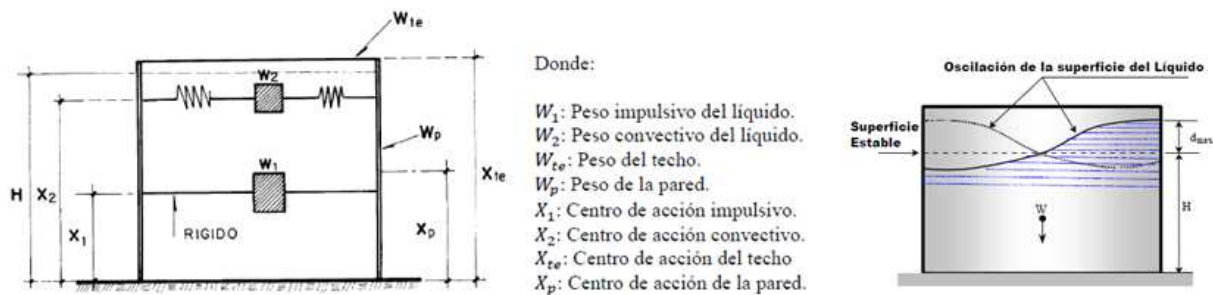


Figura 7-1. Representación de los modos de vibración para sismo horizontal y movimiento del fluido en el tanque.

Se observa cómo la masa W_1 (W_i) se modela unida al tanque rígidamente, representando el movimiento del líquido como un cuerpo rígido. Por su parte, la masa W_2 (W_c) se modela unida al tanque de manera flexible mediante un par de resortes, representando el movimiento oscilatorio del líquido. Para cada carga se representa su centro de acción. Por otro lado se muestran también los pesos y centros de acción del techo y la pared que se oponen a los efectos sísmicos.

Se incluye el procedimiento para asegurar la estabilidad de la cubierta del tanque con respecto al momento de vuelco y para resistir el pandeo del cuerpo del tanque como resultado de la compresión longitudinal. Los procedimientos de diseño de este apéndice se basan en un espectro de respuesta amortiguada del 5% para el modo impulsivo y 0.5% para el modo convectivo sujeto a ajustes en función de las características del sitio donde se sitúa el tanque.

La metodología que se propone consiste en evaluar cuatro componentes, las cuales intervienen en el cálculo del momento de vuelco, ellas son:

- Fuerza sísmica donde interviene el peso total de las paredes del tanque W_s .
- Fuerzas sísmicas generada por la cubierta del tanque W_r .
- Fuerza sísmica debida al peso efectivo del líquido que se considera adherido a las paredes del tanque (peso impulsivo del líquido), W_i .
- Fuerza sísmica debida al peso efectivo del líquido que se mueve en el primer modo de chapoteo (peso convectivo del líquido o sloshing), W_c .

7.3 Espesor Uniforme del Tanque y Centros de Gravedad de Fuerzas

El espesor uniforme del tanque se calcula como:

$$t_u = \frac{\sum_{i=1}^{nvir} t_{adopt,i}}{nvir} \quad (7-1)$$

La altura desde el fondo hasta centro de gravedad del cuerpo del tanque y la altura desde la coronación del cuerpo hasta el centro de gravedad de la cubierta son:

$$X_S = \frac{\sum_{i=1}^{nvir} (t_{adopt,i} * h_i * z_i)}{\sum_{i=1}^{nvir} (t_{adopt,i} * h_i)} \quad (7-2)$$

$$X_R = H + \frac{H_{roof}}{2} \quad (7-3)$$

El grupo sísmico asignado al tanque será especificado por el cliente, según el Apéndice E.3 de la norma [1]. En caso de no ser asignado por el cliente se clasificará como grupo I (SUG I). Los grupos definidos son:

- SUG III: estos tanques son los que proporcionan servicio necesario a las instalaciones que son esenciales para la recuperación tras el terremoto y esencial para la vida y la salud de la población; o tanques que contienen cantidades importantes de sustancias peligrosas que no tienen un control adecuado para evitar la exposición pública.
- SUG II: estos tanques son los que contienen materiales de almacenamiento que puede representar un peligro público importante y carecen de controles secundarios para evitar la exposición pública, o los tanques que prestan servicio directo a las instalaciones principales.
- SUG I: son los tanques que no son asignados SUG II ni SUG III.

7.4 Emplazamientos No Definidos en la Norma ASCE-7

El análisis sísmico para tanques se basa en la definición de un espectro de respuesta que representa la respuesta máxima de osciladores de un grado de libertad y de un mismo coeficiente de amortiguamiento, sometidos a una historia de aceleraciones dada, expresada en función del período.

El espectro de respuesta sísmica definido en la norma ASCE 7-10 es el utilizado en la norma [1].

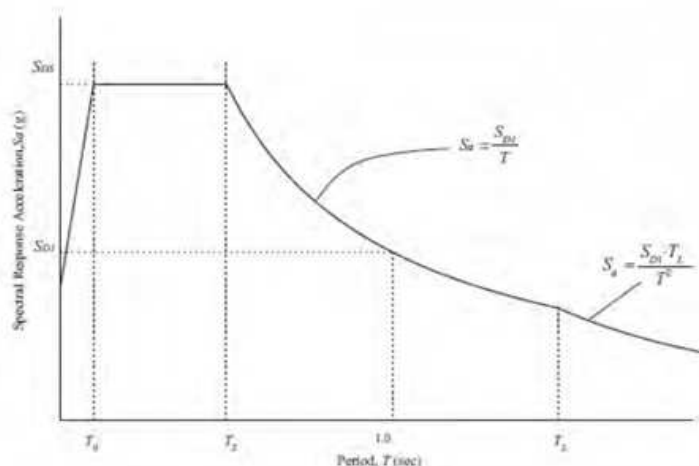


Figura 7-2. Espectro de respuesta definido.

El valor máximo de aceleración espectral se da entre los períodos T_0 y T_s . Los valores del espectro de respuesta son afectados por el factor de modificación de respuesta. Los parámetros que lo definen están dados por mapas exclusivamente para Estados Unidos; por tanto, la norma [1] propone una aproximación del espectro para cuando se conoce únicamente la aceleración máxima del terreno, S_p , dada por las ecuaciones S_s y S_1 .

Para el caso concreto estudiado no hay prescrito un espectro de respuesta, sin embargo se define la aceleración de cálculo del terreno. Por tanto, las modificaciones a realizar son las siguientes. Para una aceleración de cálculo de la zona donde se emplaza el tanque S_p , los parámetros de respuesta con un 5% de amortiguamiento para períodos de 0.2 y 1 s respectivamente son:

$$S_s = 2.5 * S_p \quad (7-4)$$

$$S_1 = 1.25 * S_p \quad (7-5)$$

7.5 Modificaciones por las Condiciones del Emplazamiento

La máxima aceleración sísmica de respuesta espectral considerada para la aceleración máxima del terreno deberá ser modificada por los coeficientes de amplificación del suelo, F_a y F_v , definidos según el tipo de terreno en las tablas 7-1 y 7-2 respectivamente.

El coeficiente de amplificación del terreno para un período de 0.2 segundos es:

Tabla 7-1. Valor de F_a en función de la clase de sitio.

Clase de sitio	Máxima aceleración de respuesta espectral considerada en períodos cortos				
	$S_s \leq 0.25$	$S_s = 0.50$	$S_s = 0.75$	$S_s = 1.0$	$S_s \geq 1.25$
A	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
B	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
C	1.2	1.2	1.1	1.0	1.0
D	1.6	1.4	1.2	1.1	1.0
E	2.5	1.7	1.2	0.9	0.9
F	*	*	*	*	*

*Se requiere investigación geotécnica del sitio específico y análisis dinámico de respuesta

El coeficiente de velocidad para un período de 1 segundo es:

Tabla 7-2. Valor de F_v en función de la clase de sitio.

Clase de sitio	Máxima aceleración de respuesta espectral considerada en períodos de 1 segundo				
	$S_s \leq 0.1$	$S_s = 0.2$	$S_s = 0.3$	$S_s = 0.4$	$S_s \geq 0.5$
A	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
B	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
C	1.7	1.6	1.5	1.4	1.3
D	2.4	2.0	1.8	1.6	1.5
E	3.5	3.2	2.8	2.4	2.4
F	*	*	*	*	*

*Se requiere investigación geotécnica del sitio específico y análisis dinámico de respuesta

Las distintas clases de suelo definidas en la norma son las siguientes:

SITE CLASS DEFINITIONS

The Site Classes are defined as follows:

- A Hard rock with measured shear wave velocity, $\bar{v}_s > 1500$ m/s (5,000 ft/sec)
- B Rock with 760 m/s $< \bar{v}_s \leq 1500$ m/s (2,500 ft/sec $< \bar{v}_s \leq 5,000$ ft/sec)
- C Very dense soil and soft rock with 360 m/s $< \bar{v}_s \leq 760$ m/s (1,200 ft/sec $< \bar{v}_s \leq 2,500$ ft/sec) or with either $\bar{N} > 50$ or $\bar{s}_u > 100$ kPa (2,000 psf)
- D Stiff soil with 180 m/s $\leq \bar{v}_s \leq 360$ m/s (600 ft/sec $\leq \bar{v}_s \leq 1,200$ ft/sec) or with either $15 \leq \bar{N} \leq 50$ or 50 kPa $\leq \bar{s}_u \leq 100$ kPa (1,000 psf $\leq \bar{s}_u \leq 2,000$ psf)
- E A soil profile with $\bar{v}_s < 180$ m/s (600 ft/sec) or with either $\bar{N} < 15$, $\bar{s}_u < 50$ kPa (1,000 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:

Figura 7-3. Definición de las clases de sitio.

7.6 Período de Vibración Estructural

El método de análisis modal pseudo-dinámico utilizado en este apéndice está basado en un período natural de la estructura y en contenidos definidos a continuación.

El método de diseño impuesto es independiente del período natural para comportamiento impulsivo del tanque, ya que para este modo se tiene en cuenta la aceleración espectral máxima. Sin embargo, este método si depende del período natural para comportamiento convectivo (chapoteo) del líquido, T_c , y del período de transición local que depende del período más largo del movimiento del terreno, T_L .

$$K_S = \frac{0.578}{\sqrt{\tanh\left(\frac{3.68 * H_w}{D}\right)}} \quad (7-6)$$

El período del primer modo de la ola de chapoteo se calcula mediante la siguiente expresión, en función del parámetro K_S que es el coeficiente de ajuste del espectro de aceleración amortiguada al 5%.

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

Para los tanques pertenecientes al grupo SUG I, el valor asignado a T_L para determinar la altura de oleaje será de 4 segundos.

$$T_L = 4 \text{ seg} \quad (7-8)$$

El modo convectivo de vibración del líquido genera una ola sísmica que debe ser menor que el espacio libre de líquido del tanque.

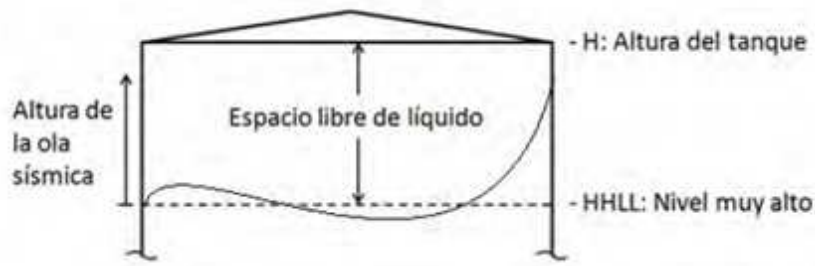


Figura 7-4. Altura de la ola sísmica causada por el modo convectivo de vibración del líquido.

La unión del techo con la pared del tanque suele ser una junta frágil, por la cual se diseña para que en caso de una sobrepresión interna, se desprenda el techo antes que se deforme el tanque. La ola sísmica no debe impactar el techo, ya que puede romper dicha unión, por tanto hay que evitarlo con un espacio libre entre el nivel máximo del líquido y el techo mayor a la de la ola sísmica en cuestión.

7.7 Espectro de Respuesta de Aceleraciones

La respuesta espectral de diseño para tanques de fondo plano está definido por los siguientes parámetros.

El valor del factor de escala, Q , para el espectro de aceleración se tomará como 1 a menos que se defina lo contrario en los requisitos donde la norma ASCE 7-10 no es aplicable.

$$Q = 1 \quad (7-9)$$

$$T_s = \frac{F_v * S_1}{F_a * S_s} \quad (7-10)$$

Para casos donde la aceleración de cálculo, S_p , esté definida se sustituirá por el parámetro S_o , que representa el parámetro de aceleración de respuesta en un período de 0 segundos y 5% de amortiguamiento.

Los denominados parámetros de aceleración espectral se definen como la fracción de la aceleración de la gravedad que actúa sobre el tanque como consecuencia de la acción sísmica representada en un modo convectivo y un modo impulsivo. Del modo impulsivo se obtiene una aceleración horizontal y una vertical mientras que del modo convectivo se obtiene únicamente una componente horizontal.

Los parámetros del espectro de aceleración dinámica y convectiva respectivamente en % g son:

$$A_i = 2.5 * Q * F_a * S_o * \left(\frac{I}{R_{wi}} \right) \geq 0.007 \quad (7-11)$$

$$A_c = 2.5 * K * Q * F_a * S_o * \left(\frac{T_s}{T_c} \right) * \left(\frac{I}{R_{wc}} \right) \leq A_i \quad \text{cuando } T_c \leq T_L \quad (7-12)$$

$$A_c = 2.5 * K * Q * F_a * S_o * \left(\frac{T_s * T_L}{T_c^2} \right) * \left(\frac{I}{R_{wc}} \right) \leq A_i \quad \text{cuando } T_c > T_L \quad (7-13)$$

siendo K el coeficiente de ajuste del espectro de aceleración para un amortiguamiento del 0.5% (impulsivo)-5% (convectivo). Dicho coeficiente tendrá un valor de 1.5, según [1], a menos que se especifique lo contrario.

Cuando los factores de modificación R_{wi} y R_{wc} no están definidos por la reglamentación de la zona de emplazamiento del tanque, los mismos serán definidos mediante las tablas E4 y E5 del apéndice en cuestión correspondiente a la norma [1].

El factor de modificación de fuerza para modo impulsivo y convectivo, R_{wi} y R_{wc} respectivamente, de la respuesta para el método de diseño utilizado en este apéndice basado en la tensión admisible (ASD) depende de si el tanque se encuentra anclado al terreno (mecánicamente anclado) o no (auto-anclado).

Tabla 7–3. Factores de modificación de respuesta para métodos ASD.

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

El factor de importancia depende del grupo sísmico al que pertenece el tanque.

Tabla 7–4. Factor de importancia y clasificación del grupo sísmico.

Grupo sísmico	Factor de importancia, I
I	1.0
II	1.25
III	1.5

7.8 Factores de Diseño Sísmico

La fuerza sísmica lateral equivalente de diseño se determina mediante la siguiente relación:

$$F = A * W_{eff} \quad (7-14)$$

Donde A representa el coeficiente de aceleración lateral en % y W_{eff} el peso efectivo de la estructura que contribuye en la respuesta del sismo.

7.9 Diseño

7.9.1 Cargas de Diseño

Los tanques atmosféricos para almacenamiento de líquidos deben ser diseñados para resistir las fuerzas sísmicas calculadas considerando la masa efectiva y las presiones dinámicas del líquido para determinar las fuerzas laterales equivalentes y la distribución de fuerzas laterales.

El cortante total en la base del depósito se define en función del cortante de diseño en la base debido a la componente impulsiva y convectiva del peso efectivo del tanque y sus contenidos (método SRSS).

$$V = \sqrt{V_i^2 + V_c^2} \quad (7-15)$$

$$V_i = A_i * (W_s + W_r + W_f + W_i) \quad (7-16)$$

$$V_c = A_c * W_c \quad (7-17)$$

7.9.2 Peso Efectivo del Producto

Los pesos efectivos para el modo impulsivo y convectivo se determinarán multiplicando el peso total del producto por los ratios W_i/W_p y W_c/W_p respectivamente.

La expresión para calcular W_i dependerá de la relación entre el diámetro del tanque y la altura del nivel del líquido.

$$W_i = \frac{\tanh\left(\frac{0.866 * D}{H_w}\right)}{\frac{0.866 * D}{H_w}} * W_p \quad \text{cuando } \frac{D}{H_w} \geq 1.333 \quad (7-18)$$

$$W_i = \left(1 - 0.218 * \frac{D}{H_w}\right) * W_p \quad \text{cuando } \frac{D}{H_w} < 1.333 \quad (7-19)$$

$$W_c = 0.230 * \frac{D}{H_w} * \tanh\left(\frac{3.67 * H_w}{D}\right) * W_p \quad (7-20)$$

7.9.3 Centro de Acción de Fuerzas Laterales Eficaces

7.9.3.1 Centro de Acción para el Momento de Vuelco del Anillo

El momento debido al anillo es una parte del momento de vuelco total que actúa en la base del perímetro del tanque. Este momento se utiliza para determinar las cargas sobre el anillo de cimentación, las fuerzas de anclaje del tanque y para comprobar la longitud de compresión de las virolas.

