

**CAPÍTULO IV:**  
**DISEÑO DE UN TANQUE DE**  
**ALMACENAMIENTO DE**  
**ALUMINIO: CÁLCULOS BASADOS**  
**EN LA NORMA ASME B96.1-1999**

## **4 Diseño de un tanque de almacenamiento de aluminio: Cálculos basados en la norma ASME B96.1-1999**

### **Índice**

4.1	Objeto.....	29
4.2	Cálculos basados en la tensión máxima admisible.....	29
4.2.1	Normativas de aplicación.....	29
4.2.2	Bases de cálculo.....	30
4.2.3	Consideraciones de diseño.....	31
4.2.4	Diseño de la cubierta.....	34
4.2.5	Diseño de la envolvente.....	36
4.2.6	Diseño de un anillo de refuerzo.....	38
4.3	Cálculos basados en la norma ASME B96.1-1999.....	41
4.3.1	Generalidades.....	41
4.3.2	Datos generales del proyecto.....	43
4.3.3	Consideraciones de diseño.....	43
4.3.4	Clasificación del tanque de almacenamiento.....	47
4.3.5	Diseño de la envolvente.....	50
4.3.6	Diseño de la cubierta.....	53
4.3.7	Diseño de un anillo de refuerzo.....	55
4.4	Conclusiones.....	57

## **4.1 Objeto**

El objeto de este capítulo es el diseño de un tanque de almacenamiento de aluminio según la norma ASME B96.1. El diseño se realizará mediante dos métodos descritos a continuación:

- Cálculos basados en la tensión máxima admisible del material
- Cálculos según los procedimientos de la norma ASME B96.1

Las dimensiones y los datos constructivos del depósito analizado, así como las condiciones de operación en las que está previsto que trabaje, se detallan en el CAPÍTULO III del presente proyecto.

Se dimensionarán cada una de las virolas que componen el tanque, la cubierta y el anillo de refuerzo necesario en la unión de ambos cuerpos.

## **4.2 Cálculos basados en la tensión máxima admisible**

En esta parte del capítulo se procede al diseño del tanque de almacenamiento a partir de procedimientos analíticos, concretamente la Teoría de la Membrana, teniendo en cuenta que en ningún punto de la estructura se sobrepase la máxima tensión admisible del material dada por la norma americana.

### **4.2.1 Normativas de aplicación**

Además del código de diseño ASME B96.1, cuyo estándar será aplicado para determinar la tensión máxima admisible para el material, se tendrán en cuenta:

- *Código Técnico de la Edificación. Documento Básico de Seguridad Estructural. Acciones en la Edificación CTE DB-SE AE.*

Se aplicará para la determinación de las acciones sobre el depósito.

- *API Estándar 620*

Se utilizará como guía para el diseño del anillo de refuerzo en la unión cubierta- cuerpo cilíndrico.

#### **4.2.2 Bases de cálculo**

Se entiende por lámina a aquél elemento estructural tridimensional de directriz curva donde el espesor es mucho menor que el resto de las dimensiones.

Las membranas son estructuras laminares en las que, ante la aplicación de un determinado estado de cargas, aparecen únicamente esfuerzos contenidos en su superficie media.

La Teoría de la Membrana se emplea para el análisis y diseño de membranas. Es por esto que, para conseguir el llamado estado de membranas, las cargas deben presentarse distribuidas y con variaciones suaves. Además las condiciones de contorno del problema se obligan a ser compatibles con este estado.

De esta forma se consigue tener un problema isostático interno fácilmente resoluble usando únicamente ecuaciones de equilibrio.

En este tipo de problemas se trabaja con las siguientes coordenadas:

- **Coordenadas esféricas**
  - $\varphi$ : coordenada de la dirección meridional
  - $\theta$ : coordenada de la dirección de los paralelos

- Coordenadas cilíndricas
  - $s$ : coordenada en la dirección tangencial
  - $\theta$ : coordenada de la dirección circunferencial

En la mayoría de las estructuras reales estas condiciones no se cumplen en la totalidad. Aparecen zonas donde la flexión es importante, pudiéndose encontrar flexión generalizada o bien puntos de flexión localizada. Es por ello que en puntos especiales, tales como cambios de sección, cargas concentradas, zonas de apoyo o vínculos, se recomienda el análisis mediante la Teoría de Láminas a Flexión.

Sin embargo, en ciertas situaciones, tales como depósitos, alejados de las zonas de flexión, los resultados de la Teoría de la Membrana sí proporcionan resultados aceptables y cercanos a la realidad.

Por consiguiente, se utilizará esta teoría para el diseño de la envolvente del depósito y de la cubierta, obteniéndose los espesores mínimos necesarios para que cada parte analizada sea resistente.

No es objeto de este capítulo el análisis de esta estructura frente a la estabilidad. Se parte de la máxima tensión admisible en la estructura según el estándar ASME B96.1 para diseñar las virolas y la cubierta de manera que en ningún punto de ellas se sobrepase dicho valor.

### 4.2.3 Consideraciones de diseño

En este apartado se detallan las acciones consideradas para el cálculo del depósito mediante la aplicación de la Teoría de la Membrana, así como otras consideraciones aplicables.

#### 4.2.3.1 Acciones

Para el diseño del tanque de almacenamiento mediante la teoría anteriormente descrita se consideran las siguientes acciones:

##### Peso Propio

El peso del tanque y sus componentes, incluyendo el sobreespesor de corrosión considerado.

La aleación de aluminio EN-AW 6061 tiene una densidad de  $2.700 \text{ kg/m}^3$ .

