

**CAPÍTULO V:**  
**DISEÑO DE UN TANQUE DE**  
**ALMACENAMIENTO DE**  
**ALUMINIO: DISEÑO SEGÚN**  
**EUROCÓDIGO 9**

## **5 Diseño según el Eurocódigo 9 EN-1999-1-5**

### **Índice**

5.1	Objeto.....	63
5.1.1	Generalidades.....	63
5.1.2	Normativas de aplicación.....	63
5.2	Bases de cálculo.....	64
5.2.1	Principios de Cálculo de los Estados Límite.....	64
5.2.2	Tipo de análisis.....	65
5.3	Descripción del modelo.....	66
5.4	Hipótesis Simples.....	69
5.4.1	Peso propio.....	69
5.4.2	Presión hidráulica.....	70
5.4.3	Presión Interna.....	71
5.4.4	Sobrecarga de Uso.....	71
5.4.5	Viento.....	72
5.5	Combinaciones de carga.....	81
5.6	Estados Límite.....	83
5.6.1	Estados Límite Últimos.....	83
5.6.2	Estado Límite de Servicio.....	91
5.7	Comprobación de Resistencia.....	92

5.8	Comprobación de Estabilidad.....	94
5.8.1	Pandeo del cuerpo cilíndrico.....	94
5.8.2	Pandeo de la cubierta.....	97
5.9	Solución Óptima.....	100
5.8.1	Comprobación de Resistencia.....	101
5.8.2	Comprobación de Estabilidad.....	102
5.10	Conclusiones.....	103

## 5.1 Objeto

El objeto de esta memoria es diseñar un depósito de aluminio a partir de los requisitos impuestos por el Eurocódigo 3: Proyectos de Estructuras de Aluminio.

Se parte de las dimensiones obtenidas en el CAPÍTULO IV donde se realizó el diseño del tanque de almacenamiento siguiendo la normativa ASME B96.1. Posteriormente, tras el análisis de esta estructura de dimensiones conocidas se procederá a un diseño óptimo del depósito.

### 5.1.1 Generalidades

El Eurocódigo 9 se refiere a los requisitos de resistencia, aptitud de servicio, durabilidad y resistencia al fuego de las estructuras de aluminio, proporcionando reglas básicas de cálculo. Es aplicable a proyectos de edificios y obras de ingeniería civil.

La parte 1999-1-5 de dicho Eurocódigo sienta las bases generales que deben ser aplicadas para el cálculo de estructuras laminares, propone la utilización de métodos numéricos para un óptimo diseño de estructuras laminares.

### 5.1.2 Normativas de aplicación

Dentro de las normas que pueden ser de utilización conjunta con el Eurocódigo 9, para el presente proyecto son de especial relevancia:

- *EN 1990: Bases de Cálculo de Estructuras*
- *EN 1991: Acciones en Estructuras*

Las partes del Eurocódigo 9 aplicadas al presente proyecto son:

- *EN 1999-1-1: Reglas generales*
- *EN 1999-1-5: Estructuras laminares*

Además se usarán los siguientes documentos de referencia nacional:

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

## **5.2 Bases de cálculo**

### **5.2.1 Principios de Cálculo de los Estados Límite**

Implica la verificación de los estados límites últimos y de servicio, relacionados con situaciones de proyecto persistentes, transitorias o accidentales.

Los estados límites últimos se refieren a la seguridad de las personas, de la estructura y, en algunas circunstancias, de los contenidos de la misma. Se deben verificar los siguientes estados límites últimos:

- Pérdida de equilibrio de la estructura o cualquier parte de ella.
- Fallo por deformación excesiva, transformación de la estructura o alguna de sus partes en un mecanismo y rotura o pérdida de estabilidad de la estructura o alguna de sus partes, incluyendo los apoyos y la cimentación.
- Fallo causado por fatiga u otros efectos dependientes del tiempo.