El brazo del momento medido desde la base de tanque hasta el centro de acción de las fuerzas laterales, relacionado con la fuerza impulsiva en el anillo se define en función de la relación entre el diámetro del tanque y la altura del nivel del líquido.

$$X_i = 0.375 * H_w \quad \text{cuando } \frac{D}{H_w} \geq 1.333 \quad (7-21)$$

$$X_i = \left(0.5 - 0.094 * \frac{D}{H_w}\right) * H_w \quad \text{cuando } \frac{D}{H_w} < 1.333 \quad (7-22)$$

Para el brazo del momento relacionado con la fuerza convectiva en el anillo:

$$X_c = \left(1 - \frac{\cosh\left(\frac{3.67 * H_w}{D}\right) - 1}{\frac{3.67 * H_w}{D} * \sinh\left(\frac{3.67 * H_w}{D}\right)}\right) * H_w \quad (7-23)$$

7.9.3.2 Centro de Acción para el Momento de Vuelco de la Losa

El momento debido a la losa es el momento de vuelco total que actúa a través de la sección transversal de la base del tanque. Este momento de vuelco se utiliza para diseñar losas y encepados.

El brazo del momento medido desde el fondo del tanque al centro de acción de las fuerzas laterales, relativo a la componente impulsiva de la losa también depende de la relación entre el diámetro del tanque y la altura del nivel del líquido.

$$X_{is} = 0.375 * \left(1 + 1.333 * \left(\frac{\frac{0.866 * D}{H_w}}{\tanh\left(\frac{0.866 * D}{H_w}\right)} - 1 \right) \right) * H_w \text{ cuando } \frac{D}{H_w} \geq 1.333 \quad (7-24)$$

$$X_{is} = \left(0.5 + 0.06 * \frac{D}{H_w} \right) * H_w \text{ cuando } \frac{D}{H_w} < 1.333 \quad (7-25)$$

Para la componente convectiva de la losa será:

$$X_{cs} = \left(1 - \frac{\cosh\left(\frac{3.67 * H_w}{D}\right) - 1.937}{\frac{3.67 * H_w}{D} * \sinh\left(\frac{3.67 * H_w}{D}\right)} \right) * H_w \quad (7-26)$$

7.10 Efecto Sísmico Vertical

Cuando se especifique, los efectos de la aceleración vertical se considerarán actuando tanto en dirección hacia arriba como hacia abajo y combinada con los efectos de la aceleración lateral mediante el método SRSS definido anteriormente.

$$F_{vert} = A_v * W_{eff} \quad (7-27)$$

El parámetro de aceleración sísmica vertical máxima puede ser especificado por el cliente o mediante la siguiente expresión:

$$A_v = 0.14 * Q * F_a * S_s \quad (7-28)$$

El peso efectivo del tanque que contribuye a la respuesta del sismo incluye el peso total del tanque más la componente impulsiva del peso efectivo del producto, la cual está ligada rígidamente a las paredes del tanque y se mueve solidaria con el mismo (efectos hidrodinámicos debido al movimiento de cuerpo rígido del tanque).

No se incluye la masa convectiva del peso efectivo del producto ya que está ligada flexiblemente, representando la porción cercana a la superficie que se desplaza en forma contraria al movimiento del tanque (efectos hidrodinámicos debido al modo fundamental de vibración del líquido).

Los efectos sísmicos verticales serán considerados cuando se especifique:

- Esfuerzos de tracción en las virolas.
- Esfuerzos de membrana de compresión en las virolas.
- Diseño del anclaje.

7.11 Fuerzas Dinámicas Circunferenciales en el Cuerpo del Tanque debido al Líquido

Los esfuerzos dinámicos de tracción en las virolas debido al movimiento sísmico del líquido se determinarán por las siguientes fórmulas, en función de la relación entre el diámetro del tanque y la altura del nivel del

líquido.

Las componentes impulsivas y convectivas de la fuerza dinámica de membrana en la pared del tanque son:

$$N_i = 8.48 * A_i * G * D * H_w * \left[\frac{Y}{H_w} - 0.5 * \left(\frac{Y}{H_w} \right)^2 \right] * \tanh \left(0.866 * \frac{D}{H_w} \right) \text{ cuando } \frac{D}{H_w} \geq 1.333 \quad (7-29)$$

$$N_i = 5.22 * A_i * G * D^2 * \left[\frac{Y}{0.75 * D} - 0.5 * \left(\frac{Y}{0.75 * D} \right)^2 \right] \text{ cuando } \frac{D}{H_w} < 1.333 \text{ e } Y < 0.75 * D \quad (7-30)$$

$$N_i = 2.6 * A_i * G * D^2 \text{ cuando } \frac{D}{H_w} < 1.333 \text{ e } Y \geq 0.75 * D \quad (7-31)$$

$$N_c = \frac{1.85 * A_c * G * D^2 * \cosh \left(\frac{3.68 * (H_w - Y)}{D} \right)}{\cosh \left(\frac{3.68 * H_w}{D} \right)} \quad (7-32)$$

Fuerza de membrana debido a la presión hidrostática del producto es:

$$N_h = 4.9 * (H_w - 0.3) * D * G \quad (7-33)$$

El esfuerzo dinámico de tracción en el cuerpo se combina directamente con el esfuerzo de membrana debido a la presión hidrostática del producto para determinar la tensión total.

$$\sigma_T = \sigma_S + \sigma_H \quad (7-34)$$

Cuando el cliente no especifique la aceleración vertical no es necesario considerar A_v y el esfuerzo tangencial se determina mediante la siguiente expresión:

$$\sigma_T = \frac{N_h \pm \sqrt{N_i^2 + N_c^2}}{t_s} \quad (7-35)$$

En el caso donde la aceleración vertical está especificada:

$$\sigma_T = \frac{N_h \pm \sqrt{N_i^2 + N_c^2 + (A_v * N_h)^2}}{t_s} \quad (7-36)$$

7.12 Momentos del Vuelco

El momento de vuelco sísmico en el perímetro de la base del tanque se determina mediante la suma de las componentes impulsivas y convectivas multiplicadas por el respectivo brazo de momento medido desde la base hasta el centro de acción de las fuerzas.

El momento en el perímetro de la base del cuerpo es:

$$M_{rw} = \sqrt{[A_i * (W_i * X_i + W_s * X_s + W_r * X_r)]^2 + [A_c * (W_c * X_c)]^2} \quad (7-37)$$

El momento en la base de la losa es:

$$M_s = \sqrt{[A_i * (W_i * X_{is} + W_s * X_s + W_r * X_r)]^2 + [A_c * (W_c * X_{cs})]^2} \quad (7-38)$$

A menos que se utilice una determinación más rigurosa, el momento de vuelco en la parte inferior de cada anillo exterior deberá ser definido por una aproximación lineal usando lo siguiente:

1. Si el tanque está equipado con una cubierta fija, el cortante impulsivo y el momento de vuelco están aplicados en la parte superior de la virola.
2. El cortante impulsivo y el momento de vuelco de cada virola se incluye en base al peso y centro de gravedad de cada virola.
3. El momento de vuelco debido al líquido es aproximado por una variación lineal que es igual al momento del cuerpo, M_{rw} , en la base de la del cuerpo hasta cero en el nivel máximo del líquido.

7.13 Interacción Suelo-Estructura

Si se especifica por el cliente, los efectos de la interacción suelo-estructura en la amortiguación y el período de vibración efectiva pueden ser considerados para tanques de acuerdo con la norma *ASCE 7-10*, según las siguientes limitaciones:

- Los tanques estarán equipados con un anillo de refuerzo de hormigón, apoyados sobre el suelo. Los efectos de la interacción suelo-estructura para tanques apoyados sobre terraplén de material granular están fuera del alcance de este apéndice.
- Los tanques deberán estar mecánicamente anclados a la cimentación.
- El valor del cortante en la base y los momentos de vuelco para el modo impulsivo, incluyendo los efectos de interacción suelo-estructura, no será inferior al 80% de los valores determinados sin considerar la interacción suelo-estructura.
- El factor efectivo de amortiguamiento del sistema estructura-cimentación no excederá del 20%.

7.14 Resistencia a las Cargas de Diseño

Se utiliza el método de diseño mediante tensiones admisibles (ASD). Las tensiones admisibles en los elementos estructurales aplicables a las condiciones de funcionamiento normal podrán incrementarse en un 33% cuando los efectos del terremoto de diseño se incluyen, a menos que se especifique lo contrario en este apéndice.

7.14.1 Anclajes

La resistencia al momento de vuelco de diseño del cuerpo en la base puede ser previsto 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.
- Dispositivos anclados mecánicamente.

Para dimensionar la necesidad de anclaje de un tanque frente a los efectos sísmicos, lo primero es comprobar si el tanque auto-anclado es capaz de soportar los esfuerzos sísmicos a los que estará sometido sin perder la estabilidad.

Si el tanque resulta inestable frente a estos efectos sísmicos, efectos del viento o resistencia al deslizamiento, deberá diseñarse el sistema de anclaje según el procedimiento descrito en los siguientes apartados.

7.14.1.1 Auto-anclados (no anclados)

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. Dicho anillo anular puede ser una parte del fondo del tanque o un anillo anular soldado a tope.

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

$$w_a = 99 * t_a * \sqrt{\min(F_{yb}) * H_w * G_e} \leq 201.1 * H_w * D * G_e \quad (7-39)$$

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 definirse 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.

$$w_a = 5742 * H_w * G_e * L_s \quad (7-40)$$

7.14.1.1.1 Criterios de Estabilidad Sísmica de un Tanque No Anclado

Debe cumplir los siguientes requisitos para considerarlo estable ante sismo:

- Coeficiente de estabilidad J menor o igual a 1.54 para ser estable al volcamiento y no requerir anclaje.
- Esfuerzo longitudinal de compresión en la pared menor o igual al admisible.
- Esfuerzo circunferencial en la pared menor o igual al admisible.
- Fuerza cortante en la base menor o igual al admisible.
- Fuerza resistente de placa anular menor o igual al admisible.

Si el tanque no anclado es inestable se deben 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.
- Anclar el tanque.

7.14.1.1.2 Ratio de Anclaje, J

Tabla 7-5. Ratio de anclaje, J.

Ratio de anclaje, 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.

$$J = \frac{M_{rw}}{D^2 * [w_t * (1 - 0.4 * A_v) + w_a - 0.4 * w_{int}]} \quad (7-41)$$

donde w_t es el peso del cuerpo y el techo que actúan en la base del cuerpo.

$$w_t = \left[\frac{W_s}{\pi * D} + w_{rs} \right] \quad (7-42)$$

7.14.1.1.3 Requisitos del Anillo Anular de Fondo

El espesor de la chapa anular situada bajo el cuerpo del tanque puede ser mayor o igual al espesor de la chapa de fondo de un tanque general con los siguientes requisitos. Se trata de imponer un límite en el espesor del anillo inferior basado en el diseño del cuerpo.

1. El espesor, t_a , utilizado en la expresión de w_a no excederá el espesor de la virola inferior del cuerpo, t_s , menos el sobreespesor de corrosión.
2. 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:

$$L = 0.01723 * t_a * \sqrt{\frac{F_y}{H_w * G_e}} \quad (7-43)$$

7.14.1.2 Mecánicamente Anclado

Si la configuración del tanque es tal que los requisitos de auto-anclaje no puede ser cumplidos, el tanque debe ser anclado con dispositivos mecánicos tales como pernos de anclaje o tirantes.

Cuando los tanques son anclados, el peso resistente del producto no puede ser utilizado para calcular la carga de levantamiento de los anclajes. Los anclajes pueden ser dimensionados para proporcionar al menos la mínima resistencia de anclaje siguiente, en función del momento sísmico, el peso transmitido por el cuerpo a la base y el efecto sísmico vertical:

$$w_{AB} = \left(\frac{1.273 * M_{rw}}{D^2} - w_t * (1 - 0.4 * A_v) \right) \quad (7-44)$$

Las cargas de viento no necesitan ser consideradas en la combinación con las cargas sísmicas.

La carga de anclaje de diseño sísmica, P_{AB} , se define como:

$$P_{AB} = w_{AB} * \left(\frac{\pi * D}{n_A} \right) \quad (7-45)$$

Donde, n_A es el número de anclajes igualmente separados alrededor de la circunferencia del tanque. P_{AB} se incrementará para tener en cuenta la desigualdad en la separación.

Cuando se requiere anclaje mecánico, el empotramiento o fijación del anclaje a la cimentación, 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, P_A . 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 P_{AB} .

El esfuerzo admisible máximo para las piezas de anclaje no excederá los siguientes valores para anclajes diseñados sólo para cargas sísmicas o en combinación con otros casos de carga:

- Una tensión de tracción admisible para los pernos de anclaje y tirantes igual al 80% del límite elástico mínimo.
- Para otras partes, 133% de la tensión admisible.
- La máxima tensión admisible de diseño de los accesorios de anclaje en el cuerpo serán limitados a 170 MPa sin incrementos por cargas sísmicas. Estos esfuerzos pueden ser utilizados en conjunto con otras cargas para cargas sísmicas cuando la combinación de carga prevalece.

7.14.1.2.1 Criterios de Estabilidad Sísmica de un Tanque Anclado

Debe cumplir los siguientes requisitos para considerarlo estable:

- 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.

7.14.2 Máxima Tensión de Compresión Longitudinal de Membrana en Virolas

7.14.2.1 Compresión Real en Virola de Fondo de Tanques Auto-Anclados

La máxima tensión de compresión longitudinal en virolas en el fondo del cuerpo cuando no está calculado el levantamiento, $J < 0.785$, será determinada por la siguiente fórmula:

$$\sigma_c = \left(w_t * (1 + 0.4 * A_v) + \frac{1.273 * M_{rw}}{D^2} \right) * \frac{1}{1000 * t_s} \quad (7-46)$$

La máxima tensión de compresión longitudinal en virolas en el fondo del cuerpo cuando está calculado el levantamiento, $J > 0.785$, será determinada por la siguiente fórmula:

$$\sigma_c = \left(\frac{w_t * (1 + 0.4 * A_v) + w_a}{0.607 - 0.18667 * J^{2.3}} - w_a \right) * \frac{1}{1000 * t_s} \quad (7-47)$$

7.14.2.2 Compresión Real en Virola de Fondo de Tanques Mecánicamente Anclados

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

$$\sigma_c = \left(w_t * (1 + 0.4 * A_v) + \frac{1.273 * M_{rw}}{D^2} \right) * \frac{1}{1000 * t_s} \quad (7-48)$$

7.14.2.3 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 límite elástico mínimo del acero para evitar la plastificación del material.

$$F_c = \frac{83 * t_s}{D} < 0.5 * F_{ty} \quad \text{cuando} \quad \frac{G * H_w * D^2}{t_s^2} \geq 44 \quad (7-49)$$

$$F_c = \frac{83 * t_s}{2.5 * D} + 7.5 * \sqrt{G * H_w} < 0.5 * F_{ty} \quad \text{cuando} \quad \frac{G * H_w * D^2}{t_s^2} < 44 \quad (7-50)$$

$$F_c = \frac{10^6 * t_s}{2.5 * D} + 600 * \sqrt{G * H_w} < 0.5 * F_{ty} \quad \text{cuando} \quad \frac{G * H_w * D^2}{t_s^2} < 10^6 \quad (7-51)$$

Si el espesor de la virola del fondo del tanque calculado para resistir el momento de vuelco sísmico es mayor que el espesor requerido por la presión hidrostática, ambos excluyendo el sobreepesor de corrosión, los espesores calculados de cada virola por presión hidrostática serán incrementados en la misma proporción.

7.14.3 Cimentación

Las cimentaciones para los tanques de fondo plano mecánicamente anclados serán dimensionadas para resistir la fuerza máxima de levantamiento del anclaje y el vuelco por presión.

Las cargas del producto y del suelo sobre el cuerpo y la base pueden ser utilizadas para resistir el máximo levantamiento de anclaje, siempre que el cuerpo y el pie sean diseñados para soportar esta excentricidad de la carga.

La carga del producto no se utilizará para reducir la carga de anclaje.

Cuando las aceleraciones sísmicas verticales son aplicables, la carga del producto sobre el cuerpo y la base:

1. Cuando se utiliza para resistir la máxima fuerza de levantamiento de anclaje en la cimentación, la presión del producto será multiplicada por un factor $(1-0.4*A_v)$ y la cimentación del cuerpo y la base serán diseñadas para resistir las cargas excéntricas con o sin las aceleraciones sísmicas verticales.
2. Cuando se utiliza para evaluar la carga soportada (hacia abajo), la presión del producto sobre el cuerpo será multiplicada por un factor $(1+0.4*A_v)$ y la cimentación del cuerpo y la base será diseñada para resistir las cargas excéntricas con o sin las aceleraciones sísmicas verticales.