##### Presión Interna de Diseño

Siguiendo los datos de operación del depósito, se considera una presión interna de diseño de  $6 \text{ kPa}$ .

##### Sobrecarga en el techo

Para el cálculo de la sobrecarga estimada sobre el techo del tanque, se aplica el documento de referencia nacional CTE DB SE-AE. El valor de dicha sobrecarga se establece según la categoría de uso de la cubierta:

- Categoría de zona de carga H: cubiertas no accesibles excepto para su mantenimiento normal y reparación
- Valor de las acciones comprendido entre  $0$  y  $1 \text{ kN/m}^2$ . Se recomienda un valor de  $0,4 \text{ kN/m}^2$

Para incluir el peso de los elementos no estructurales y situarse del lado de la seguridad, se toma un valor característico de la sobrecarga de uso de  $1 \text{ kN/m}^2$ .

### Nieve

Para el cálculo de la carga de nieve estimada sobre el techo del tanque, se aplica el documento de referencia nacional CTE DB SE-A

Será una carga de nieve de  $0,2 \text{ kN/m}^2$  para la provincia de Castellón. Esta carga uniformemente distribuida está aplicada sobre la cubierta del depósito en proyección horizontal.

### Viento

Puesto que la carga de viento en este tipo de estructuras no presenta una distribución axisimétrica, se obvia su influencia en el depósito. Al tratarse de un diseño estimado del depósito no se considera carga de viento en este capítulo.

### Presión Hidrostática

Carga debida al llenado del depósito con el líquido que almacenará en condiciones normales de operación, hasta el nivel de diseño de llenado. El fluido almacenado es aceite, con una densidad de  $920 \text{ kg/m}^3$ .

#### *4.2.3.2 Otras consideraciones de diseño*

No se tiene en cuenta el diseño sísmico en este proyecto puesto que el tanque de almacenamiento se ubica en Castellón, donde el orden de magnitud de las cargas sísmicas es bajo. Se trata de una zona de baja intensidad sísmica y no se contempla este tipo de carga. En realidad debería de efectuarse el análisis aunque dichas cargas no tengan un valor importante, sin embargo al tratarse de un proyecto académico no se contempla este tipo de diseño.

Se obvian las cargas derivadas de posibles barandillas, escaleras, plataformas, etc. que pudieran presentarse en la estructura final.

Debe considerarse un sobreespesor de corrosión para todos los componentes del tanque, incluyendo las virolas, el techo y otros elementos estructurales, teniendo en cuenta los efectos del líquido almacenado, del gas o el vapor que exista sobre dicho líquido y de las acciones ambientales. Se toma un sobreespesor de 1 mm

#### 4.2.4 Diseño de la cubierta

Para el diseño del depósito se comienza por la parte superior. Se trata de una cubierta laminar esférica. Esta cubierta es del tipo autoportante, estando sustentada únicamente por el borde. Éste se apoya sobre el cuerpo cilíndrico del tanque.

En la siguiente figura se representan los datos geométricos, expresados en mm, necesarios para el diseño:

$$L = 8,75m$$

$$R = 21m$$

$$\theta_1 = \arcsen\left(\frac{L}{R}\right) = 24,6^\circ$$

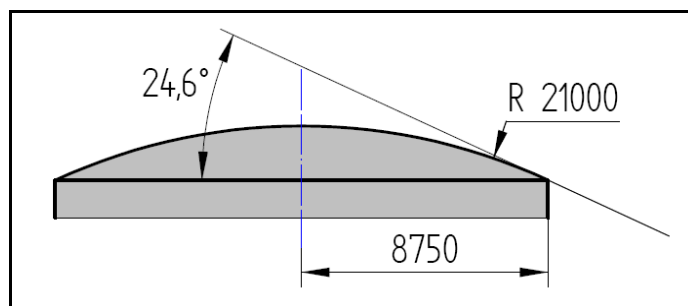


Fig 4.1: Datos geométricos de la cubierta

Por consiguiente,  $\theta \in [0, 24'6^\circ]$ .



Para el diseño de la cubierta se descompone el problema original en problemas más simples. Posteriormente, aplicando el Principio de Superposición a la solución de los problemas simples, obtendremos la solución del problema de partida.

Para este estudio, las cargas aplicadas sobre la cubierta son

- *Peso propio*
- *Sobrecarga*
- *Carga de nieve*
- *Presión interna*

Descomponemos en los siguientes problemas básicos según la tipología de las cargas:

- I. Peso propio de la cubierta
- II. Nieve y sobrecarga
- III. Presión interna

En el Anexo 1 se detallan los cálculos realizados para el diseño de la cubierta.

### Resultados

Conocidas las máximas tensiones que aparecen en la cubierta debido a las cargas anteriormente descritas y la máxima tensión admisible de la aleación de aluminio 6061-T6 (55,16 MPa), la determinación del espesor es trivial.

Sin embargo, el depósito está constituido por distintas chapas soldadas. Es por ello que la tensión admisible del material se minora con un coeficiente  $e$  llamado factor de eficiencia de las uniones. Para este apartado se ha considerado un factor  $e = 0,85$ .

Así, para cada una de las tensiones, se calcula el espesor mínimo requerido:

$$\sigma_{\varphi} \leq \sigma_{\max adm} \cdot e \Rightarrow h_i = 2,06 \cdot 10^{-3} m$$

$$\sigma_{\theta} \leq \sigma_{\max adm} \cdot e \Rightarrow h_i = 2,16 \cdot 10^{-3} m$$

Por consiguiente, para satisfacer el criterio de resistencia de la estructura se requiere un espesor

$$h_i = 3 \text{ mm}$$

Se toma este valor puesto que las chapas convencionales se comercializan en espesores que varían en 1 mm.