Los estados límite de servicio se refieren al funcionamiento de la estructura o de los elementos estructurales bajo uso normal, a la comodidad de las personas y a la apariencia de las construcciones. Deben distinguirse entre estados límite de servicio reversibles e irreversibles. Se deben verificar los estados límite de servicio referidos a los siguientes aspectos:

- Deformaciones que afecten a la apariencia, la comodidad de los usuarios o al funcionamiento de la estructura, o que causen daño a los elementos no estructurales.
- Vibraciones que causen incomodidad a las personas o limiten la efectividad funcional de la estructura.
- Daños que puedan afectar adversamente a la apariencia, durabilidad o funcionamiento de la estructura.

El cálculo en estados límite se basa en modelos estructurales y de carga para las situaciones de proyectos más relevantes. Debe verificarse que en estos modelos no se supera ningún estado límite al introducir los valores de cálculo correspondientes, según el Método de los Coeficientes Parciales, de las acciones, las propiedades de los materiales y la geometría.

### **5.2.2 Tipo de Análisis**

Para verificar los distintos estados límite el Eurocódigo EN 1999-1-5 propone diversos tipos de diseño.

Para el presente proyecto se realizará un diseño por análisis numérico global y, dentro de los tipos de cálculo que pueden utilizarse con este método, se hará un Análisis Lineal Elástico, que utiliza la Teoría de la Membrana con flexión y estiramiento lineal, supone un comportamiento lineal del material y una geometría perfecta.

Las tensiones y los desplazamientos requeridos en las distintas verificaciones de los estados límite se calcularán a partir de un modelo de elementos finitos del depósito.

### 5.3 Descripción del Modelo

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

Para estudiar el comportamiento de la estructura bajo las hipótesis de carga consideradas, se realiza un modelo mediante el Método de los Elementos Finitos. Para ello se utiliza el programa de cálculo ANSYS, de probada solvencia para la simulación de este tipo de estructuras.

Aprovechando la simetría de revolución del depósito y de las cargas que actúan sobre él, se realiza un modelo bidimensional y se resuelve una sección meridional de la cubierta y el cilindro. Se incluye un anillo de compresión en la unión del cuerpo cilíndrico y la cubierta esférica, para aumentar la rigidez radial de esa zona. Dicho anillo tendrá la sección de un perfil angular normalizado.

Para modelar el depósito se utiliza el elemento de lámina delgada axisimétrica de dos nudos SHELL61.

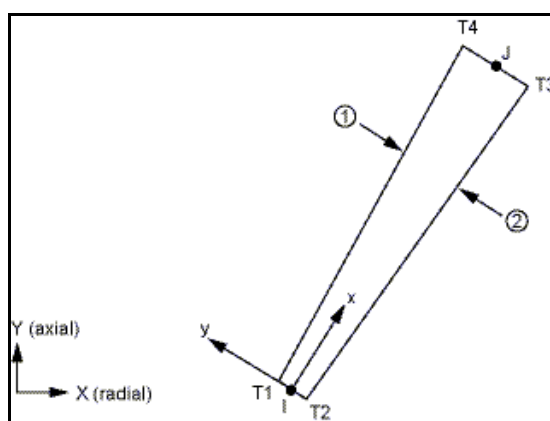


Fig 5.1: Elemento SHELL61

Según el sistema de coordenadas utilizado, el eje Y coincide con el eje de simetría del depósito y la base se encuentra en el nivel  $Y=0$ .