El ratio de estabilidad al vuelco para sistemas de tanques mecánicamente anclados, excluyendo los efectos sísmicos verticales serán 2 veces ó mayores que:

$$\frac{0.5 * D * [W_p + W_f + W_{tot} + W_{fd} + W_g]}{M_s} \geq 2 \quad (7-52)$$

Los anillos del cuerpo para tanques de fondo plano auto-anclados serán dimensionados para resistir la presión de vuelco soportada basada en la fuerza máxima de compresión longitudinal en la base de la virola inferior según la siguiente expresión:

$$P_f = \left(w_f * (1 + 0.4 * A_v) + \frac{1.273 * M_{rw}}{D^2} \right) \quad (7-53)$$

7.14.4 Tensiones en el Aro del Cuerpo

La máxima tensión admisible de membrana del aro para la combinación de los efectos de membrana hidrostático del producto y dinámico sobre el aro serán menores que:

- La membrana básica admisible en la normativa para el material de las virolas incrementado en un 33%; o,
- $0.9*F_y$ veces el coeficiente de eficiencia donde F_y es el menor de los límites elásticos definidos para el material de las virolas o material de soldadura.

7.15 Detalles de los Requisitos

7.15.1 Anclajes

Los tanques sobre el nivel del terreno se permiten ser diseñados sin anclaje cuando reunan los requisitos de tanques auto-anclados de este capítulo.

Los siguientes detalles pueden aplicarse a anclajes mecánicos de acero en tanques en regiones sísmicas donde $S_{DS} = Q \cdot F_a \cdot S_s > 0.05g$.

7.15.1.1 Auto-Anclados

Para tanques clasificados como SUG III y situados en zonas donde $S_{DS} \geq 0.5g$, requieren una chapa anular soldada a tope. Las placas anulares superiores a 10 mm de espesor deberán ser soldadas a tope. La soldadura del cuerpo del tanque a la placa de fondo del mismo será comprobada para la carga de diseño de levantamiento.

7.15.1.2 Anclados Mecánicamente

Cuando se requiera anclaje mecánico, al menos se dispondrán de 6 anclajes. La separación entre anclajes no excederá 3 m.

Cuando se utilicen pernos de anclaje, tendrán un diámetro de vástago corroído no menor de 25 mm. Los tirantes de anclaje de acero al carbono tendrán un espesor nominal no menor de 6 mm y tendrán un sobreespesor mínimo de corrosión de 1.5 mm sobre cada superficie para una distancia de al menos 75 mm, pero no más de 300 mm sobre la superficie del hormigón.

Los pernos de anclajes en gancho u otros sistemas de anclaje basados exclusivamente en bandas o fricción mecánica no serán utilizados cuando se requiere diseño sísmico según el apéndice E. Los anclajes post-tensados pueden utilizarse siempre que en la prueba se valide su capacidad para desarrollar la carga de cedencia en el anclaje bajo cargas cíclicas en hormigón fisurado y cumpla con los requisitos de la norma ACI 355.

7.16 Resistencia al Deslizamiento

Se considerará la transferencia de fuerza cortante total entre el tanque y la losa de cimentación.

Para tanques de acero de fondo plano auto-anclados, la fuerza cortante sísmica horizontal será resistida por la fricción entre el tanque y la base sobre la que apoya. En tanques de almacenamiento auto-anclados serán proporcionados de tal manera que el cortante sísmico calculado en la base no exceda el valor de V_s .

El coeficiente de rozamiento, μ , no excederá el valor 0.4.

$$V_s = \mu * (W_s + W_r + W_f + W_p) * (1.0 - 0.4 * A_v) \quad (7-54)$$

No se requiere ningún anclaje lateral adicional para los tanques de acero mecánicamente anclados, incluso son posibles pequeños movimientos de aproximadamente 25 mm.

7.17 Diagrama de Flujo de la Verificación del Efecto Sísmico

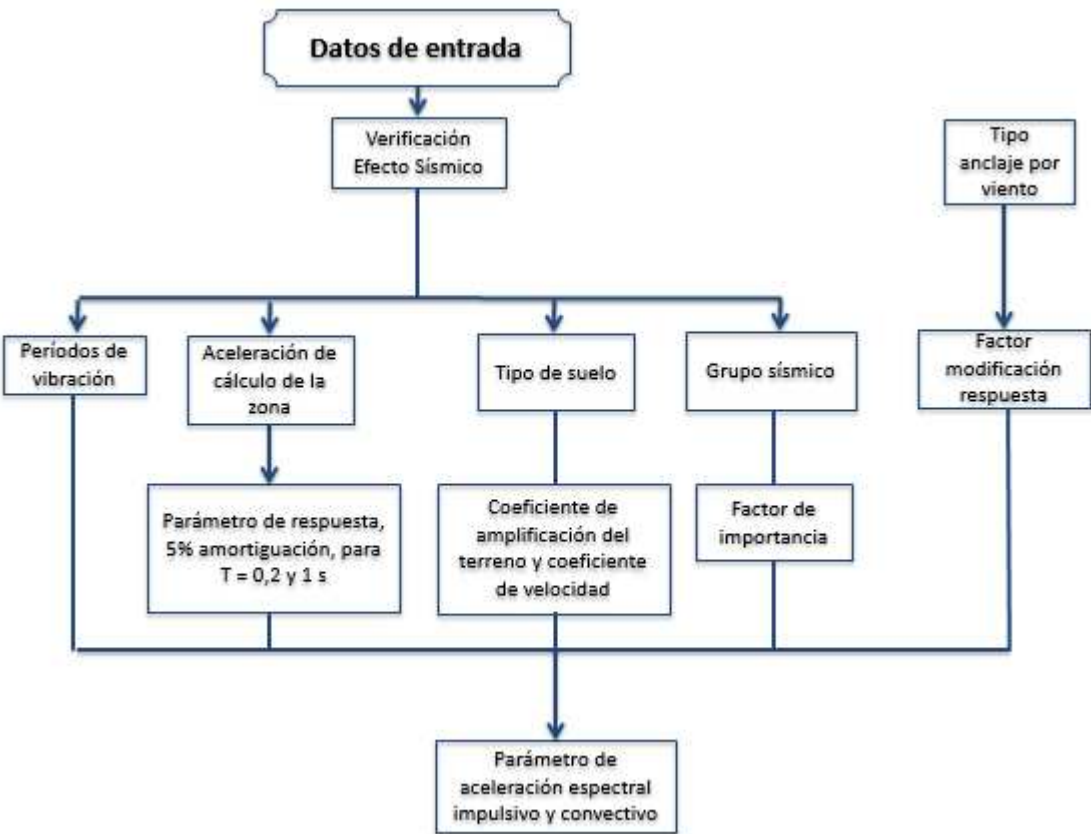


Figura 7-5. Diagrama de flujo de la verificación del efecto sísmico.

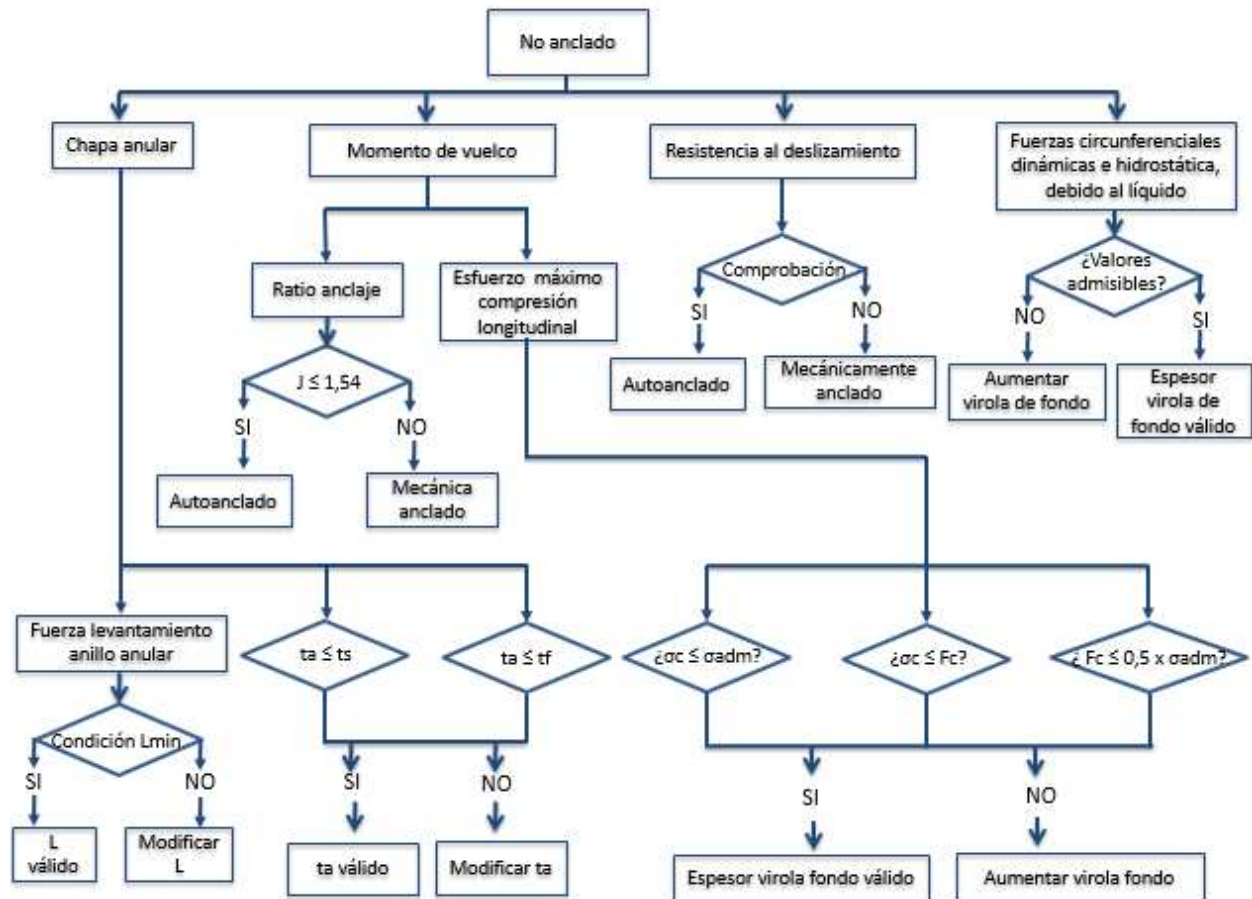


Figura 7-6. Diagrama de flujo de tanques auto-ancrados.

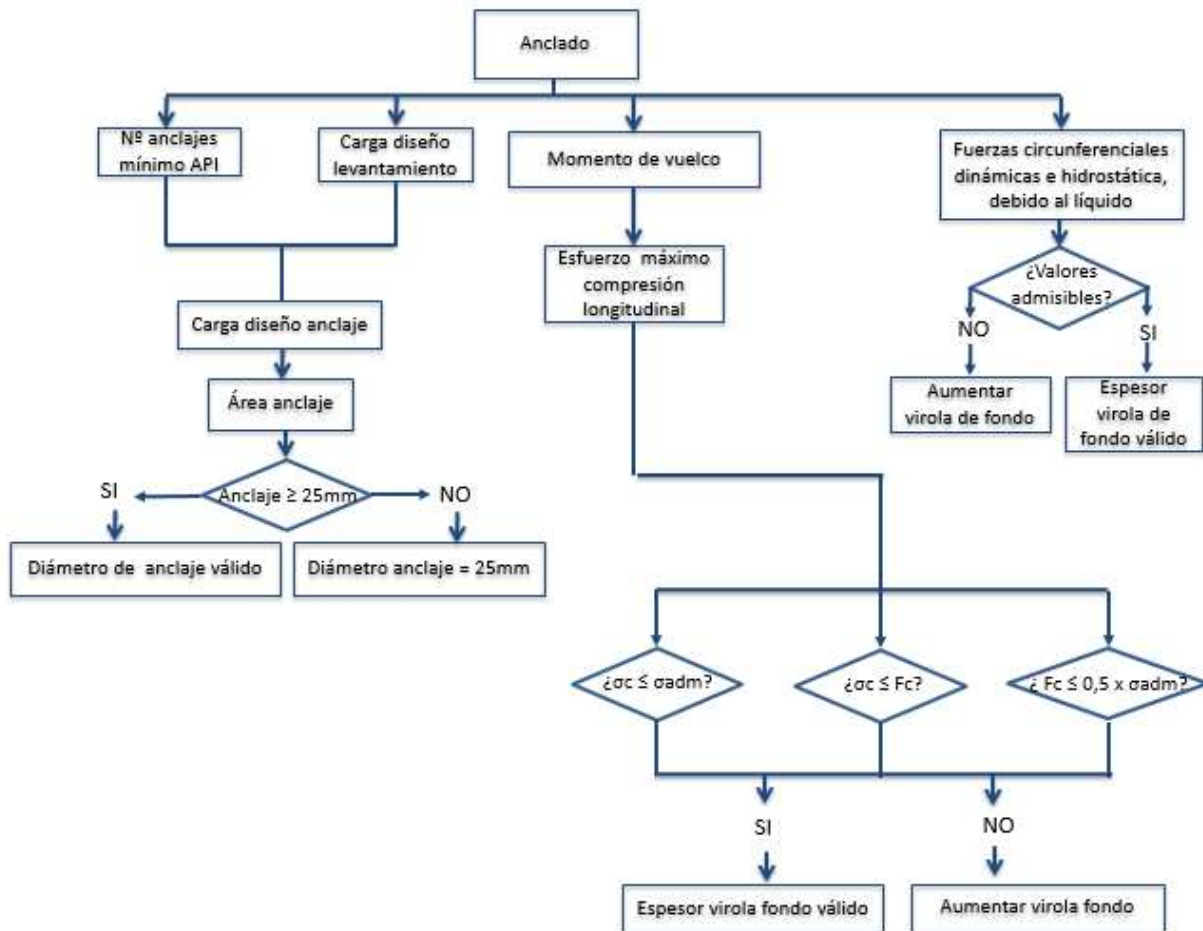


Figura 7-7. Diagrama de flujo de tanques anclados mecánicamente.

7.18 Ejemplo de Verificación del Efecto Sísmico

Los parámetros necesarios para realizar el análisis sísmico son los siguientes:

- Parámetros de aceleración máxima, S_s y S_1 .
- Grupo sísmico del tanque de acuerdo a su condición de riesgo.
- Tipo de suelo en el cual se ubica el tanque.
- Factor de importancia del sistema.
- Coeficiente de aceleración vertical.

Las variables que se calculan para el cálculo de estabilidad sísmica en tanque no anclado son:

- Coeficiente de aceleración impulsivo: su valor depende de la condición de anclaje del tanque y es la razón por la cual se debe analizar primero el tanque como no anclado.
- Coeficiente de aceleración convectivo.

- Fuerza resistente de la placa anular.
- Fuerza cortante sobre la base.
- Momento sísmico sobre la base.
- Coeficiente de anclaje.
- Esfuerzo circunferencial sobre el primer anillo.
- Esfuerzo longitudinal de compresión sobre el primer anillo.
- Altura de la ola sísmica.

Si el tanque es anclado, entonces las variables son:

- Coeficiente de aceleración impulsiva.
- Coeficiente de aceleración convectiva.
- Fuerza cortante sobre la base.
- Momento sísmico sobre la base.
- Esfuerzo circunferencial sobre el primer anillo.
- Esfuerzo longitudinal de compresión sobre el primer anillo.
- Altura de la ola sísmica.

Para verificar si es necesario anclar el tanque debido al sismo lo primero es calcular las cargas de pesos y centros de gravedad que actúan en las distintas partes del tanque, así como los parámetros que definen el espectro de aceleraciones de la zona donde se sitúa.

Una vez obtenidas las fuerzas y momentos que actúan debido al sismo, se procede a comprobar si el tanque auto-anclado es capaz de soportar todos los esfuerzos sin pérdidas de estabilidad. En caso de no cumplirse, se realiza el dimensionado del tanque anclado.