#### 4.2.5 Diseño de la envolvente

La envolvente del depósito objeto de diseño está constituida por 10 virolas de espesor constante. La altura de cada virola es de 2 metros, siendo la altura total de la parte cilíndrica del depósito 20 metros.

Así, puesto que el espesor no es constante en la totalidad de la envolvente, habrá que analizar cada virola independientemente para determinar el espesor necesario de cada una de las partes del depósito.

Como punto de partida, es necesario calcular las reacciones que la cubierta ejerce sobre el cuerpo cilíndrico. Por tanto, particularizando los esfuerzos calculados con anterioridad para el ángulo  $\theta = 24,6^\circ$  se obtienen dichas reacciones.

Para resistir la componente horizontal debida al esfuerzo circunferencial en el borde habrá que diseñar un anillo de refuerzo para esta zona. Sin embargo, la componente vertical en la unión cubierta-envolvente se transmite al cuerpo del depósito. Llamando  $Y_{cubierta}$  a esta componente, se tiene:

$$Y_{cubierta} = N_{\theta} \cdot \operatorname{sen}\theta \Big|_{\theta=24,6^{\circ}} = 20,617 \text{ kN} / \text{m}$$

Hallada la reacción transmitida en la unión, se procede al análisis de la envolvente. En este caso las cargas que intervienen son:

- *Peso propio*
- *Presión hidrostática debida al líquido*
- *Presión interna*
- *Cargas de borde*

La resolución de cada una de las virolas requiere la descomposición del problema original en distintos problemas simples de solución conocida. Por ello, al igual que ocurría en la cubierta, descomponemos el problema en problemas sencillos que se analizarán y, posteriormente, aplicando el Principio de Superposición, obtendremos la solución del problema de origen.

Se analizarán cada una de las virolas de forma independiente comenzando el diseño por la virola superior del depósito. Los cálculos necesarios para el diseño de las virolas se detallan en el Anexo 1 del presente documento.

### Resultados

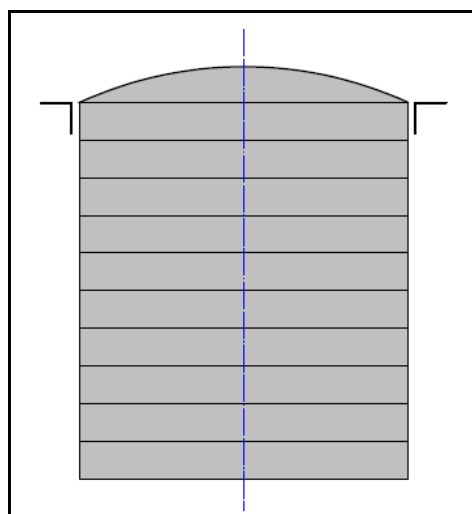
Una vez analizadas cada una de las virolas que constituyen el depósito, en la siguiente tabla se resumen los espesores mínimos recomendados (incluyendo un sobreespesor de corrosión de 1 mm) para que el tanque cumpla con el criterio de resistencia del material:

<i>Virola</i>	<i>Espesor (mm)</i>
1	6
2	9
3	12
4	16
5	19
6	22
7	26
8	29
9	32
10	36

*Tabla 4.1: Espesores de las virolas*

#### **4.2.6 Diseño de un anillo de refuerzo**

Para el diseño del anillo de refuerzo en la unión se sigue el procedimiento descrito en el apartado 5.12.4 del estándar API-620.



*Fig 4.2: Croquis del depósito con anillo de refuerzo en la unión*

Será necesario calcular en primer lugar la fuerza horizontal desequilibrada por unidad de longitud,  $H$ , cuyo signo será positivo si provoca dilataciones circunferenciales, a partir de los esfuerzos de membrana meridionales  $N_\theta$  de todas las superficies coincidentes. Con  $H$  y los esfuerzos circunferenciales  $N_\phi$  de cada superficie se determina la fuerza en el anillo de refuerzo por medio de la siguiente expresión:

$$Q = -H \cdot a + \sum_{i=1}^2 N_{\phi_i} \cdot w_i$$

donde

$a$ : distancia desde el punto de unión al eje de revolución medida según la perpendicular a éste (m)

$w$ : distancia que se ve afectada por las deformaciones circunferenciales de la unión (m)

La distancia afectada por las deformaciones circunferenciales se calcula según:

$$w_i = 0,6\sqrt{R(t_d - t_c)}$$

donde

$R$ : radio de la superficie (m)

$t_d$ : espesor de diseño la superficie (m)

$t_c$ : sobreespesor de corrosión (m)

Finalmente, el área a compresión necesaria para resistir los esfuerzos que aparecen en la unión se determina a partir de la siguiente ecuación:

$$A_c = Q/15000$$

donde

$A_c$  : área a compresión necesaria ( $\text{in}^2$ )

$Q$  : fuerza en el anillo (lb)

Por consiguiente, el área necesaria del angular que se ubicará en la unión de los dos cuerpos vendrá dado por:

$$A_{\text{angular}} = A_c - A_{\text{compresión}} = A_c - \sum_{i=1}^2 w_i \cdot h_i$$

donde

$h_i$  : espesor de cada una de las superficies

Los datos necesarios para el cálculo son los siguientes:

$H$ (kN)	45,002
$N_{\varphi} _{\text{cubierta}}$ (kN)	49,526
$N_{\varphi} _{\text{virola1}}$ (kN)	52,5
$w_{\text{cubierta}}$ (m)	0,123
$w_{\text{virola1}}$ (m)	0,125

Tabla 4.2: Datos necesarios para el diseño del anillo de refuerzo

Así, se obtienen los siguientes valores:

$Q$ (lb)	87.790
$A_c$ ( $\text{in}^2$ )	5,71

Tabla 4.3.: Fuerza en el anillo y área a compresión necesaria

Y, por consiguiente, el área necesaria para el perfil angular es de  $29,94 \text{ cm}^2$ . Se toma el siguiente perfil

$L130x130x12$

Con ello, se cumplen con las indicaciones dadas por el estándar API 620 en cuanto a sus dimensiones, siendo el área de la sección  $30,00 \text{ cm}^2$ .

### **4.3 Cálculos basados en la norma ASME B96.1-1999**

El objeto de esta parte del capítulo es realizar el diseño de un depósito de acero siguiendo las indicaciones del código de diseño ASME B96.1-1999. Se centrará en la determinación de los espesores necesarios tanto para la cubierta como para cada una de las virolas que conforman el cuerpo del depósito y del anillo de refuerzo de la unión.

Las dimensiones y los datos constructivos del depósito analizado, así como las condiciones de operación en las que está previsto que trabaje, se detallan en el CAPÍTULO III del presente proyecto.

#### **4.3.1 Generalidades**

El estándar ASME B96.1 ha sido creado por la Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos, basándose en los conocimientos y experiencias de fabricantes de tanques de aluminio de distintas capacidades para almacenamiento de líquidos.

Este estándar está destinado a ser una especificación del comprador para facilitar la fabricación de los tanques de almacenamiento en la industria. Las reglas dadas son requisitos mínimos o recomendaciones, y no debe interpretarse como una imposición o limitación de los métodos de diseño y construcción de tanques.

Esta norma establece los requisitos mínimos de materiales, diseño, fabricación, montaje y pruebas para tanques de almacenamientos soldados de aleaciones de aluminio, verticales, cilíndricos, sobre el suelo, abiertos o cerrados, de diversos tamaños y capacidades y para presiones internas aproximadamente atmosféricas, aunque se permiten presiones más altas si se cumplen otros requisitos adicionales. Sólo es aplicable a depósitos cuyo fondo está totalmente apoyado, y para servicios a temperatura ambiente.

El objetivo de este estándar es proporcionar a la industria tanques suficientemente seguros y económicamente aceptables para el almacenamiento de productos líquidos. No establece unas dimensiones permitidas fijas, sino que permite seleccionar el tamaño del tanque que más se ajusta a cada necesidad.

#### *4.3.1.1 Normativa de aplicación*

Además del código de diseño ASME B96.1, en la presente memoria se utilizan los siguientes documentos de aplicación nacional:

- *Código Técnico de la Edificación. Documento Básico de Seguridad Estructural. Acciones en la Edificación CTE DB-SE AE.*

Se aplicará para la determinación de las acciones sobre el depósito.

- *EN 1991: Acciones en Estructuras*

Se usará, junto con el CTE DB-SE AE para determinar las acciones sobre la estructura.



### **4.3.2 Datos Generales del Proyecto**

#### *4.3.2.1 Datos de diseño*

Los datos de diseño y operación del depósito, así como sus dimensiones, los materiales utilizados y los datos constructivos, se detallan en la CAPÍTULO III: Descripción del Depósito, del presente proyecto.

Se establecen los siguientes datos como factores de diseño:

- *Temperatura de diseño del metal, según la temperatura ambiente.*
- *Máxima temperatura de diseño.*
- *Densidad específica del producto almacenado.*
- *Espesor de corrosión.*

#### *4.3.2.2 Tipo de almacenamiento*

Se trata de un tanque atmosférico situado en el exterior y sobre el nivel del suelo, manteniendo accesible toda su superficie lateral exterior, para almacenamiento de aceite.

#### *4.3.2.3 Materiales*

El material seleccionado para la construcción de la envolvente y de l techo es la aleación de aluminio EN-AW 6061-T6/T64, según el espesor de la chapa.

### **4.3.3 Consideraciones de diseño**

En este apartado se exponen las consideraciones a tener en cuenta para el diseño del tanque.

#### 4.3.3.1 Acciones

##### Carga muerta

El peso del tanque y sus componentes, incluyendo el sobreespesor de corrosión considerado.

La aleación de aluminio EN-AW 6061 tiene una densidad de  $2.700 \text{ kg/m}^3$ .

##### Presión Interna de Diseño

Siguiendo los datos de operación del depósito, se considera una presión interna de diseño de  $6 \text{ kPa}$ .

La máxima presión permitida por este estándar es de  $1 \text{ psig}$  ( $6,895 \text{ kPa}$ ).

##### Carga viva

Para el diseño de la cubierta del depósito se tiene en cuenta la carga muerta, debido al peso de la estructura, y además una carga viva de valor  $25 \text{ lb/ft}^2 \approx 1,2 \text{ kPa}$ , según indica esta norma ASME B96.1.

El valor de esta carga podría estimarse como la suma de la acción de una sobrecarga de uso junto con la carga de nieve para este tanque de almacenamiento. Así, aplicando el documento de referencia nacional CTE CB-SE-AE, la sobrecarga de uso se estima en  $1 \text{ kPa}$  y la carga de nieve en  $0,2 \text{ kPa}$ .