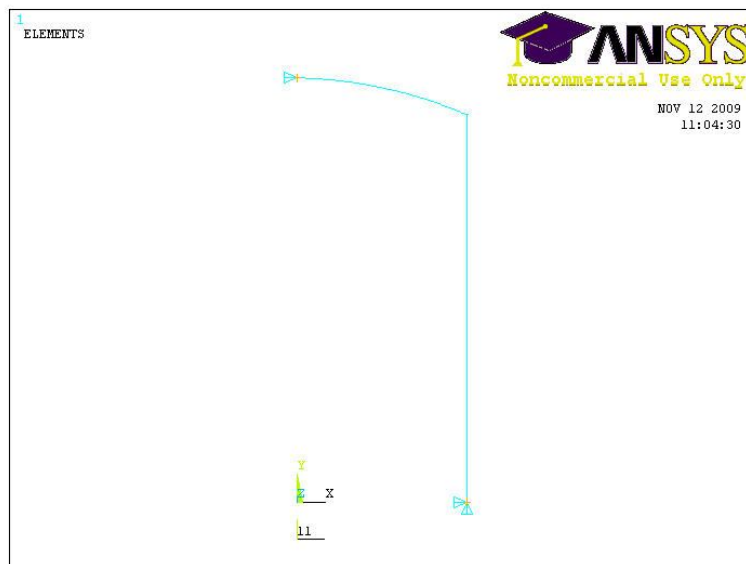


Fig 5.2: Geometría y condiciones de contorno del modelo

Se define una densidad ficticia del material en el modelo, que permite calcular las cargas de peso propio incluyendo el sobreespesor de corrosión y las tensiones sin incluirlo, es decir, suponiendo el tanque corroído. De esta forma se estudian las condiciones más desfavorables.

Las condiciones de contorno en la base se toman de empotramiento, imponiendo que el depósito no se levante del suelo bajo ninguna acción.. En cuanto a las condiciones de contorno en el eje de simetría, se impedirán los desplazamientos perpendiculares a dicho eje, así como el giro.

En las siguientes figuras se puede ver el espesor de las distintas láminas (a escala), y el sistema global de coordenadas utilizado:



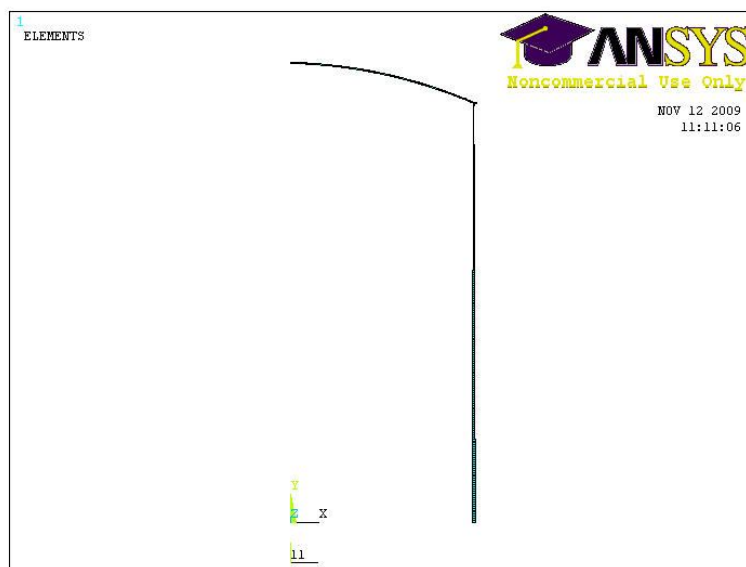


Fig 5.3: Modelo del depósito

Los espesores iniciales dados a la chapa y las dimensiones del anillo de compresión son los obtenidos en el CAPÍTULO IV: Diseño según ASME B96.1.

En la siguiente tabla se resumen los resultados obtenidos:

<b>Virola</b>	<b>Espesor (mm)</b>
<b>1</b>	<b>7</b>
<b>2</b>	<b>9</b>
<b>3</b>	<b>12</b>
<b>4</b>	<b>16</b>
<b>5</b>	<b>20</b>
<b>6</b>	<b>24</b>
<b>7</b>	<b>27</b>
<b>8</b>	<b>31</b>
<b>9</b>	<b>35</b>
<b>10</b>	<b>39</b>
<b>Anillo</b>	<b>Dimensiones (mm)</b>
<b>130x130x12</b>	

Tabla 5.1: Dimensiones obtenidas según ASME B96.1

## 5.4 Hipótesis Simples

Los valores característicos de las acciones que deben tenerse en cuenta para el diseño de tanques se recogen en el Anexo A del Eurocódigo EN 1993-4-2. Dichas acciones constituyen las siguientes hipótesis simples de carga.

Sin embargo, y puesto que en este capítulo se pretende realizar una comparación con los resultados obtenidos por el estándar ASME B96.1, se tendrán en cuenta únicamente las cargas consideradas en la norma americana:

1. Peso Propio
2. Presión Hidrostática
3. Presión Interna
4. Sobrecarga
5. Viento

Estas hipótesis simples de carga se combinan para tener en cuenta su acción conjunta sobre la estructura según establece la Norma UNE-EN 1990: Bases de Cálculo de Estructuras, en las distintas comprobaciones de Estados Límite Últimos y de Servicio.