El tanque debe resistir la presión del producto almacenado, su propio peso, las cargas sísmicas, las cargas de viento, las cargas de nieve y otras sobrecargas. Las fuerzas y momentos que actúan sobre el tanque se pueden representar en la siguiente figura:

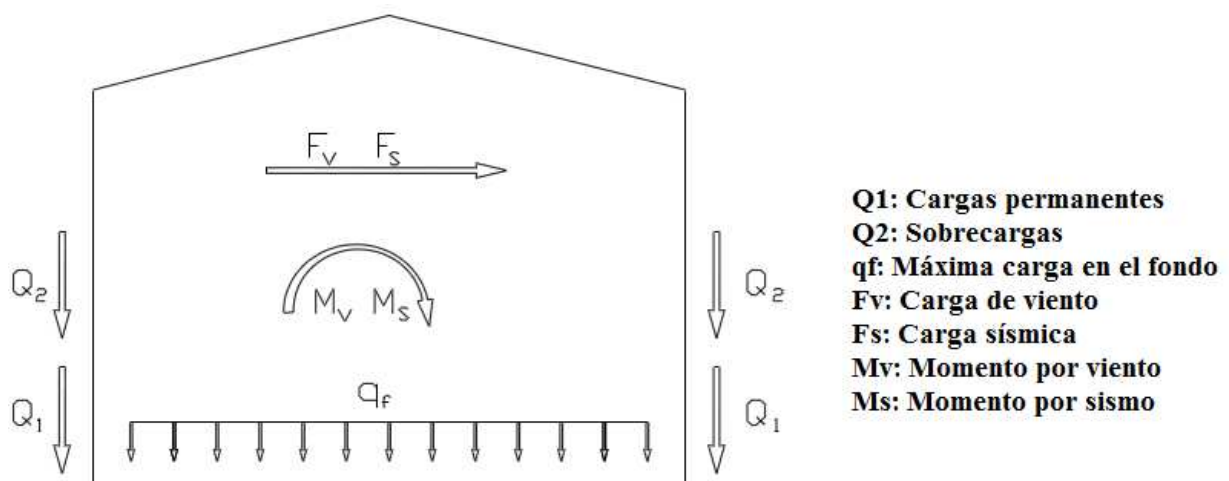


Figura 6. Cargas y momentos en el tanque.

Figura 7-8. Fuerzas y momentos sobre el tanque.

En este ejemplo se seguirán los pasos descritos en el capítulo. En este caso no se especifica un grupo sísmico específico al tanque por parte del cliente, por tanto se clasificará como SUG I.

Las alturas desde el fondo del tanque hasta los centros de gravedad del cuerpo y la cubierta son definidas en las ecuaciones 7-2 y 7-3.

$$X_S = \frac{2.5 * (\frac{22.2}{1000} * 1.25 + \frac{19.8}{1000} * 3.75 + \frac{17.3}{1000} * 6.25 + \frac{14.9}{1000} * 8.75 + \frac{12.5}{1000} * 11.25 + \frac{10.1}{1000} * 13.75 + \frac{10.1}{1000} * 16.25 + \frac{10.1}{1000} * 18.75 + \frac{10.1}{1000} * 21.25)}{2.5 * (\frac{22.2}{1000} + \frac{19.8}{1000} + \frac{17.3}{1000} + \frac{14.9}{1000} + \frac{12.5}{1000} + \frac{10.1}{1000} * 4)} = 9.35 \text{ m}$$

$$X_R = 22.5 + \frac{2.92}{2} = 23.96 \text{ m}$$

- Espectro de Respuesta:

En este ejemplo se sitúa el tanque en España, por tanto la norma [1] propone una aproximación del espectro basada en la aceleración de cálculo de la zona. Los parámetros de respuesta con un amortiguamiento del 5% para períodos de 0.2 y 1 s, según las ecuaciones 7-4 y 7-5 son:

$$S_S = 2.5 * 0.04 = 0.1$$

$$S_1 = 1.25 * 0.04 = 0.05$$

Según los datos iniciales se ha clasificado el suelo como tipo C. Los coeficientes de amplificación del terreno y de velocidad para este caso, según las tablas 7-1 y 7-2 son:

$$F_a = 1.2$$

$$F_v = 1.7$$

El método utilizado en la norma es independiente del período natural para comportamiento impulsivo del tanque, ya que se considera en la zona de aceleración máxima constante. Sin embargo, si depende del período natural para comportamiento convectivo del líquido y del período asignado para determinar la altura de oleaje. Según las ecuaciones 7-6 a 7-8:

$$K_S = \frac{0.578}{\sqrt{\tanh\left(\frac{3.68 * 22}{34}\right)}} = 0.583$$

$$T_C = 1.8 * 0.583 * \sqrt{34} = 6.12 \text{ seg}$$

$$T_L = 4 \text{ seg}$$

El período que representa el final del tramo de aceleración máxima es:

$$T_s = \frac{1.7 * 0.05}{1.2 * 0.1} = 0.71 \text{ seg}$$

Los parámetros de aceleración espectral, definidos en las ecuaciones 7-11 a 7-13, dependen del parámetro de aceleración de respuesta para un período de 0 seg y 5% de amortiguamiento; de los factores de modificación de respuesta en función de si se requiere anclaje debido al viento, y del factor de importancia en función del grupo sísmico del tanque.

Los factores de modificación de respuesta para tanques anclados debido al viento se definen en la tablas 7-3.

$$R_{wi} = 4$$

$$R_{wc} = 2$$

El factor de importancia para SUG I es 1. Por tanto, los parámetros de aceleración espectral son:

$$A_i = 2.5 * 1 * 1.2 * 0.04 * \frac{1}{4} = 0.03 \%g \geq 0.007 \%g$$

$$A_c = 2.5 * 1.5 * 1 * 1.2 * 0.04 * \frac{0.71 * 4}{6.12^2} * \frac{1}{2} = 0.01 \%g \leq A_i = 0.03 \%g$$

Estos parámetros definen la aceleración que actúa sobre el tanque debido a la acción sísmica.

- Cargas de Diseño:

El peso efectivo del producto tiene dos componentes, impulsivo y convectivo, definidos en las ecuaciones 7-18 a 7-20, en función de la geometría del tanque y el nivel máximo del líquido. El peso efectivo del producto se obtiene del anexo pesos.

Para una relación entre el diámetro y el nivel del líquido mayor que 1.333:

$$W_i = \frac{\tanh\left(\frac{0.866 * 34}{22}\right)}{\frac{0.866 * 34}{22}} * 21,971,670.7 * 9.81 = 140,318,532.4 \text{ N}$$

$$W_c = 0.230 * \frac{34}{22} * \tanh\left(\frac{3.67 * 22}{34}\right) * 21,971,670.7 * 9.81 = 75,300,313.53 \text{ N}$$

El cortante en la base debido a la acción sísmica, según las ecuaciones 7-15 a 7-17 es:

$$V_i = 0.03 * ((266,430.54 + 64,699.8 + 61,526.45) * 9.81 + 140,318,532.4) = 4,325,114.87 \text{ N}$$

$$V_c = 0.01 * 75,300,313.53 = 753,003.14 \text{ N}$$

$$V = \sqrt{4,325,114.87^2 + 753,003.14^2} = 4,390,174.53 \text{ N}$$

Los centros de acción de fuerzas para el cálculo de los momentos de vuelco del cuerpo y la losa, definidos en las ecuaciones 7-21 a 7-26 para una relación diámetro del tanque y altura del nivel del líquido mayor que 1.333 son:

$$X_i = 0.375 * 22 = 8.25 \text{ m}$$

$$X_c = \left(1 - \frac{\cosh\left(\frac{3.67 * 22}{34}\right) - 1}{\frac{3.67 * 22}{34} * \sinh\left(\frac{3.67 * 22}{34}\right)} \right) * 22 = 14.32 \text{ m}$$

$$X_{is} = 0.375 * \left(1 + 1.333 * \left(\frac{\frac{0.866 * 34}{22}}{\tanh\left(\frac{0.866 * 34}{22}\right)} - 1 \right) \right) * 22 = 14.15 \text{ m}$$

$$X_{cs} = \left(1 - \frac{\cosh\left(\frac{3.67 * 22}{34}\right) - 1.937}{\frac{3.67 * 22}{34} * \sinh\left(\frac{3.67 * 22}{34}\right)} \right) * 22 = 15.95 \text{ m}$$

Las fuerzas, horizontal y vertical, que actúan sobre el tanque debido al peso efectivo del tanque que contribuye en la respuesta del sismo se definen en las ecuaciones 7-14 y 7-27. El peso efectivo del tanque se obtiene del anexo pesos.

$$W_{eff} = 144,170,382.1 \text{ N}$$

El efecto sísmico horizontal será:

$$A = \sqrt{A_i^2 + A_c^2} = \sqrt{0.03^2 + 0.01^2} = 0.032 \%g$$

$$F = 0.032 * 144,170,382.1 = 4,613,452.23 \text{ N}$$

El efecto sísmico vertical será:

$$A_{vert} = 0.14 * 1 * 1.2 * 0.1 = 0.017 \%g$$

$$F_{vert} = 0.017 * 144,170,382.1 = 2,450,896.5 \text{ N}$$

Los momentos de vuelco del cuerpo y la losa debidos al sismo, según las ecuaciones 7-37 y 7-38 son:

$$M_{rw,i} = 0.03 * (140,318,532.4 * 8.25 + 266,430.54 * 9.81 * 9.35 + 62,906.97 * 9.81 * 23.96) = 35,905,559 \text{ mN}$$

$$M_{rw,c} = 0.01 * (75,300,313.53 * 14.32) = 10,783,004.9 \text{ mN}$$

$$M_{rw} = \sqrt{35,905,559^2 + 10,783,004.9^2} = 37,489,763.43 \text{ mN}$$

$$M_{s,i} = 0.03 * (140,318,532.4 * 14.15 + 266,430.54 * 9.81 * 9.35 + 62,906.97 * 9.81 * 23.96) = 60,741,939.22 \text{ mN}$$

$$M_{s,c} = 0.01 * (75,300,313.53 * 15.95) = 12,010,400.01 \text{ mN}$$

$$M_s = \sqrt{60,741,939.22^2 + 12,010,400.01^2} = 61,917,952.88 \text{ mN}$$

- Comprobación según el Criterio de Plastificación para las Fuerzas Dinámicas Circunferenciales en el Cuerpo del Tanque debido al Líquido:

Estos esfuerzos dinámicos de tracción en las virolas debido al movimiento del líquido durante el terremoto se definen en las ecuaciones 7-29 a 7-33. Para una relación diámetro del tanque y nivel máximo del líquido mayor que 1.333:

$$N_i = 8.48 * 0.03 * 1.1 * 34 * 22 * \left[\frac{22 - 8.25}{22} - 0.5 * \left(\frac{22 - 8.25}{22} \right)^2 \right] \\ * \tanh \left(0.866 * \frac{34}{22} \right) = 78.36 \frac{N}{mm}$$

$$N_c = \frac{1.85 * 0.01 * 1.1 * 34^2 * \cosh \left(\frac{3.68 * (22 - (22 - 14.32))}{34} \right)}{\cosh \left(\frac{3.68 * 22}{34} \right)} = 10.62 \frac{N}{mm}$$

Fuerza de membrana debido a la presión hidrostática del producto es:

$$N_h = 4.9 * (22 - 0.3) * 34 * 1.1 = 3,976.74 \frac{N}{mm} \quad (7-55)$$

El esfuerzo tangencial máximo sobre las virolas que componen el cuerpo del tanque debido al movimiento del líquido, considerando el efecto sísmico vertical, según la ecuación 7-36 es:

$$\sigma_T = \frac{3,976.74 \pm \sqrt{78.36^2 + 10.62^2 + (0.017 * 3,976.74)^2}}{22.2} = \max(183.82, 174.45) = 183.82 \text{ MPa}$$

$$\sigma_T = 183.82 \text{ MPa} < \sigma_{adm} = 188 \text{ MPa}$$

Cumple la comprobación, por tanto el espesor de la virola de fondo es válido.

- Comprobación de Tanque Auto-anclado:

El procedimiento para verificar si es necesario anclar el tanque debido al sismo, depende del ratio de anclaje frente al volcamiento y de la resistencia al deslizamiento en base al cortante máximo en la base.

Los requisitos que tiene que cumplir el anillo anular del fondo frente a la fuerza de levantamiento al que se somete son los siguientes:

$$w_a = 99 * 6 * \sqrt{188 * 22 * 1.1 * (1 - 0.4 * 0.017)} = 39,929.27 \frac{N}{m} \leq 164,339.92 \frac{N}{m}$$

El anillo anular cumple la comprobación frente al levantamiento, por tanto el ancho mínimo igual a 672.2 mm que se adoptó en el capítulo 4 es válido.

El espesor del anillo anular es inferior al espesor corroído de la primera virola, pero no es mayor o igual al espesor de la chapa del fondo incluyendo el sobreespesor de corrosión.

$$t_a = 6 \text{ mm} < t_s = 22.2 - 1 = 21.2 \text{ mm}$$

$$t_a = 6 \text{ mm} < t_f = 8 \text{ mm}$$

El espesor adoptado para el anillo anular incluyendo el sobreepesor de corrosión es 10 mm.

El ratio de anclaje del tanque según la ecuación 7-41 es:

$$J = \frac{37,489,763.43}{34^2 * [30,246.94 * (1 - 0.4 * 0.017) + 39,929.27 - 0.4 * 2,017,917]} = 0.00 < 1.54$$

$$w_t = \left[\frac{W_s}{\pi * D} + w_{rs} \right] = \frac{266,430.54 * 9.81}{\pi * 34} + 5,777.49 = 30,246.94 \frac{N}{m}$$

$$w_{rs} = \frac{W_r}{\pi * D} = \frac{62,906.97 * 9.81}{\pi * 34} = 5,777.49 \frac{N}{m}$$

$$w_{int} = \frac{W_p}{\pi * D} = \frac{21,971,670.7}{\pi * 34} = 2,017,917 \frac{N}{m}$$

Como el valor del ratio de anclaje es inferior a 1.54 no es necesario anclar el tanque debido al momento sísmico.

- Comprobación de Resistencia frente al Deslizamiento:

El cortante máximo en la base calculado anteriormente debe ser inferior al cortante máximo en función del coeficiente de fricción tanque-cimentación para que no sea necesario el anclaje del tanque.

En el cálculo del cortante máximo intervienen los pesos de cada parte del tanque, restando la contribución debida al efecto sísmico vertical. Tomando un coeficiente de fricción igual a 0.4:

$$W = 266,430.54 + 62,906.97 + 61,526.45 + 21,971,670.7 = 22,362,534.66 \text{ kg}$$

$$V_s = 0.4 * 22,362,534.66 * 9.81 * (1 - 0.4 * 0.017) = 87,153,882.02 \text{ N}$$

$$V = 4,390,174.53 \text{ N} < 87,153,882.02 \text{ N}$$

Se cumple la comprobación, por tanto tampoco se requiere anclar el tanque debido al cortante aplicado en la base.

- Comprobación según el Criterio de Plastificación para Tanques Auto-anclados según la Tensión de Compresión Longitudinal del Cuerpo:

La máxima tensión de compresión longitudinal en las virolas para tanque auto-anclados con ratio de anclaje inferior a 0.785, según la ecuación 7.46 es:

$$\sigma_c = \left(30,246.94 * (1 + 0.4 * 0.017) + \frac{1.273 * 37,489,763.43}{34^2} \right) * \frac{1}{1000 * (22.2 - 1)} = 3.38 \text{ MPa}$$

La tensión admisible de compresión longitudinal se define en las ecuaciones 7-49 a 7-51.

$$\frac{G * H_w * D^2}{t_s^2} = \frac{1.1 * 22 * 34^2}{(22.2 - 1)^2} = 62.24 \geq 44$$

Por tanto la tensión admisible es:

$$F_c = \frac{83 * (22.2 - 1)}{D} = 51.75 \text{ MPa} < 0.5 * 188 = 94 \text{ MPa}$$

$$\sigma_c = 3.38 \text{ MPa} < F_c = 51.75 \text{ MPa}$$

Cumple la comprobación impuesta en la norma [1] para tanques no anclados. También se cumple el criterio de plastificación, por tanto el espesor de la virola de fondo adoptado es válido.

Finalmente, se ha comprobado que no se requiere anclaje debido al efecto sísmico ni por resistencia al deslizamiento; sin embargo se comprobó en el capítulo 6 que era necesario el anclaje debido al viento.

- Diseño de los Anclajes Mecánicos:

Para el diseño del número de pernos de anclaje necesarios se ha impuesto una separación máxima entre anclajes de 3 m, según los requisitos definidos en el apéndice E de la norma [1]. También se impone el diámetro mínimo que es necesario en el perno de anclaje, igual a 25 mm; y una tensión máxima admisible de 170 MPa.

La carga de diseño por levantamiento por unidad de longitud circunferencial para dimensionar los anclajes, en función del momento de vuelco y los efectos sísmicos verticales, según la ecuación 7-44 es:

$$w_{AB} = \left(\frac{1.273 * 37,489,763.43}{34^2} - 30,246.94 * (1 - 0.4 * 0.017) \right) = 11,242.88 \frac{N}{m}$$

Por tanto, la carga de anclaje de diseño, según la ecuación 7-45 es:

$$P_{AB} = 11,242.88 * \left(\frac{\pi * 34}{36} \right) = 33,358.30 \text{ N}$$

siendo el número mínimo de anclajes necesarios igual a:

$$n_A = \frac{\pi * 34}{3} = 35.6 \approx 36 \text{ pernos de anclaje}$$

El anclaje necesario tendrá un diámetro mínimo igual a:

$$A_{ancl} = \frac{33,358.30}{170} = 196.23 \text{ mm}^2$$

$$d_{ancl} = \sqrt{\frac{196.23 * 4}{\pi}} = 15.81 \text{ mm}$$

Como el diámetro necesario es inferior al mínimo exigido se adopta un diámetro del anclaje igual a 25 mm.