Aunque la norma americana no especifique la causa de esta carga viva, si se considera que es debido a la acción conjunta de estas cargas, se comprueba que la carga total, puesto que son de la misma naturaleza, es de 1,2 kPa. Dicho valor coincide con el proporcionado por la norma. Se tomará el valor de  $25lb/ft^2$  para el diseño de la cubierta.

### Viento

La carga de viento es considerada en la norma ASME B96.1 únicamente para el diseño de vigas contraviento que doten a la estructura una mayor resistencia ante esta acción. Así, sólo se tendrá en cuenta este tipo de carga para el cuerpo cilíndrico y no para la cubierta.

El presente estándar estima la acción debida al viento en  $18lb/ft^2 \approx 862Pa$ . Sin embargo, esta norma está desarrollada en los Estados Unidos. Para realizar una mejor estimación recurrimos al Eurocódigo 1 EN-1991-2-4.

En el apartado 10.8 se detalla el procedimiento para el cálculo de la presión ejercida sobre cilindros circulares debido al viento. La presión se determina a partir de la siguiente expresión:

$$q_e = q_{ref} \cdot c_e(z_e) \cdot c_{p_e}$$

donde

$q_{ref}$  : presión media debida a la velocidad de referencia del viento

$c_e(z)$  : coeficiente de exposición que tiene en cuenta el terreno y la altura sobre el nivel del suelo

$z_e$  : altura de referencia

$c_{p_e}$  : coeficiente de presión externa

Los términos anteriores pueden determinarse a partir del documento EN-1999-2-4.

Puesto que la distribución de la presión ejercida sobre el cuerpo cilíndrico no presenta una distribución uniforme, se va a referir el cálculo a la presión máxima ya que éste será el caso más desfavorable.

La velocidad de referencia del viento para la zona de Castellón es de  $24m/s$  y la densidad del aire se estima en  $1,25kg/m^3$ . Conocidos estos valores, y aplicando la expresión que se detalla en el apartado 7.1, se calcula la presión del viento para su velocidad de referencia

$$q_{ref} = \frac{\rho_{aire}}{2} \cdot v_{ref}^2 = 360Pa$$

El coeficiente de exposición para el depósito se determina a partir del tipo de terreno según el apartado 8.5 de este código. El terreno es de tipo III, puesto que el tanque de almacenamiento se sitúa en un área industrial. El valor del coeficiente se calcula con las gráficas de este apartado, teniendo en cuenta el tipo de terreno y la altura. Así,

$$c_e(z_e) \approx 1,65$$

Finalmente, cómo no existen indicaciones relativas al coeficiente de presión externa, se toma como valor unidad siguiendo las indicaciones del apartado 10.

$$c_{pe} = 1$$

Conocidos todos los valores, la presión máxima ejercida por el viento en la localidad de Sevilla siguiendo las indicaciones de la norma EN-1991 es:

$$q_e = 594kPa$$

Se comprueba que la presión que estima la norma ASME B96.1 es mayor. Por lo tanto, se considerará la carga de viento dada por esta norma ya que así el diseño quedará del lado de la seguridad. Además, así se tendrá en cuenta únicamente este estándar para el diseño.

#### Líquido almacenado

Carga debida al llenado del depósito con el líquido que almacenará en condiciones normales de operación, hasta el nivel de diseño de llenado. El fluido almacenado es aceite, con una densidad de  $920 \text{ kg/m}^3$ .

#### 4.3.3.2 Otras consideraciones de diseño

No se tendrá en cuenta el diseño sísmico por los motivos expuestos en el apartado 4.2.3.2 del presente documento.

Se obvian las cargas derivadas de posibles barandillas, escaleras, plataformas, etc. que pudieran presentarse en la estructura final.

Debe considerarse un sobreespesor de corrosión para todos los componentes del tanque, incluyendo las virolas, el techo y otros elementos estructurales, teniendo en cuenta los efectos del líquido almacenado, del gas o el vapor que exista sobre dicho líquido y de las acciones ambientales. Se toma un sobreespesor de 1 mm

#### **4.3.4 Clasificación del tanque de almacenamiento**

Según el apartado 1.2 de la norma, se establece una clasificación de los depósitos en función de la presión interna a la que se encuentren sometidos. Se distinguen tres tipos de clases:

- *Clase 1:* Tanques abiertos teniendo cualquier diámetro menor de 100 fts (30,48 m) y con una presión interna de diseño menor de 0,5 oz/in<sup>2</sup> (215,46 kPa).
- *Clase 2:* Tanques de diámetro menor de 100 fts (30,48 m) con una presión interna de diseño mayor de 0,5 oz/in<sup>2</sup> y tanques de más de 100 fts (30,48 m) de diámetro con cualquier presión interna de diseño.
- *Clase 3:* Todo tanque donde la presión interna de diseño produce una fuerza de vuelco mayor que el peso total de las chapas que componen el depósito.

Puesto que el depósito objeto de diseño presenta un diámetro de 17,5 m (57,41 ft) y la presión interna de diseño es de 6 kPa (13,946 oz/in<sup>2</sup>), la clase del tanque podrá ser de tipo 2 o 3.