### 5.4.1 Peso Propio

Según el apartado 2.1 de la norma UNE-EN 1991-1-1, el peso propio de las construcciones debe clasificarse como una acción fija permanente.

La determinación de esta hipótesis simple se realiza a partir de las dimensiones nominales del depósito objeto de cálculo y en función del peso específico del material utilizado. Esta acción debe incluir tanto el peso de los elementos estructurales (cubierta y paredes del depósito) como el de los no estructurales (escaleras, barandillas...).

Debido a que los elementos no estructurales no están definidos en el presente proyecto, su carga de peso se supone incluida en la acción de sobrecarga de uso, cuyo valor de diseño será mayor, por lo que queda del lado de la seguridad.

Para calcular el valor característico de esta hipótesis simple se utilizan los siguientes parámetros:

- *Densidad del acero:*  $2.400 \text{ kg/m}^3$
- *Aceleración de la gravedad:*  $9.8 \text{ m/s}^2$

#### **5.4.2 Presión Hidráulica**

El almacenamiento de líquido en el interior del depósito provoca presiones en las paredes del cuerpo cilíndrico. Estas cargas deben clasificarse como acciones variables fijas, según indica el apartado 2 de la norma UNE-EN 1991-4.

En el capítulo 7 de dicha Norma, se establece que las cargas debidas a líquidos se calcularán considerando los tipos de líquido a almacenar en el depósito, su geometría y la máxima profundidad posible de almacenamiento.

El valor característico de la presión hidrostática es:

$$P(z) = \gamma \cdot z$$

donde

$\gamma$ : peso específico del líquido almacenado ( $\text{N/m}^3$ )

$z$ : profundidad (m)

El líquido almacenado será distinto según se consideren las condiciones en operación o en prueba hidráulica. La densidad del fluido, en cada caso, toma un valor de  $\rho = 920 \text{ kg/m}^3$  en operación.

### 5.4.3 Presión Interna

Esta acción tiene en cuenta las posibles presiones que puedan aparecer en la chapa debidas al almacenamiento de gas con el líquido, a la vaporización del contenido del depósito, o en los procesos de llenado del mismo.

Según el apartado 2 de la norma UNE-EN 1991-4, las cargas en depósitos se clasifican como acciones variables.

Las condiciones de diseño del depósito bajo estudio establecen un valor depresión interna de  $6 \text{ kPa}$ .

### 5.4.4 Sobrecarga de Uso

Las sobrecargas de uso se deben clasificar como acciones libres variables, según la norma UNE-EN 1991-1-1.

Estas acciones son debidas a la ocupación de los edificios, incluyendo su uso normal por personas, el mobiliario o eventos no usuales previstos como apilamiento de objetos. En el presente proyecto se incluye el peso de los elementos no estructurales como sobrecarga de uso.

La carga exterior se considerará como una acción uniformemente distribuida en toda la cubierta, en proyección horizontal. El valor de dicha sobrecarga se establece en el apartado 6.3.4 del Eurocódigo UNE-EN 1991-1-1 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  $1 \text{ kN/m}^2$ .

## 5.4.5 Viento

### 5.4.5.1 *Cuerpo cilíndrico*

El procedimiento para el cálculo de la carga máxima debida al viento en el cuerpo cilíndrico se detalló en el CAPÍTULO IV del presente proyecto, resultando ser  $q_{w,\max} = 594 \text{ kPa}$ .