- Comprobación según el Criterio de Plastificación para Tanques Anclados Mecánicamente según la Tensión de Compresión Longitudinal del Cuerpo:

La máxima tensión de compresión longitudinal en las virolas para tanque anclados mecánicamente, según la ecuación 7.48 es:

$$\sigma_c = \left(30,246.94 * (1 + 0.4 * 0.017) + \frac{1.273 * 37,489,763.43}{34^2} \right) * \frac{1}{1000 * (22.2 - 1)}$$

$$= 3.38 \text{ MPa}$$

La tensión admisible de compresión longitudinal se define en las ecuaciones 7-49 a 7-51.

$$\frac{G * H_w * D^2}{t_s^2} = \frac{1.1 * 22 * 34^2}{(22.2 - 1)^2} = 62.24 \geq 44$$

Por tanto la tensión admisible es:

$$F_c = \frac{83 * (22.2 - 1)}{D} = 51.75 \text{ MPa} < 0.5 * 188 = 94 \text{ MPa}$$

$$\sigma_c = 3.38 \text{ MPa} < F_c = 51.75 \text{ MPa}$$

Cumple la comprobación impuesta en la norma [1] para tanques anclados. También se cumple el criterio de plastificación, por tanto el espesor de la virola de fondo adoptado es válido.

8 ANEXO: CÁLCULO DE PESOS

En este capítulo se define las cargas debido al peso de los diferentes elementos que componen el tanque.

En primer lugar se definirán las distintas partes en que se divide el tanque objeto de diseño.

1. Cuerpo principal del tanque compuesto por virolas.
2. Rigidizadores intermedios del cuerpo frente al efecto del viento (para este proyecto no se contemplan ya que se ha diseñado para una altura del cuerpo del tanque que no es necesario rigidizar).
3. Placa del fondo del tanque.
4. Anillo anular de fondo bajo el cuerpo del tanque.
5. Placa de cubierta.
6. Estructura rigidizadora que soporta la placa de cubierta.
7. Anillo circunferencial de compresión en la unión cuerpo-cubierta.
8. Anillos circunferenciales de arriostramiento entre rigidizadores de cubierta.
9. Soporte central de cubierta.
10. Líquido almacenado en el tanque.

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

8.1 Nomenclatura

A_2	Área de las alas del perfil armado del soporte central [cm]
A_{casq}	Área del casquete esférico de la cubierta [m ²]
A_h	Área en proyección horizontal de la cubierta [m ²]
D	Diámetro del tanque [m]
DL	Peso efectivo del tanque [kg]
dw	Densidad del producto [kg/m ³]
F_{yb}	Límite elástico mínimo del acero de la placa del fondo [MPa]
g	Aceleración de la gravedad [m/s ²]
G_{anillo}	Peso por unidad de longitud del perfil del anillo circunferencial de cubierta [kg/m]
G_{arr}	Peso por unidad de longitud del perfil de los anillos de arriostramiento de cubierta [kg/m]
G_{vigas}	Peso por unidad de longitud del perfil del rigidizador de cubierta [kg/m]
H	Altura total del tanque [m]
h_i	Altura de cada virola [m]

h_{rig}	Altura total del rigidizador de cubierta [cm]
H_w	Altura del nivel de líquido dentro del depósito [m]
L_{arr}	Longitud del arriostramiento de cubierta [mm]
L_{vigas}	Longitud del rigidizador de cubierta en verdadera magnitud [m]
N_{arr}	Número de anillos circunferenciales de arriostramiento de cubierta
n_{vigas}	Número de rigidizadores de la estructura de cubierta
P_{di}	Presión de diseño interna [kPa]
S_{snow}	Sobrecarga de nieve [kPa]
t_{actual}	Espesor de la virola “i” [mm]
t_{beff}	Espesor adoptado en la chapa anular [mm]
$t_{f,adopt}$	Espesor adoptado en el fondo del depósito [mm]
$t_{r,adopt}$	Espesor adoptado de la chapa de cubierta [mm]
t_{sop}	Espesor adoptado en las alas del perfil armado del soporte central [cm]
W_1	Peso de las virolas que componen el cuerpo del tanque [kg]
W_2	Peso de la placa del fondo del tanque [kg]
W_3	Peso del anillo anular de cimentación [kg]
W_4	Peso de la placa de cubierta [kg]
W_5	Peso de la estructura rigidizadora de cubierta [kg]
W_{acc}	Peso de los accesorios de cubierta [kg]
W_{anillo}	Peso de los anillos circunferenciales de cubierta [kg]
W_{arr}	Peso de los anillos circunferenciales de arriostramiento de cubierta [kg]
W_{chapa}	Ancho adoptado en la chapa anular [mm]
W_{eff}	Peso efectivo de tanque que contribuye a la respuesta del sismo [N]
W_i	Peso eficaz impulsivo del líquido [N]
W_L	Peso del líquido por unidad de longitud circunferencial, según [1] [N/m]
W_s	Peso total del cuerpo del tanque y accesorios [N]
$W_{s,r}$	Peso del cuerpo del tanque más la estructura soporte de cubierta [kg]
W_{sc}	Peso del soporte central de cubierta [kg]
W_w	Peso del líquido, según [1] [N]
ρ_{acero}	Densidad del acero [kg/m ³]

8.2 Peso Efectivo del Tanque (DL)

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

8.2.1 Peso de las Virolas que componen el Cuerpo del Tanque

$$W_1 = \rho_{acero} * \pi * D * \sum_{i=1}^{nvir} t_{actual(i)} * h_{vir,i} \quad [kg] \quad (8-1)$$

8.2.2 Peso de la Placa de Fondo del Tanque

$$W_2 = \rho_{acero} * A_h * t_{f,adopt} \quad [kg] \quad (8-2)$$

8.2.3 Peso del Anillo Anular del Fondo

$$W_3 = \rho_{acero} * \pi * D * w_{chapa} * t_{beff} \quad [kg] \quad (8-3)$$

8.2.4 Peso de la Placa de Cubierta

$$W_4 = \rho_{acero} * A_c * t_{r,adopt} \quad [kg] \quad (8-4)$$

8.2.5 Peso de la Estructura Rigidizadora de Cubierta

$$W_5 = n_{vigas} * G_{vigas} * L_{vigas} \quad [kg] \quad (8-5)$$

8.2.6 Peso del Anillo Circunferencial de Compresión de la Unión Cuerpo-Cubierta

$$W_{anillo} = \pi * D * G_{anillo} \quad [kg] \quad (8-6)$$

8.2.7 Peso del Soporte Central de Cubierta

$$W_{sc} = \rho_{acero} * [(2 * A_2) + (h_{rig} * t_{sop})] * 0.1 * \pi * D \quad [kg] \quad (8-7)$$

8.2.8 Peso de los Anillos Circunferenciales de Arriostramiento entre Rigidizadores de Cubierta

$$W_{arr} = L_{arr} * G_{arr} * N_{arr} \quad (8-8)$$

El peso efectivo del tanque es:

$$DL = W_1 + W_2 + W_3 + W_4 + W_5 + W_{anillo} + W_{arr} + W_{sc} \quad [kg] \quad (8-9)$$

8.3 Peso del Líquido para la Verificación del Efecto del Viento, según API 650

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

$$w_L = 59 * t_{f,adopt} * \sqrt{F_{by} * \frac{H_w}{2}} \quad [N/m] \quad (8-10)$$

$$w_w = w_L * \pi * D \quad [N] \quad (8-11)$$

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

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

$$L_b = 0.0291 * t_{f,adopt} * \sqrt{\frac{F_{by}}{H}} \leq 0.035 * D \quad [m] \quad (8-12)$$

8.4 Peso Total del Cuerpo del Tanque más Accesorios

$$W_s = W_1 \quad [kg] \quad (8-13)$$

8.5 Peso Total de la Cubierta Fija, Accesorios más el 10% de la Carga de Nieve

$$W_{acc} = W_{anillo} + W_{sc} + W_{arr} \quad [kg] \quad (8-14)$$

$$W_r = W_4 + W_5 + W_{acc} + 0.10 * Snow * \left(\frac{D}{2}\right)^2 \quad [kg] \quad (8-15)$$

8.6 Peso Total del Fondo

$$W_f = W_2 + W_3 \quad [kg] \quad (8-16)$$

8.7 Peso Efectivo de los Contenidos del Tanque con Densidad del Producto

$$W_p = dw * H_w * \pi * \left(\frac{D}{2}\right)^2 \quad [kg] \quad (8-17)$$

8.8 Peso del Cuerpo del Tanque más la Estructura Rigidizadora de Cubierta que absorbe el Cuerpo del Tanque

$$W_{s,r} = W_1 + W_5 + W_{acc} \quad [kg] \quad (8-18)$$

8.9 Peso Efectivo del Tanque que contribuye a la Respuesta del Sismo

El peso efectivo del tanque que contribuye a la respuesta del sismo incluye el peso total del tanque más la

componente impulsiva del peso efectivo del producto, definida en el capítulo “Verificación del Efecto Sísmico”, la cual está ligada rígidamente a las paredes del tanque y se mueve solidaria con el mismo.

$$W_{eff} = DL * g + W_i \quad [N] \quad (8-19)$$

8.10 Ejemplo del Cálculo de Pesos

El cálculo de los pesos de las distintas partes que componen el tanque se ha programado en el archivo “pesos” de Matlab.

- Peso Efectivo del Tanque (DL)

1. Peso de las Virolas que componen el Cuerpo del Tanque

$$W_1 = 7850 * \pi * 34 * 2.5 * \frac{22.2 + 19.8 + 17.3 + 14.9 + 12.5 + 10.1 * 4}{1000} = 266,430.54 \text{ kg}$$

2. Peso de la Placa de Fondo del Tanque

$$W_2 = 7850 * 907.92 * \frac{8}{1000} = 57,017.38 \text{ kg}$$

3. Peso del Anillo anular del Fondo

$$W_3 = 7850 * \pi * 34 * \frac{672.2}{1000} * \frac{8}{1000} = 4,509.07 \text{ kg}$$

4. Peso de la Placa de Cubierta

$$W_4 = 7850 * 935.69 * \frac{6}{1000} = 44,071 \text{ kg}$$

5. Peso de la Estructura Rigidizadora de Cubierta

$$W_5 = 44 * 22.4 * 15.63 = 15,404.93 \text{ kg}$$

6. Peso del Anillo Circunferencial de Compresión de la Unión Cuerpo-Cubierta

$$W_{anillo} = \pi * 34 * 8.49 = 906.85 \text{ kg}$$

7. Peso del Soporte Central de Cubierta

$$W_{sc} = 7850 * \frac{[(2 * 73.78) + (20 * 1.7)]}{10000} * 0.1 * \pi * 34 = 1,522.36 \text{ kg}$$

8. Peso de los Anillos Circunferenciales de Arriostramiento entre Rigidizadores de Cubierta

Para calcular la longitud de los anillos de arriostramiento y cruces de San Andrés se utiliza el archivo “pesos” de Matlab.

$$W_{arr} = 262.67 * 3.77 = 990.27 \text{ kg}$$

El peso efectivo del tanque es:

$$DL = 390,852.4 \text{ kg}$$

- Peso del Líquido para la Verificación del Efecto del Viento, según [1]

$$w_L = 59 * \frac{8}{1000} * \sqrt{172 * \frac{22 * 1000}{2}} = 649.24 \frac{N}{m}$$

$$w_w = 649.24 * \pi * 34 = 69,347.59 \text{ N}$$

- Peso Total del Cuerpo del Tanque más Accesorios

$$W_s = 266,430.54 \text{ kg}$$

- Peso Total de la Cubierta Fija, Accesorios, más el 10% de la Carga de Nieve

$$W_{acc} = 906.85 + 1,522.36 + 990.27 = 3,419.48 \text{ kg}$$

$$W_r = 44,071 + 15,404.93 + 3,419.48 + 0.10 * 0.4 * \left(\frac{34}{2}\right)^2 = 62,906.97 \text{ kg}$$

- Peso Total del Fondo

$$W_f = 57,017.38 + 4,509.07 = 61,526.45 \text{ kg}$$

- Peso Efectivo de los Contenidos del Tanque con Densidad del Producto

$$W_p = 1100 * 22 * \pi * \left(\frac{34}{2}\right)^2 = 21,971,670.7 \text{ kg}$$

- Peso del Cuerpo del Tanque más la Estructura Rigidizadora de Cubierta que absorbe el Cuerpo del Tanque

$$W_{s,r} = 266,430.54 + 15,404.93 + 3,419.48 = 285,254.95 \text{ kg}$$

- Peso Efectivo del Tanque que contribuye a la Respuesta del Sismo

$$W_{eff} = 392,645.23 * 9.81 + 140,318,532.4 = 144,170,382.1 \text{ N}$$

9 MODELO DE ELEMENTOS FINITOS DE LA UNIÓN CUERPO-FONDO DEL TANQUE

En los proyectos de diseño de tanques de almacenamiento, un aspecto importante que requiere de un análisis más preciso es la unión de la pared del tanque con el fondo del mismo. Esta zona del tanque es la parte más crítica, la cual está sometida a mayores esfuerzos debido a la presión del producto almacenado y el peso total transmitido por las paredes a la base.

Por este motivo, conviene realizar un análisis numérico que determine la expansión radial máxima que puede experimentar la pared del tanque y comprobar si los espesores adoptados en el diseño para las placas del cuerpo son óptimos para soportar los esfuerzos a los que estarán sometidos.

En este capítulo se realiza el análisis de la unión cuerpo-fondo del tanque mediante el programa Ansys de elementos finitos. El objetivo del estudio es verificar que el análisis analítico, realizado mediante la teoría de Kroon que se encuentra detallada en [3], es una buena aproximación para determinar los esfuerzos y giros a los que se someterá la unión.

9.11 Nomenclatura

a	Longitud desde el punto de la reacción A bajo el fondo hasta el eje de la pared del tanque [mm]
A	Área de los muelles [m ²]
B	Ancho unidad [m]
D	Diámetro del tanque [m]
e	Longitud de la parte rígida de la viga [mm]
E	Módulo de Young del acero [MPa]
F_w	Tamaño del cordón de soldadura [mm]
H	Altura total del líquido [m]
I_b	Momento de inercia del anillo anular del fondo [mm]
I_s	Momento de inercia del cuerpo [mm]
K_{lineal}	Rigidez de los muelles lineales [N/m]
$K_{\text{no lineal}}$	Rigidez de los muelles no lineales [N/m]
K_s	Coefficiente de balasto del terreno [MN/m ³]
L	Longitud del anillo anular [mm]
L_{elem}	Longitud de los elementos del mallado en Ansys [m]
L_m	Longitud de los muelles [m]
L_{onda}	Longitud de onda [m]
M_c	Momento en el cuerpo debido a la carga [mmN/mm]
M_d	Momento sobre el pie del cordón de soldadura del anillo anular [mmN/mm]

P_0	Presión ejercida por el líquido en el fondo [N/mm ²]
P_1	Peso del cuerpo más la parte de la cubierta soportada por el mismo [N/mm]
P_2	Presión del líquido sobre la parte interior del cordón de soldadura [N/mm]
Q	Fuerza horizontal en el fondo del cuerpo [N/mm]
R	Radio del tanque [m]
R_a, R_b	Reacciones en los puntos A y B [N/mm]
s	Distancia desde la articulación [m]
SG	Gravedad específica del producto almacenado [-]
t	Espesor de la 1ª virola del depósito, situada en la parte inferior [mm]
T_b	Espesor del anillo anular del fondo del tanque [mm]
T_s	Espesor de la pared del tanque [mm]
w	Esfuerzo debido a la combinación del momento M_C y la fuerza horizontal Q [N/mm]
y	Expansión radial del fondo [mm]
α	Longitud elástica de la viga [m]
ε	Deformación de la pared del tanque [-]
θ_b	Giro del punto B [rad]
θ_{b1}	Giro del punto B debido a la carga P_1 [rad]
θ_{b2}	Giro del punto B debido a la carga P_2 [rad]
θ_{b3}	Giro del punto B debido a la carga P_0 [rad]
θ_{b4}	Giro del punto B debido al momento M_C [rad]
θ_c	Giro del punto C [rad]
θ_{c1}	Giro del punto C debido a la carga P_1 [rad]
θ_{c2}	Giro del punto C debido a la carga P_2 [rad]
θ_{c3}	Giro del punto C debido a la carga P_0 [rad]
θ_{c4}	Giro del punto C debido al momento M_C [rad]
θ_s	Giro del cuerpo [rad]
λ	Longitud característica [mm]
σ	Tensión de diseño del producto [MPa]
σ_f	Tensión de diseño a fatiga [MPa]
σ_M	Tensión debido al momento [MPa]
σ_N	Tensión debido al axil [MPa]
τ	Esfuerzo cortante en el cordón de soldadura [MPa]

9.12 Flexión Vertical del Cuerpo

Cuando un tanque se somete al llenado de un producto, el cuerpo se expande radialmente debido a la naturaleza del material elástico del cuerpo. Esta expansión natural está restringida a la articulación donde el cuerpo está soldado a la chapa de fondo y, por tanto, esta conexión está sujeta a rotación.