Por lo tanto, se calcula el efecto de la presión en el tanque para determinar si se produce una fuerza de vuelco mayor que el peso del conjunto.

$$¿P_{int} \cdot A < W ?$$

Para la comprobación se necesita el peso del depósito que aún no ha sido calculado. Se sobredimensiona suponiendo un espesor constante del cuerpo cilíndrico de 40 mm y un espesor de la cubierta del depósito de 20 mm. Así la carga debida al peso propio es la siguiente:

$$W = 1,3 \cdot 10^6 N$$

El área de acción y la presión interna de diseño son:

$$A = \pi \cdot R^2 = 240,528m^2$$

$$P_{\text{int}} = 6 \cdot 10^3 Pa$$

Por consiguiente, se llega a:

$$\left. \begin{array}{l} P_{\text{int}} \cdot A = 1,44 \cdot 10^6 N \\ W = 1,3 \cdot 10^6 N \end{array} \right\} \Rightarrow P_{\text{int}} \cdot A > W$$

Se ha comprobado que el tanque de almacenamiento descrito en el capítulo anterior es de *Clase 3* ya que la fuerza de vuelco provocada por la presión interna de diseño es mayor que el peso de dicho tanque.

Las especificaciones para esta clase de depósitos se describen en el apartado 3.8. Para el diseño de la envolvente del tanque deberá utilizarse una altura modificada dada por la siguiente expresión:

$$H' = H + H_p$$

donde

$H'$  : altura modificada del depósito

$H$  : altura de diseño del depósito

$H_p$  : altura equivalente

La altura equivalente se determina a través de la siguiente ecuación:

$$H_p = \frac{P_g}{6,93 \cdot G}$$

donde

$P_g$  : presión interna de diseño (oz/ in<sup>2</sup>)

$G$  : densidad específica del fluido

Por tanto, la altura modificada es:

$$H = 20,667m = 67,804ft$$

#### **4.3.5 Diseño de la envolvente**

El diseño de la envolvente se detalla en el apartado 3.3 de la ASME B96.1.

##### 4.3.5.1 Condiciones generales

El espesor de las láminas deberá ser mayor que el espesor de diseño, incluyendo el sobreespesor de corrosión, y mayor que el espesor de prueba hidráulica.

El ancho mínimo de las virolas debe ser de 2 m y ninguna virola puede tener un espesor mayor que la virola inferior.

La tensión calculada en cada virola no puede superar la tensión permitida por el material del tanque.

##### 4.3.5.2 Tensiones Admisibles

La tensión máxima permitida de diseño se muestra en la tabla 4 del estándar. Para la aleación EN-AW 6061-T6/T64 se establece una tensión máxima de  $8.000\text{ psi} = 55,16\text{ MPa}$  para un rango de temperaturas desde 0 °C a 100 °C aproximadamente. En el Apéndice C de la norma se detallan los procedimientos llevados a cabo para la determinación de las tensiones máximas permitidas de cada aleación de aluminio.



#### 4.3.5.3 Cálculo de los espesores

El espesor mínimo de las virolas debe ser mayor que el obtenido por las siguientes fórmulas:

- *Espesor de diseño:*  $t_d = \frac{2,60 \cdot D \cdot H \cdot G}{f \cdot e} + CA$
- *Espesor en prueba hidráulica:*  $t_i = \frac{2,60 \cdot D \cdot H}{f \cdot e}$

donde

$D$  : diámetro nominal del tanque (ft)

$H$  : altura de diseño del tanque (ft)

$G$  : densidad específica del fluido

$CA$  : espesor de corrosión (in)

$e$  : factor de eficiencia de las uniones.

Se estima un valor de 0,85 para el factor de eficiencia de las uniones según la Sección 6 de la norma.

Los cálculos de estos espesores para el diseño del depósito analizado se detallan en el Anexo 2 del presente documento.

Se diseñan cada una de las virolas para los siguientes casos, donde se detalla el fluido a considerar según esta norma:

- *Agua a temperatura ambiente con un peso específico unitario*
- *Fluido a la temperatura más baja de servicio esperada*
- *Fluido a la máxima temperatura de diseño*

La temperatura mínima de servicio esperada es de 0 °C (32 F) y la máxima temperatura de diseño es 60 °C (140 F).

Los resultados se resumen en la siguiente tabla, donde el espesor requerido,  $t$ , que incluye el sobreespesor de corrosión, es el máximo entre el espesor de diseño,  $t_d$ , el espesor de prueba hidráulica,  $t_t$ , y el espesor mínimo exigido por la norma,  $t_{\min}$ , redondeados a mm.

Puesto que la tensión máxima admisible para el rango de temperaturas estudiado no presenta variación y dado que el peso específico del agua es mayor que el del aceite que contendrá el tanque de almacenamiento, el caso más desfavorable será el espesor resultante del diseño para la prueba hidráulica.

El espesor mínimo para este tanque con un diámetro de 17,5 m (57,41 ft) se establece en el apartado 3.3.3 siendo  $t_{\min} = 1/4in \approx 6mm$

Las virolas se ordenan en sentido descendente:

<i>Virola</i>	<i>Espesor (mm)</i>
1	7
2	9
3	12
4	16
5	20
6	24
7	27
8	31
9	35
10	39

Tabla 4.1 : Espesores de las virolas

### 4.3.6 Diseño de la cubierta

El diseño del techo se detalla en el apartado 3.5 de ASME B96.1. Se definen cuatro tipos básicos de techos, aunque estas definiciones no limitan los tipos de techos permitidos:

- *Techo cónico soportado*
- *Techo cónico autosoportado*
- *Techo domo autosoportado*
- *Techo paraguas autosoportado*

El depósito bajo estudio estará provisto de un techo domo autosoportado, es decir, una cubierta aproximadamente semiesférica soportada únicamente en la periferia, sin estructura de barras que colabore en la resistencia de las acciones. La falta de dicha estructura supondrá un mayor espesor de la chapa, que será el único elemento resistente.