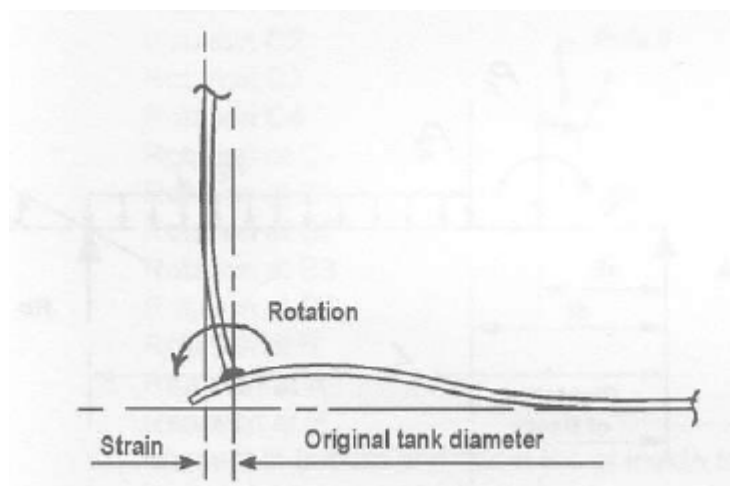


Figura 9-1. Deformación radial de la pared del tanque.

Antes de analizar lo que ocurre bajo esta circunstancia, inicialmente es necesario tomar un enfoque simplista con el fin de establecer que forma está tratando de adoptar el cuerpo bajo esta carga. Según los principios de ingeniería básica:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \rightarrow \varepsilon = \frac{\sigma}{E} \quad (9-1)$$

Por tanto, el nuevo diámetro del tanque es el diámetro original multiplicado por la deformación.

9.13 Conexión Cuerpo-Fondo

La expansión radial del cuerpo está restringido en su unión con la chapa de fondo, que según la práctica, el esfuerzo circunferencial teórico al que está sometido el cuerpo del tanque no tiene influencia a partir del punto que está situado a una distancia igual a $\sqrt{D * t}$ por encima del punto de unión.

La rotación de la unión cuerpo-fondo provoca esfuerzos en el anillo anular de fondo, y en base a ello, las normas de diseño de tanques definen el espesor y ancho mínimo requerido para el anillo anular de fondo situado bajo el cuerpo del tanque. Sin embargo, no existe un procedimiento de diseño específico para la zona crítica de la chapa de fondo, y mientras esta teoría se dedica al diseño del cuerpo, es difícil separar esta zona crítica debido a que la unión cuerpo-fondo es muy rígida y rota como una unidad cuando el tanque está sometido a cargas hidrostáticas.

La sección de la base adyacente al cuerpo del tanque puede ser considerada una proyección horizontal del propio cuerpo y esta zona por tanto requiere una consideración especial con respecto a las tensiones causadas por la rotación, cuyo análisis se describe a continuación.

Normalmente esto se utiliza en tanques de gran diámetro, los cuales necesitan una consideración detallada de esta zona y en las normas exigen disponer de un anillo anular que son soldados a tope bajo el cuerpo del tanque, dando así una superficie lisa sobre la que se asienta el cuerpo.

La expansión del cuerpo está restringido prácticamente a cero en la unión soldada entre la virola de fondo y la chapa de fondo y por tanto, el cuerpo tiende a girar en dirección hacia el exterior sobre esta articulación. La unión soldada entre el cuerpo y la chapa de fondo es muy rígida, por ello a medida que gira el cuerpo la placa de fondo también rota, lo cual hace que se levante la base a una cierta distancia de la pared dentro del tanque, hasta que la presión del producto que actúa sobre la base equilibre el efecto de levantamiento.

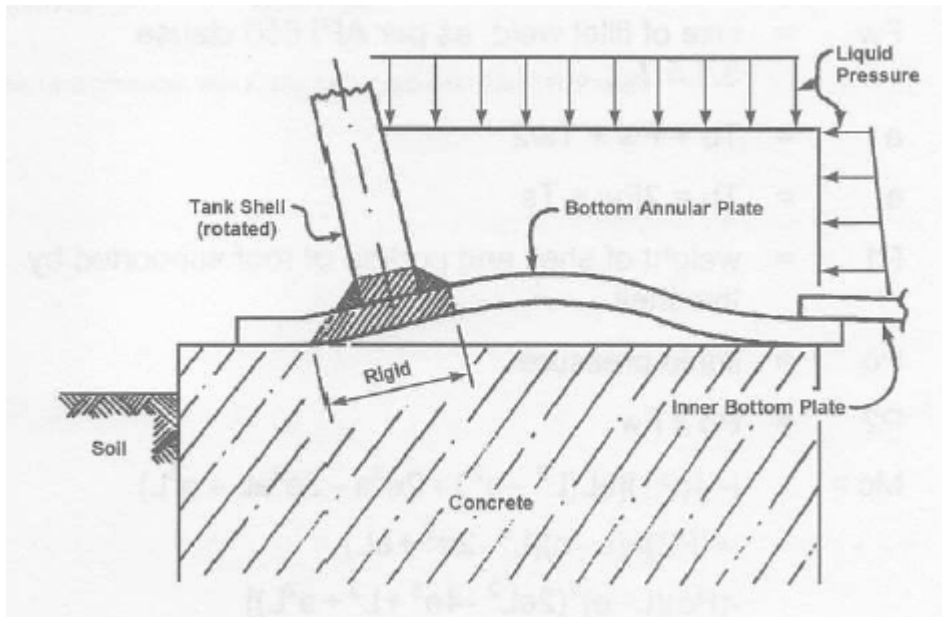


Figura 9-2. Giro de la articulación y presiones aplicadas.

Esta acción causa un elevado esfuerzo de flexión en la chapa de fondo y en la punta de la soldadura interna, los cuales son cíclicos, debido al llenado y vaciado continuo del tanque, por tanto este área crítica está sometida a pequeños ciclos de fatiga.

La norma [1] tiene en cuenta este gran problema y especifica un esfuerzo de diseño a fatiga de 517 N/mm^2 basado sobre 1300 ciclos, los cual corresponde a un ciclo de llenado y vaciado por semana durante 25 años.

9.14 Rotación y Esfuerzos en la Articulación

H.Kroon desarrolló un método para analizar la rotación y esfuerzos en la articulación basada en las siguientes condiciones:

- La chapa anular se considera que es una viga simplemente apoyada por unidad de ancho.
- La cimentación es infinitamente rígida (no hay deformación vertical).
- La longitud de la viga es la longitud requerida para reducir la rotación en el extremo inferior a cero.
- La rotación del cuerpo del tanque es igual a la rotación del fondo en la articulación.
- El desplazamiento radial es cero.
- La tensión de diseño a fatiga es 75000 lbs/in^2 .
- El tanque está a temperatura ambiente.
- El tamaño de la soldadura en la articulación se rige por la norma [1] apartado 3.1.5.7.
- El uso del análisis elástico para tensiones mayores al límite elástico asume una acción elástica completa después de unas pocas repeticiones del esfuerzo cíclico, lo que aumentará la resistencia a la fluencia, pero dejando una cierta cantidad de deformación permanente.

9.15 Análisis Analítico según la Teoría de H. Kroon

La viga es analizada por superposición de la rotación debido a cada carga que actúa sobre la misma. El procedimiento de análisis se ha realizado mediante un algoritmo en Matlab denominado “articulación”. Los pasos que se llevan a cabo son los definidos a continuación.

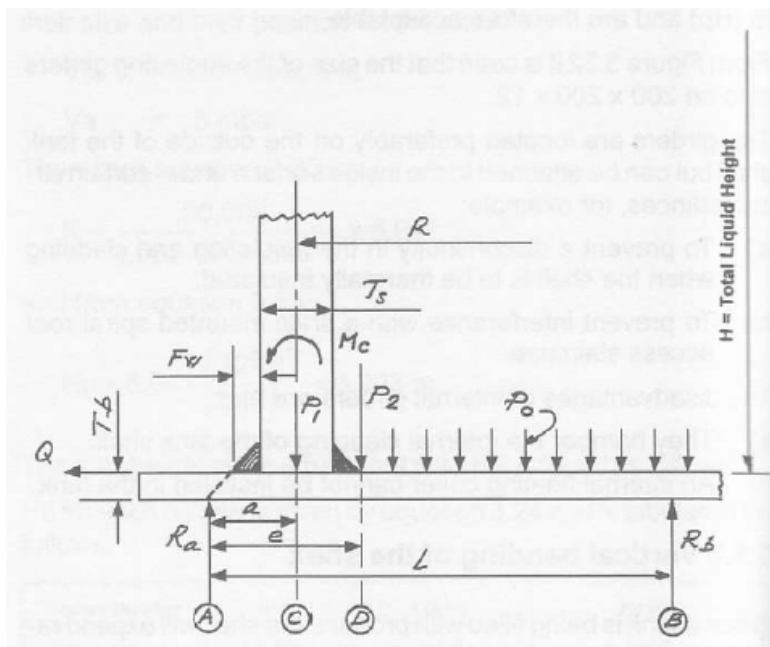


Figura 9-3. Parámetros del problema analítico.

Los parámetros representados en la figura anterior son los siguientes:

- **F_w**: es el tamaño del cordón de soldadura según el apartado 3.1.5.7 de la norma [1]. En este ejemplo se toma un valor igual a 8 mm.
- **T_b**: es el espesor adoptado en el anillo anular del fondo, el cual adopta un valor igual a 8 mm en este ejemplo.
- **T_s**: es el espesor de la virola situada en la parte inferior de la pared del tanque, el cual adopta un valor igual a 12.6 mm en este ejemplo.
- **a**: es la longitud desde el punto la reacción A bajo el fondo hasta el eje de la pared del tanque. Se define como:

$$a = T_b + F_w + \frac{T_s}{2} \text{ [mm]} \quad (9-2)$$

- **e**: es la parte rígida de la viga, cuya longitud se mide desde la reacción A hasta el punto de aplicación de la carga P₂. Se define como:

$$e = T_b + 2 * F_w + T_s \text{ [mm]} \quad (9-3)$$

- **P₀**: es la presión ejercida por el líquido en el fondo, el cual adopta un valor igual a 0.1412 N/mm² en este ejemplo.

- **P₁**: es el peso del cuerpo más la parte de la cubierta soportada por el mismo, el cual adopta un valor igual a 17.134 N/mm en este ejemplo.
- **P₂**: es la presión del líquido sobre la parte interior del cordón de soldadura. Se define como:

$$P_2 = P_0 * F_w \left[\frac{N}{mm} \right] \quad (9-4)$$

- **R_a, R_b**: son las reacciones en el punto A y B, respectivamente.
- **Q**: es la fuerza horizontal en el fondo del cuerpo, en N/mm.
- **R**: es el radio del tanque, en metros.
- **H**: es la altura total del líquido, en metros.
- Otros datos necesarios para la resolución del problema son la gravedad específica del producto almacenado (SG = 0.9), el módulo de elasticidad del acero (E = 200,000 N/mm²) y la longitud de la viga que representa el anillo anular (L = 350.567 mm).

Las incógnitas del problema son:

- El momento en el cuerpo debido a la carga (**M_c**).
- El giro del cuerpo (**θ_s**) y los giros en los puntos B y C (**θ_B** y **θ_C**).
- Las reacciones en A y B (**R_a** y **R_b**).
- La fuerza horizontal en el fondo del cuerpo (**Q**).
- El momento sobre el pie del cordón de soldadura del anillo anular de fondo (**M_d**).
- La tensión de diseño a fatiga (**σ_f**).
- El esfuerzo cortante en el cordón de soldadura (**τ**).

Las ecuaciones de compatibilidad que se imponen para la resolución del problema son:

$$\theta_C = -\theta_S \quad (9-5)$$

$$\theta_b = 0 \quad (9-6)$$

9.15.1 Resolución Analítica

Resolviendo las ecuaciones mediante Matlab obtenemos las incógnitas del problema.

El momento del cuerpo se obtiene según la siguiente ecuación:

$$M_C = \frac{-4 * P_1 * [a * L * (L^2 - a^2) + 2 * e^3 * a - 3 * e^2 * a * L + a^3 * L]}{4 * (-L^3 - 2 * e^3 + 3 * e^2 * L)}$$

$$\frac{-4 * P_2 * e * (L - e) * (L^2 - 2 * e^2 + e * L)}{4 * (-L^3 - 2 * e^3 + 3 * e^2 * L)} \quad (9-7)$$

$$\frac{-P_0 * (L - e)^2 * (2 * e * L^2 - 4 * e^3 + L^3 + e^2 * L)}{4 * (-L^3 - 2 * e^3 + 3 * e^2 * L)} = 4784.5 \frac{mmN}{mm}$$

La longitud característica, expansión radial del fondo y momento de inercia del cuerpo se obtienen como:

$$\lambda = \frac{1.2854}{\sqrt{R * T_s}} = 0.003 \text{ mm}^{-1} \quad (9-8)$$

$$y = \frac{P_o * R^2}{E * T_b} - \frac{SG * (H - x) * R^2}{E * T_s} = 12.61 \text{ mm} \quad (9-9)$$

$$I_s = \frac{T_s^3}{10.92} = 183.18 \text{ mm} \quad (9-10)$$

El giro del cuerpo de calcula como:

$$\theta_s = \frac{M_c}{2\lambda E * I_s} - \lambda * y + \frac{y}{H} + \frac{\lambda * Q * L}{E * T_b} = -0.0144 \text{ rad} \quad (9-11)$$

La rotación en el punto B se obtiene mediante la superposición de los giros debido a cada una de las cargas aplicadas, en función del momento de inercia del anillo anular de fondo (**I_b**).

El término y/H se añade para corregir la ecuación debido a la forma triangular del diagrama de presiones.

$$I_b = \frac{T_b^3}{10.92} = 46.89 \text{ mm} \quad (9-12)$$

$$\theta_{b1} = \frac{P_1}{6EI_b * L^2} * [a * L * (L^2 - a^2) + 2 * e^3 * a - 3 * e^2 * a * L + a^3 * L] = 0.0023 \text{ rad} \quad (9-13)$$

$$\theta_{b2} = \frac{P_2 * e * (L - e)}{6EI_b * L^2} * [L^2 - 2 * e^2 + e * L] = 0.00025 \text{ rad} \quad (9-14)$$

$$\theta_{b3} = \frac{P_o * (L - e)^2}{24EI_b * L^2} * [2 * e * L^2 - 4 * e^3 + L^3 + e^2 * L] = 0.0263 \text{ rad} \quad (9-15)$$

$$\theta_{b4} = \frac{M_c}{6EI_b * L^2} * [-L^3 - 2 * e^3 + 3 * e^2 * L] = -0.0289 \text{ rad} \quad (9-16)$$

$$\theta_b = \theta_{b1} + \theta_{b2} + \theta_{b3} + \theta_{b4} = 0 \text{ rad} \quad (9-17)$$

Se verifica la compatibilidad impuesta en la ecuación 9-6.

La rotación en el punto C se obtiene igual que el giro en el punto B.

$$\theta_{c1} = \frac{P_1}{24EI_b * L^2} * [12 * L * e^2 * (L - a) - 12 * L^2 * (e - a)^2 -] - 8 * e^3 * (L - a) +$$

$$+ 4 * L * (e - a)^2 * (2 * e + a) - 4 * a * L * (L - a) * (2 * L - a)] = -0.0034 \text{ rad} \quad (9-18)$$

$$\theta_{c2} = \frac{P_2}{24EI_b * L^2} * [12 * L * e^2 * (L - e) - 8 * e^3 * (L - e) -]$$

$$- 4 * e * L * (L - e) * (2 * L - e)] = -0.00037 \text{ rad} \quad (9-19)$$

$$\theta_{c3} = \frac{P_0 * (L - e)^2}{24EI_b * L^2} * [7 * e^2 * L - 4 * e^3 - L^3 - 2 * e * L^2] = -0.0247 \text{ rad} \quad (9-20)$$

$$\theta_{c4} = \frac{8 * M_C * (L - e)^3}{24EI_b * L^2} = 0.0428 \text{ rad} \quad (9-21)$$

$$\theta_c = \theta_{c1} + \theta_{c2} + \theta_{c3} + \theta_{c4} = 0.0144 \text{ rad} \quad (9-22)$$

Se verifica la compatibilidad impuesta en la ecuación 9-5.