Las chapas del techo deben tener un espesor nominal mínimo  $t_{\min} = 3/16in \approx 5mm$  aunque los techos autosoportados pueden necesitar espesores mayores. Además del espesor requerido por cálculo o por espesor mínimo, habrá que añadir el sobreespesor de corrosión definido según el servicio del tanque.

Un techo se considera frágil si se diseña para que, en caso de presión interna excesiva, por encima de las condiciones de diseño, la unión techo-cuerpo falle antes que la unión fondo-cuerpo. Esto supondría la pérdida del techo pero no la rotura del depósito ni la pérdida del líquido almacenado.

#### 4.3.6.1 Techo Fijo Autosoportado

Los techos domo autosoportados deben cumplir la siguiente restricción:

$$0,8 \cdot D \leq R \leq 1,2 \cdot D$$

donde

$D$  : diámetro del cuerpo cilíndrico

$R$  : radio de curvatura del techo

Puesto que el radio de curvatura es de 21 metros y el diámetro del cuerpo es 17,5, se verifica dicha condición siendo  $R = 1,2 \cdot D$ .

El espesor de la lámina que conforma el techo del tanque se calcula a través de la siguiente expresión:

$$t_r = \frac{R}{707} \cdot \sqrt{P}$$

donde

$t_r$  : espesor mínimo sin incluir el sobreepesor de corrosión (in)

$R$  : radio de curvatura del techo (ft)

$P$  : carga total sobre el techo (lb/ft<sup>2</sup>)

Según la norma ASME B96.1 en la carga  $P$  se incluye el peso propio de la cubierta más una carga viva adicional de  $25\text{lb}/\text{ft}^2$ . Considerándose la acción de la carga de nieve junto con la sobrecarga para la cubierta según el *Código Técnico de la Edificación* el valor de dicha carga total sería de  $1,2\text{kPa} \approx 25\text{lb}/\text{ft}^2$ . Expresando ambas cantidades en las mismas unidades se tiene que el valor coincide.

Puesto que el peso propio de la cubierta depende del espesor de ésta, el proceso de diseño es iterativo. Los cálculos se incluyen en el Anexo 2. Así, finalmente, el espesor mínimo necesario, incluyendo el sobreepesor es:

$$t_r = 15\text{mm} = 0,59\text{in}$$

#### 4.3.7 Diseño de un anillo de refuerzo

Las indicaciones para el cálculo del área necesaria del anillo de refuerzo se detallan en el apartado 3.8.4. Puesto que el tanque que se está analizando es de Clase 3, las expresiones que determinan el área necesaria son las siguientes:

$$A = \frac{1,5 \cdot P_g \cdot R}{Y} \cdot \left[ \frac{6 \cdot R}{\tan \theta} - \frac{W_h}{z \cdot \text{sen} \theta} - W_c \right]$$

$$W_h = 2,08 \cdot \sqrt{\frac{R \cdot t_h}{\text{sen} \theta}}$$

$$W_c = 2,08 \cdot \sqrt{R \cdot t_c}$$

donde

$A$  : área a compresión (in<sup>2</sup>)

$P_g$  : presión interna de diseño (oz/in<sup>2</sup>)

$Y$  : tensión de fluencia (psi)

$t_c$  : espesor de la lámina cilíndrica sin incluir el sobreepesor (in)

$t_h$  : espesor de la lámina de la cubierta sin incluir el sobreepesor (in)

$z$  : factor según tipo de cubierta ( $z=2$  para este caso)

$\theta$  : ángulo que forma la cubierta con la horizontal (grados)

Por consiguiente, habrá que calcular el área a compresión necesaria. Esta área representa tanto el área del anillo como la correspondiente a la cubierta y al cuerpo cilíndrico.

Los resultados que se obtiene son:

$W_h$ (in)	12,818
$W_c$ (in)	5,572
Área total ( $mm^2$ )	7853,618
Área anillo( $mm^2$ )	1979,301

Tabla 4.5 : Cálculo del anillo de compresión

Además, la norma establece una restricción adicional. La anchura mínima del anillo debe ser igual o mayor que  $0,015 \cdot R$ , siendo R el radio del cilindro. Se calcula la anchura mínima del cilindro siendo  $129,25 \text{ mm}$ . Se comprueba que esta es la condición que limita las dimensiones del anillo. Por lo tanto, se toma un perfil angular de dimensiones:

L130x130x12

La tipología del anillo de refuerzo es del tipo A y, según indica la norma, en la siguiente figura se observan los detalles constructivos:

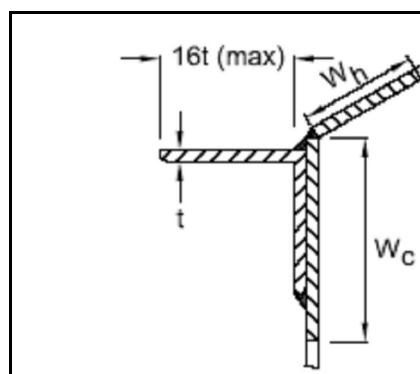


Fig. 4.3 : Detalles constructivos del anillo de refuerzo

#### 4.4 Conclusiones

Los espesores de cada virola, incluyendo el sobreespesor de corrosión, que resultan de la aplicación del estándar ASME B96.1 y el diseño a partir de la Teoría de la Membrana según la máxima tensión admisible de este código, se resumen a continuación:

<i>Virola</i>	<i>Espesor ASME (mm)</i>	<i>Espesor tensión máxima admisible ASME (mm)</i>
<b>1</b>	7	6
<b>2</b>	9	9
<b>3</b>	12	12
<b>4</b>	16	16
<b>5</b>	20	19
<b>6</b>	24	22
<b>7</b>	27	26
<b>8</b>	31	29
<b>9</b>	35	32
<b>10</b>	39	36

Tabla 4.6: Espesores obtenidos

Para una mejor comparación de estos resultados obtenidos, se representan en una gráfica ambas soluciones:

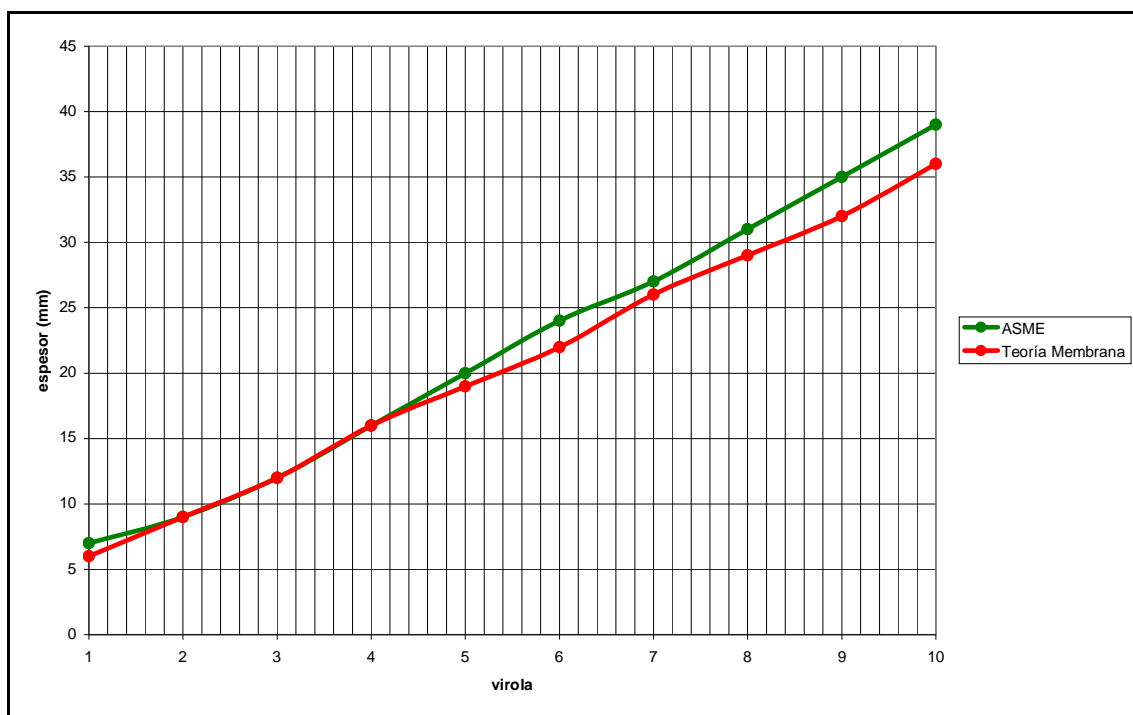


Gráfico 4.1: Comparativa entre los espesores obtenidos

A la vista de estos resultados se comprueba que la mayor diferencia en los resultados se obtiene en las últimas virolas, concretamente en las virolas cercanas del fondo del depósito. Esto se debe principalmente a que en el análisis realizado mediante la Teoría de la Membrana no se han tenido en cuenta posibles efectos debidos a la flexión. El fondo del tanque de almacenamiento se encuentra empotrado, esto conlleva la aparición de esfuerzos y momentos que contribuyan a esta condición de contorno. Por lo tanto aparece flexión en esta zona y será necesario una cantidad mayor de material de permita soportar estas cargas.

En la primera virola existe una diferencia de espesor. Esta zona es crítica como ya se comentó e incluso es necesario aportar un anillo de refuerzo para soportar los esfuerzos que aparecen en esta zona. Aparece flexión localizada en este punto, por lo que es entendible y asumible que el espesor obtenido por estos dos procedimientos difiera.



Sin embargo, excluyendo los dos extremos del depósito, se aprecia claramente que el espesor obtenido coincide en la zona intermedia. Esto se debe a que en dichos puntos se puede asumir un estado de membrana ya que las condiciones son favorables.

Finalmente, analizando la complejidad del procedimiento, se ha comprobado que el diseño por la norma ASME B96.1 es más sencillo ya que únicamente es necesario la aplicación de ciertas expresiones que permiten obtener el espesor de cada virola. Por el contrario, al realizar un diseño por análisis mediante la Teoría de la Membrana, es necesario estudiar cada virola independientemente y calcular las tensiones que aparecen en cada parte con el fin de que no se sobrepase la tensión admisible en ningún punto. Este procedimiento resulta demasiado tedioso.

En cuanto a la cubierta, la diferencia entre el valor obtenido del análisis mediante la Teoría de la membrana según la máxima tensión admisible ( $3 \text{ mm}$ ) y el obtenido mediante los procedimientos del estándar ASME B96.1 ( $15 \text{ mm}$ ) pueden deberse a que por el procedimiento analítico no se considera la posibilidad de pandeo de la cubierta. Este es el factor más crítico junto con los esfuerzos de flexión que pudieran aparecer en la unión de la cubierta y la envolvente del depósito.