La fuerza horizontal que actúa en el fondo del cuerpo se calcula en función de la ecuación del giro en el cuerpo como:

$$Q = \frac{\frac{2 * \lambda^2 * R^2}{E * T_s} * M_C + y}{\frac{L}{E * T_b} + \frac{2 * \lambda * R^2}{E * T_s}} = 38.01 \frac{N}{mm} \quad (9-23)$$

Las reacciones en los puntos A y B que actúan en los extremos de la viga son:

$$R_a = \frac{P_1 * (L - a) + P_2 * (L - e) + P_0 * \frac{(L - e)^2}{2} + M_C}{L} = 50.56 \frac{N}{mm} \quad (9-24)$$

$$R_b = P_1 + P_2 + P_0 * (L - e) - R_a = 12.04 \frac{N}{mm} \quad (9-25)$$

El momento de flexión en el anillo anular que actúa en el pie del cordón interno de soldadura es:

$$M_d = M_C - R_a * e + P_1 * (e - a) = 3179.2 \frac{mmN}{mm} \quad (9-26)$$

Por último, la tensión debido al momento de flexión en el anillo anular y la fuerza horizontal, y el esfuerzo

cortante en el cordón de soldadura se obtienen mediante las siguientes ecuaciones:

$$\sigma = \frac{Q}{T_b} + \frac{6 * M_d}{T_b^2} = 302.8 \text{ MPa} \leq 75,000 \frac{\text{lbs}}{\text{in}^2} = 517 \text{ MPa} \quad (9-27)$$

$$w = \sqrt{\left(\frac{M_c}{T_s}\right)^2 + \left(\frac{Q}{2}\right)^2} = 380.2 \frac{\text{N}}{\text{mm}} \quad (9-28)$$

$$\tau = \frac{w}{0.7071 * F_w} = 67.21 \text{ MPa} \quad (9-29)$$

9.16 Análisis Numérico mediante Ansys

El siguiente paso del estudio es realizar el análisis de la unión mediante un programa de elementos finitos para poder comparar la deformación de la pared del tanque con la obtenida en el análisis analítico.

Para realizar el modelo en Ansys se utilizan elementos tipo beam 188, que representan la pared y el anillo anular del fondo del tanque, con una longitud de elemento igual al espesor de la chapa más delgada (0.008 m). El análisis se realiza para un ancho nominal de las placas igual a 1 m.

Para analizar la rigidez relativa entre el anillo y la cimentación se modela una viga sobre lecho elástico con muelles no lineales repartidos bajo la viga por unidad de longitud, en función del coeficiente de balasto que depende de la rigidez del terreno, la geometría de la base y de su rigidez. Estos muelles trabajan a compresión cuando están solicitados y no presentan rigidez cuando la viga se separa del terreno.

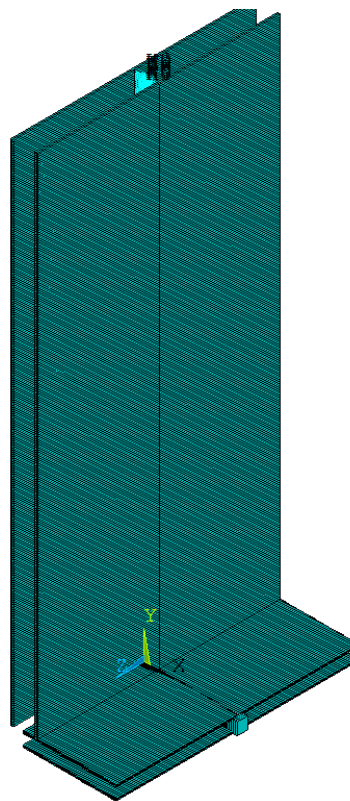


Figura 9-4. Modelo en Ansys de la unión cuerpo-fondo.

En este caso, el terreno será la cimentación del tanque, el cual tendrá una rigidez mucho mayor a la del anillo

anular para que se produzca la deformación en dicho anillo. Por tanto, se aplica un coeficiente de balasto igual a:

$$K_S = 100 \frac{MN}{m^3} \quad (9-30)$$

$$K_{no\ lineal} = K_S * B * L_{elem} = 100 * 10^6 \frac{N}{m^3} * 1\ m * 0.008\ m = 8 * 10^5 \frac{N}{m} \quad (9-31)$$

El área de los muelles se obtiene mediante la expresión de la rigidez axial de una viga, en función de la longitud del muelle. Para una longitud del muelle igual a 0.5 m se obtiene:

$$K_{no\ lineal} = \frac{E * A}{L_m} \rightarrow A = \frac{8 * 10^5 * 0.5}{210 * 10^9} = 1.9 * 10^{-6}\ m^2 \quad (9-32)$$

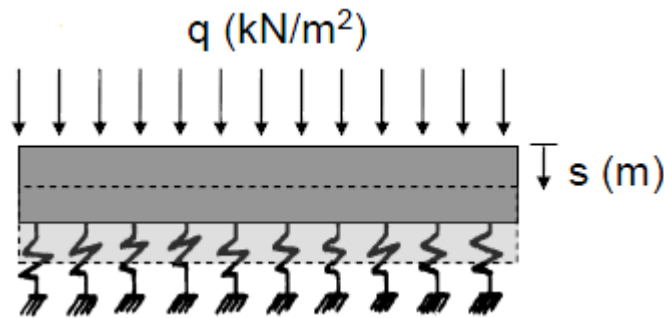


Figura 9-5. Viga sobre lecho elástico.

En cuanto a la pared del tanque, los desplazamientos y giros de una lámina se expresan como la superposición de dos soluciones: la de membrana y la de flexión (localizada o no). La solución de membrana satisface el equilibrio global, por tanto dicha solución en un cilindro a presión interna tiene un desplazamiento radial. Sin embargo, la solución de flexión satisface la compatibilidad de desplazamientos radiales y giros en las transiciones, y oscila con la distancia a la transición (s), decayendo a medida que nos alejamos de la unión con una amplitud igual a:

$$\exp \frac{-2 * \pi * s}{L_{onda}} \quad (9-33)$$

$$L_{onda} = 2 * \pi * \alpha \quad (9-34)$$

siendo L igual a la longitud de onda del término oscilatorio y α la longitud elástica de una viga de ancho B, longitud L y canto t, apoyada sobre un lecho elástico.

Por tanto, la pared se modela también como una viga sobre lecho elástico con muelles lineales que presentan rigidez tanto a tracción como compresión. La longitud de la pared tendrá un valor igual a la longitud de onda,

en función de la longitud elástica de la viga. El coeficiente de balasto para deformación aximétrica se representa en este caso como la rigidez de un cilindro hueco.

$$L_{onda} = 2 * \pi * \alpha = \frac{2 * \pi}{\sqrt[4]{3}} * \sqrt{R * t} = 3.38 * \sqrt{D * t} \quad (9-35)$$

$$\alpha = \sqrt[4]{\frac{4 * E * I}{K_S * B}} = \sqrt[4]{\frac{4 * E * \frac{1 * m * t^3}{12}}{\frac{E * t}{R^2} * 1 * m}} = \sqrt[4]{\frac{R^2 * t^2}{3}} \quad (9-36)$$

$$K_{lineal} = \frac{E * t}{R^2} * B * L_{elem} = \frac{210 * 10^9 \frac{N}{m^2} * 0.0126 * m}{15^2 * m^2} * 1 * m * 0.008 * m = 9.41 * 10^4 \frac{N}{m} \quad (9-37)$$

El primer paso de carga aplicado es la presión uniformemente distribuida sobre el fondo del tanque debido a la presión ejercida por unidad de área del producto.

1
DISPLACEMENT
STEP=1
SUB =1
TIME=1
DMX =.520E-06

ANSYS



Figura 9-6. Deformación de la pared del tanque debido a la presión en el fondo.

En la figura anterior se representa la deformación experimentada, donde se observa el asiento experimentado por el anillo de fondo.

Añadiendo la carga vertical debido al peso transmitido por el cuerpo del tanque y la presión lateral sobre la pared ejercida por el producto, considerando esta distribución uniforme ya que se supone que apenas varía para la longitud de la pared representada, obtenemos la deformación resultante experimentada en el modelo.

1
NODAL SOLUTION
STEP=3
SUB =1
TIME=3
UX (AVG)
RSYS=0
DMX =.012573
SMN =-.012568
SMX =.635E-04

ANSYS

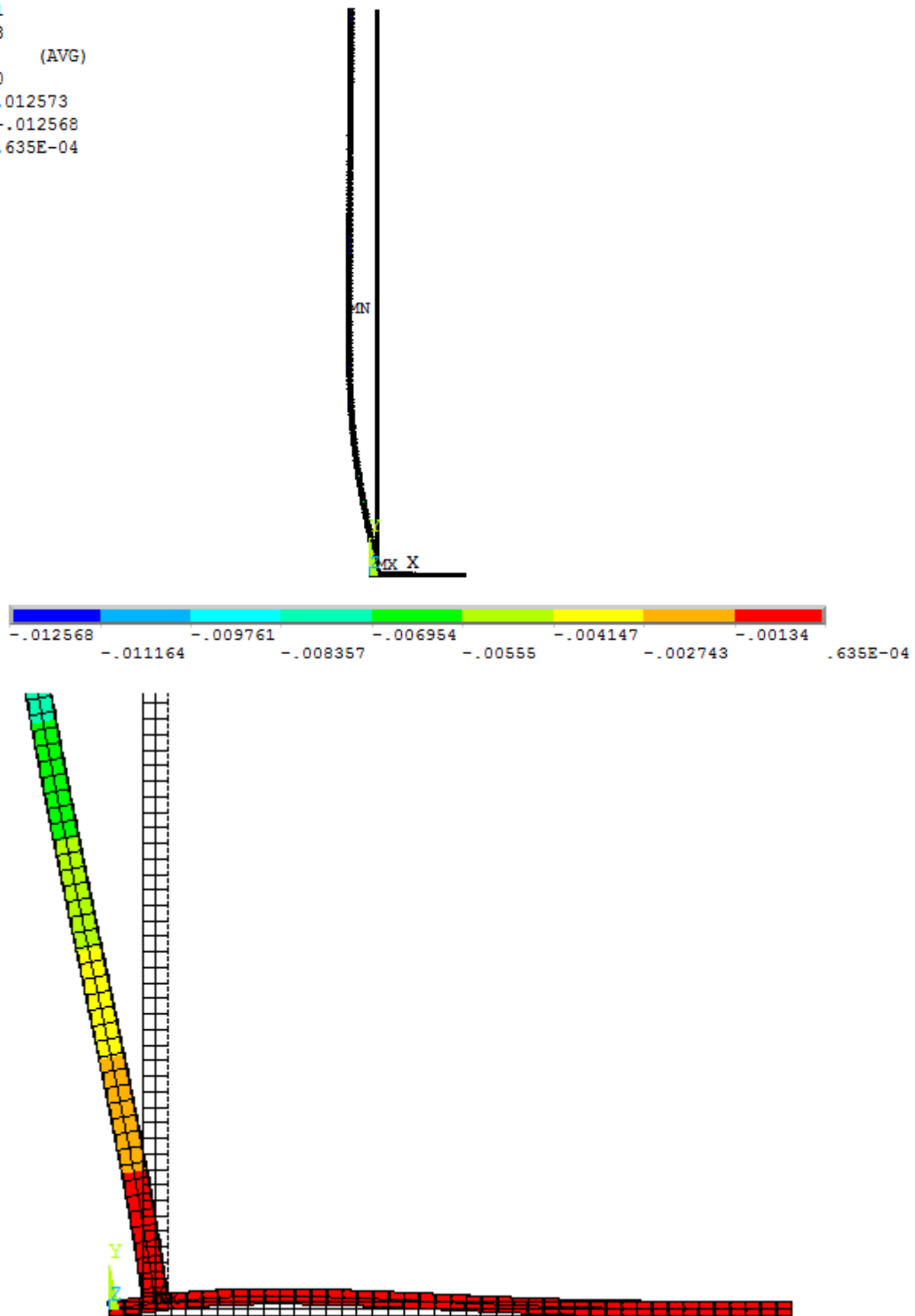


Figura 9-7. Desplazamiento radial.

Para una distancia de la unión igual a la longitud de onda, se observa el desplazamiento radial debido a la solución de membrana del cilindro a presión interna. Para una distancia, s , igual a la longitud de onda,

$$\exp^{\frac{-2*\pi*L_{onda}}{L_{onda}}} \approx 0.00187 \quad (9-38)$$

la solución de flexión decrece hasta 0.0187 % la amplitud experimentada en $s = 0$; es decir, el desplazamiento radial y el giro de la solución de flexión prácticamente han desaparecidos a esa distancia y sólo se observa la solución de membrana.

Esta deformación es similar a la obtenida en la teoría de Kroon, cuyo valor era $y = 0.0127$ m, según la ecuación 4-2.

El desplazamiento máximo de la pared obtenido mediante el modelo de Ansys es 0.0126 m.

A esta solución también se puede llegar aplicando el enfoque simplista (solución de membrana) definido en la ecuación 9-1 para obtener la deformación que sufre la pared del tanque, para una tensión de diseño igual a 183.3 N/mm^2 .

$$\varepsilon = \frac{183.3}{200,000} = 0.0009165 \quad (9-39)$$

La deformación radial que sufre el tanque es similar a la obtenida por los métodos anteriores.

$$\varepsilon * R = 0.0009165 * 15 \text{ m} = 0.0137 \text{ m} \quad (9-40)$$

La rotación en la unión obtenida en Ansys es 0.012 rad, mientras que el análisis analítico obtenía un valor igual a 0.0144 rad.

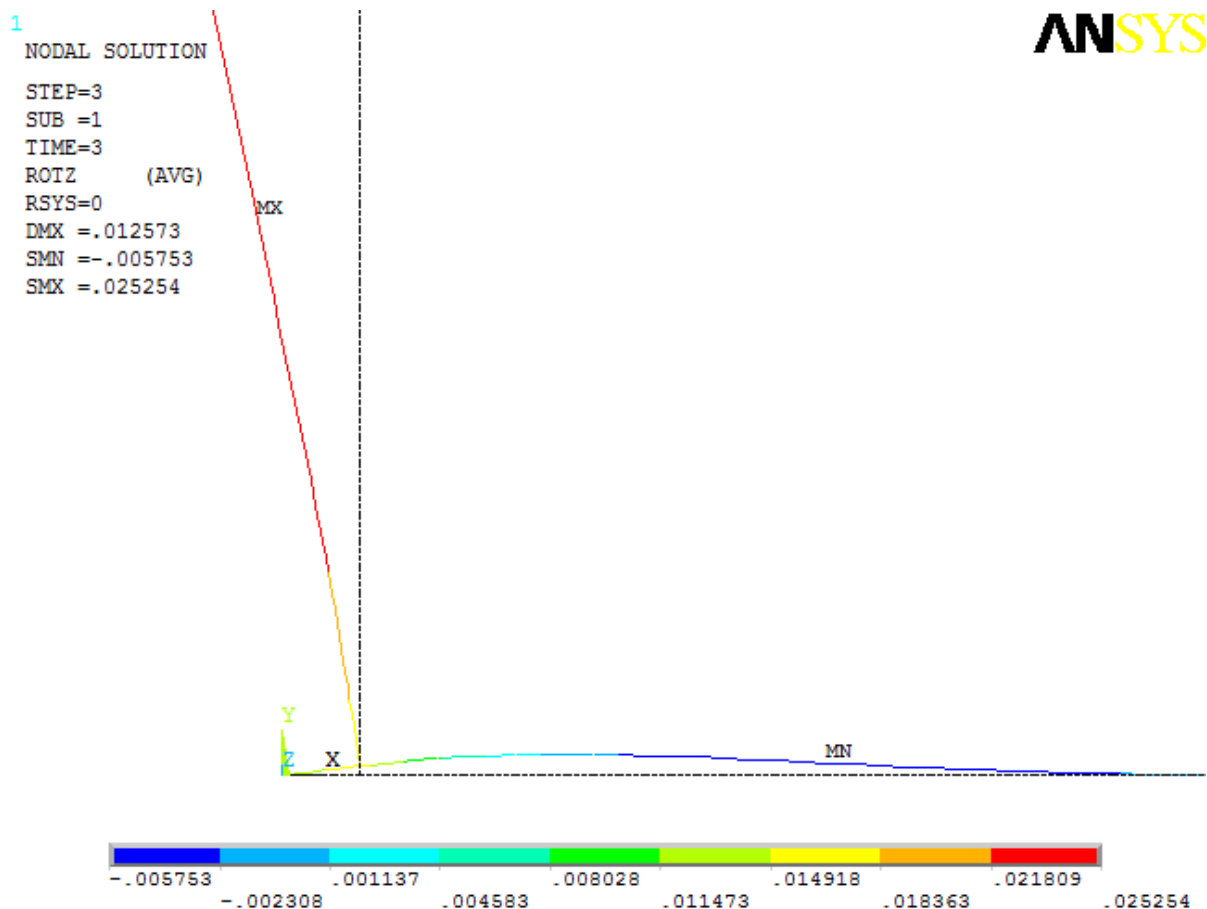


Figura 9-8. Giro alrededor del eje z.

En el extremo derecho del anillo anular se obtiene un giro con un valor prácticamente cero, como el obtenido en la solución analítica.

En cuanto a la fuerza horizontal del fondo del tanque, se obtuvo un valor igual a 38 N/mm en el análisis analítico, mientras que en Ansys se ha obtenido un valor igual a 36.04 N/mm. Esta fuerza axil provoca una tensión igual a 4.50 MPa, mientras que en la teoría de Kroon se obtuvo un valor de:

$$\sigma_N = \frac{Q}{T_b} = \frac{38.01}{8} = 4.75 \text{ MPa} \quad (9-41)$$

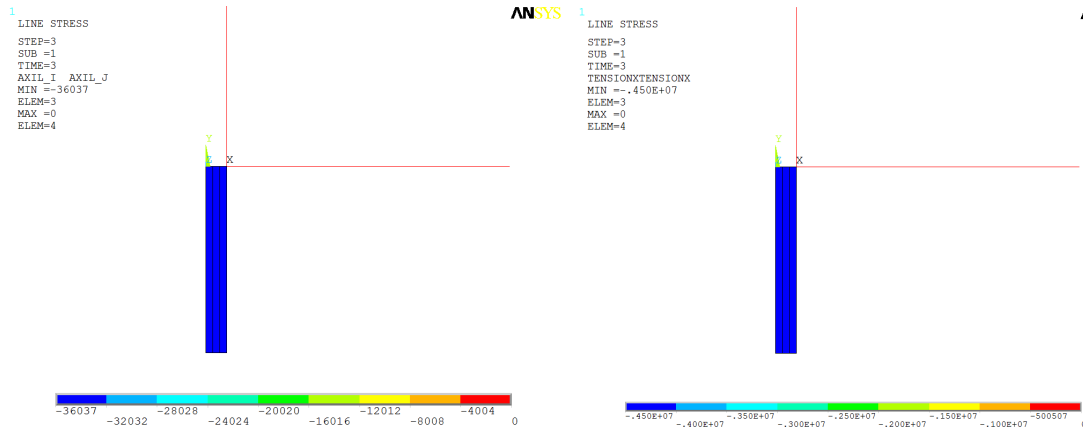


Figura 9-9. Axil y tensión debido a dicho axil.

Por último se compara los resultados obtenidos para el momento alrededor del eje z y la tensión debida a dicho momento. En el modelo numérico se obtiene un valor del momento $M_d = 2950 \text{ mmN/mm}$ y $M_c = 4102 \text{ mmN/mm}$, mientras que la tensión debido al momento resulta 277 MPa.

En el resultado analítico la tensión debido al momento era igual a:

$$\sigma_M = \frac{6 * M_d}{T_b^2} = \frac{6 * 3179.2}{8^2} = 298 \text{ MPa} \quad (9-42)$$

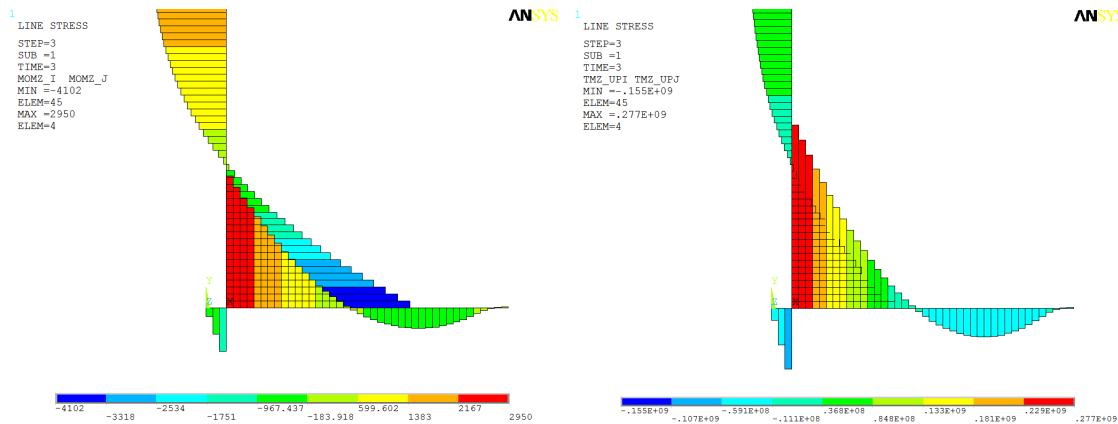


Figura 9-10. Momento alrededor del eje z y tensión debido a dicho momento.

9.17 Conclusiones

Los resultados obtenidos mediante el modelo de elementos finitos son muy similares a los obtenidos mediante la solución analítica. Las pequeñas diferencias entre ambos análisis se deben a que en el modelo numérico no se ha considerado exactamente la misma deformación del anillo como en el análisis analítico, ya que en la teoría de Kroon se considera la cimentación infinitamente rígida, y por tanto, se consigue reducir el giro en el punto B a cero; mientras que en el modelo de Ansys se ha tenido en cuenta una pequeña deformación vertical mediante muelles no lineales. Debido a ello, el giro en el punto B no se consigue reducir a cero, obteniéndose una ligera pendiente, además de tener también una pequeña pendiente en el punto A. Estas ligeras modificaciones en el giro producen ligeras diferencias en las tensiones obtenidas.

Aun teniendo en cuenta estas discrepancias, se obtienen resultados muy similares a los del análisis de Kroon. Estos modelos analíticos son utilizados en la norma API 650 para definir los espesores mínimos que han de cumplirse para estos elementos

CONCLUSIONES GENERALES

Con la realización de este trabajo se han logrado cumplir los objetivos que habían sido impuestos al comienzo del mismo. En primer lugar se ha llegado a desarrollar un procedimiento de diseño general para el dimensionamiento de tanques de acero en base a la norma [1], la cual suele ser la norma más utilizada para este tipo de construcciones a nivel internacional. Además del diseño del tanque, este algoritmo de cálculo permite conocer mejor el comportamiento de este tipo de estructura.

En segundo lugar se ha realizado de forma satisfactoria un programa en Matlab que realiza el algoritmo mencionado anteriormente de forma automática, el cual permite dimensionar tanques de cualquier tamaño en función de opciones de diseño específicas elegidas entre varias posibilidades que describe la norma.

Por último, se ha logrado realizar un modelo de la unión cuerpo-fondo del tanque mediante el programa de elementos finitos Ansys, el cual reproduce mediante un análisis numérico los resultados obtenidos a partir de un análisis analítico. Con la comparación de estos resultados se ha comprobado como las normativas aplicables para el diseño de estas estructuras se basan en modelos numéricos de las distintas partes estructurales de las que se componen, para definir los requisitos mínimos que deben cumplir, reproduciendo el comportamiento en servicio con errores despreciables.

También se ha realizado el análisis de los elementos secundarios de arriostramiento de cubierta mediante el programa Ansys, permitiendo obtener la situación más desfavorable para poder dimensionar dichos elementos de una forma segura.

- **A:**

Anclaje: elementos de acero al carbono, con rosca en el extremo libre ahogados en el concreto o en la cimentación, con el objeto de evitar desplazamientos del tanque en cualquier dirección, y bajo ciertas condiciones contrarrestar el efecto de volteo por sismo y el arrastre o volteo por viento.

Ángulo de coronamiento: perfil estructural soldado en la parte superior del último anillo de los tanques para proporcionarle mayor rigidez a la envolvente.

Anillos de rigidización secundarios: perfiles estructurales soldados a la envolvente que evitan deformaciones en las placas de los anillos del tanque, originadas por la carga de viento.

- **B:**

Boquillas: conexiones instaladas en la envolvente, fondo o techo del tanque; las cuales deben estar en su conexión al tanque soldadas y en su otro extremo bridada o roscado.

- **C:**

Cargas de nieve: sobrecargas en función de la zona de emplazamiento del tanque. Se regirá por el CTE en este proyecto.

Carga de viento: sobrecargas debido a la velocidad del viento en función de la zona de emplazamiento del tanque. Se regirá por el CTE en este proyecto.

Carga muerta: las cargas muertas son cargas de magnitud constante que permanecen fijas en un mismo lugar. Estas son el peso propio de la estructura y otras cargas permanentemente unidas a ellas. Para diseñar una estructura es necesario estimar los pesos o cargas muertas de sus componentes. Estas no se conocen hasta que se hace análisis estructural y se seleccionan los miembros de la estructura.

Carga viva mínima de cubierta: Las cargas vivas que se presentan en el tanque son aquellas que pueden cambiar de lugar y magnitud. Todas las cargas que no son muertas, son vivas. Las cargas que se mueven bajo su propio impulso como por ejemplo: los trabajadores que realizarán inspecciones al tanque, instrumentos instalados en el techo, cargas causadas al construir, cargas de viento, lluvia, sismo, suelos, cambios de temperatura y la carga del líquido que contendrá el tanque, se consideran cargas vivas y se deben de considerar y estudiar cuidadosamente porque pueden ocasionar severos problemas en la operación del tanque.

Clase de la zona: clasificación asignada a un sitio basado en los tipos de suelos presentes y sus propiedades de ingeniería.

Cliente: propietario o agente designado por el propietario, tales como un contratista de ingeniería.

- **D:**

Doble cubierta: está formado por dos cubiertas una superior y otra inferior; separadas por bordes circulares que dividen el espacio interior en una serie de pontones concéntricos. Está diseñado para flotar en contacto con el producto almacenado.

Doble unión soldada a tope: una junta entre dos partes contiguas situadas en el mismo plano que están soldadas por ambos lados.

- **E:**

Espesor corroído: condición de diseño igual al espesor nominal menos el espesor de sobre corrosión especificado.

Espesor de diseño: se refiere al valor obtenido mediante cálculos tomando en consideración las condiciones de servicio del tanque atmosférico, incluyendo la tolerancia por corrosión.

Espesor de sobre corrosión: cualquier espesor adicional especificado por el cliente durante la vida útil del tanque.

Espesor mínimo: se refiere al requerido para las placas del tanque atmosférico o cualquiera de sus partes, antes de agregar el espesor de sobre corrosión.

Espesor nominal: espesor que incluye cualquier espesor de sobre corrosión.

- **G:**

Geotextil: producto elaborado por fibras sintéticas no biodegradables; se caracteriza por su estructura impermeable, resistente a la tensión, al desgarre y al deterioro químico.

- **H:**

Hoja de datos: es el documento en el que se definen las dimensiones, datos de diseño y características generales de un tanque atmosférico.

- **J:**

Junta a tope con soldadura doble: es la unión de dos placas situadas en el mismo plano, en contacto por uno de sus bordes, que se sueldan por ambos lados.

Junta a traslape con soldadura sencilla: unión de dos placas traslapadas en la que el borde de una de ellas se suelda sobre la otra con soldadura de filete.

- **L:**

Lámina: espesor hasta 5 mm inclusive.

Lámina y placa: materiales fabricados mediante el proceso de laminación del acero de forma generalmente rectangular cuya diferencia principal entre ellas se basa en su espesor de acuerdo a lo siguiente.

Líquido almacenado: carga debido al relleno del tanque con el producto hasta el nivel máximo del líquido. El cliente especificará la gravedad específica de diseño del producto.

- **N:**

Nivel de diseño: es la altura o nivel del producto manejado, medida desde el fondo del tanque, considerada para el diseño.

- **P:**

Placas: espesores mayores de 5 mm.

Placa anular del fondo: son las placas de la periferia del fondo sobre las que se suelda el anillo inferior del tanque en todo su perímetro.

Presión de diseño: es la presión considerada para el cálculo de las paredes del tanque y es la suma de la presión interna del gas o vapor dentro del tanque más la columna del líquido almacenado.

Presión de diseño externa (P_e): presión de succión en vacío al que está sometido el tanque, cuyo valor no será menor de 0.25 kPa.

Presión de diseño interna (P_{di}): presión que ejerce la cámara de gases situada entre el nivel máximo del líquido y la cubierta del tanque, cuyo valor no excederá de 18 kPa.

Presión externa de diseño total de cubierta: suma de la presión externa especificada y la carga viva de cubierta o carga de nieve y carga muerta.

Presión externa de diseño total del cuerpo: suma de la presión externa especificada y la presión externa debido al viento según la combinación.

Presión externa especificada: presión especificada por el cliente sin incluir la presión externa debido al viento.

Prueba hidrostática: carga debido al relleno del tanque con agua hasta el nivel de diseño del líquido.

- R:

Registro de hombre: son accesorios instalados en el primer anillo o techo de los tanques atmosféricos; los cuales normalmente van soldados con tapa bridada y sirven para tener acceso al interior del tanque.

- S:

Soldadura a tope: una soldadura colocada en una ranura entre dos partes situadas en el mismo plano y cuyos bordos no quedan en contacto. La ranura puede ser cuadrada, con forma de V (simple o doble), con forma de U (simple o doble) o biselados (simple o doble).

Soldadura de filete: soldadura que tiene sección transversal aproximadamente triangular y que une dos superficies situadas aproximadamente en ángulo recto como las ensambladas en T.

Solera: Material producto del proceso de laminación del acero, de perfil rectangular cuyo ancho máximo es de 152 mm.

- T:

Tamaño de la Soldadura:

- En juntas a tope, es el espesor de las placas a unir.
- En soldadura de filete de lados iguales, es la longitud de cualquiera de los lados del mayor triángulo rectángulo isósceles que pueda ser inscrito, dentro de la sección transversal.
- En soldadura de filete de lados desiguales, es la longitud del lado mayor del triángulo rectángulo que pueda ser inscrito dentro de la sección transversal del filete de soldadura.

Tanque auto-anclado: tanques que utilizan la estabilidad inherente al peso propio del tanque y el producto almacenado para resistir los momentos de vuelco.

Tanque mecánicamente anclado: tanques que tienen pernos de anclaje, correas u otros dispositivos mecánicos para anclar el tanque a la cimentación.

Techo autosoportado tipo domo: techo que se soporta por sí mismo en el último anillo de la envolvente y tiene su superficie curvada.

Techo autosoportado tipo sombrilla: es un techo tipo domo modificado en donde cualquier sección horizontal es un polígono regular con tantos lados como caras tenga la superficie del techo.

Techo cónico autosoportado: techo que se soporta por sí mismo, apoyado en su periferia del último anillo de la envolvente y tiene forma de cono.

Techo cónico soportado: techo en forma de cono, apoyado ya sea en largueros sobre traveses y columnas, o largueros sobre armaduras con o sin columnas.

Techo o membrana flotante: pueden ser externo o interno (membrana flotante), diseñado en tal forma que le permite flotar sobre el líquido almacenado evitando los grandes volúmenes de gases y vapores que existen en los tanques de techo fijo, pueden ser de: perímetro de la cubierta respectivamente, permitiendo flotar al techo en contacto con el producto almacenado.

Temperatura máxima de diseño: temperatura más alta considerada en el diseño que será la temperatura de operación esperada durante la vida en servicio del tanque.

- V:

Válvula de presión-vacío: es el dispositivo de protección instalado en los tanques atmosféricos con techo fijo, diseñado para ventear vapores de hidrocarburos del tanque durante el llenado y admitir aire durante el

vaciado del producto almacenado. El objeto es evitar daños en el tanque por la diferencia de presión positiva o negativa con respecto a la presión atmosférica.

REFERENCIAS

- [1] Carreño Vázquez, G.G & Hernandez Luna, J.F. (2008). *Diseño y cálculo de un tanque de almacenamiento para nafta con diámetro de 70 ft x 30 ft de altura. Bajo la norma API 650*. (Tesis de maestría). Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco, Mexico. D.F.
- [2] Hernández Castillo, S.M. (2007). *Comparación del diseño sísmico de estanques de acero según normas norteamericana, neozelandesa y las recomendaciones chilenas*. (Tesis de maestría). Universidad Católica de la Santísima Concepción, Chile.
- [3] Hetényi, M. (1979). *Beams on elastic foundation*. Theory with applications in the fields of civil and mechanical engineering. The University of Michigan Press.
- [4] Jiménez Pazmiño, G.E. (2009). *Diseño y construcción de un tanque para almacenar 2000 toneladas de aceite de palma basado en la norma API 650-2007*. (Tesis de maestría). Escuela Superior Politécnica del Litoral, Ecuador.
- [5] Long, B. & Garner, B. (2003). *Guide to storage tanks and equipment*. Professional engineering publishing, UK.
- [6] Norma API-650. (2007). *Welded Steel Tanks for Oil Storage*. American Petroleum Institute.
- [7] Norma En 1993-4-2. (2007). *Eurocode 3: Desing of steel structures - Part 4-2: Tanks*. The European Union.
- [8] Penalba Sánchez, D. (2010). *Análisis sismorresistente de depósitos metálicos*. (Tesis de maestría). Universidad Carlos III, Madrid.
- [9] Real Decreto 997/2002, de 27 de septiembre. NCSE-02.
- [10] Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo. CTE.
- [11] Real Decreto 751/2011, de 27 de mayo. EAE.
- [12] Sanchez, S.H. & Vargas, O.S. (2000). *Análisis sísmico de tanques cilíndricos de almacenamiento*. (Tesis de maestría). Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco, Mexico. D.F.