Sin embargo, es sabido que la distribución que presenta la carga de viento no es axisimétrica. Por ello, en el Anexo A de la norma UNE-EN-1999-1-5 se establece la siguiente carga equivalente:

$$q_{eq} = k_w \cdot q_{w,\max}$$

donde

$q_{w,\max}$  : máxima presión debida al viento

$k_w$  : coeficiente

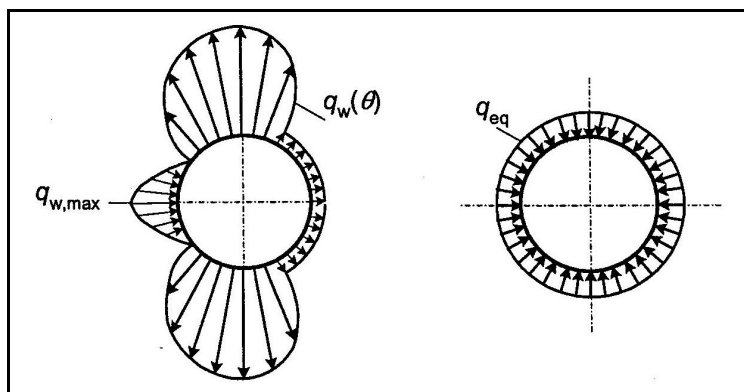


Fig 5.4: Distribución de la presión debida al viento y simplificación

Dicho coeficiente se calcula a partir de la siguiente expresión:

$$k_w = 0,46 \cdot \left( 1 + 0,1 \sqrt{\frac{C_\theta \cdot r}{\omega \cdot t}} \right)$$

donde

$C_\theta$  : factor de pandeo ante presión externa, depende de las condiciones de contorno y se obtiene a partir de la tabla A.5 de dicho anexo ( $C_\theta = 1,5$ ).

$r$  : radio del cilindro (m)

$t$  : espesor del cilindro (m)

$\omega$  : parámetro que se calcula a partir de la expresión  $\omega = \frac{l}{\sqrt{r \cdot t}}$ , siendo  $l$

la altura del depósito (m)

Puesto que el tanque de almacenamiento que se está analizando no presenta un espesor constante, la norma indica que primero se sustituya por un cilindro equivalente compuesto por 3 secciones (a, b y c). La longitud de la sección más alta,  $l_a$ , debe extenderse desde el borde superior del depósito, hasta el borde superior de la primera virola que tenga un espesor mayor que 1.5 veces el espesor mínimo del cilindro original, pero esta longitud no debe superar la mitad de la longitud total del depósito. La longitud de las otras dos secciones,  $l_b$  y  $l_c$ , se obtienen según:

- $l_a \leq L/3 \Rightarrow \begin{cases} l_b = l_a \\ l_c = L - 2l_a \end{cases}$
- $L/3 < l_a \leq L/2 \Rightarrow \{l_b = l_c = 0,5(L - l_a)\}$

El cálculo de los espesores de estas tres secciones se realiza de la siguiente forma:

$$t_a = \frac{1}{l_a} \sum_a l_j \cdot t_j \quad t_b = \frac{1}{l_b} \sum_b l_j \cdot t_j \quad t_c = \frac{1}{l_c} \sum_c l_j \cdot t_j$$

El cilindro compuesto por tres secciones se sustituye por otro de longitud efectiva  $l_{eff}$  y espesor  $t_a$ . La longitud efectiva se determina a partir de la siguiente expresión:

$$l_{eff} = \frac{l_a}{\kappa}$$

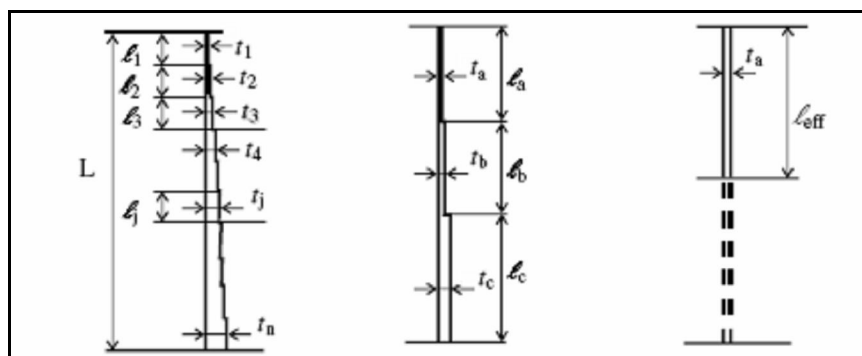


Fig 5.5: Esquema de la simplificación

El factor adimensional  $\kappa$  se determina a partir de las siguientes gráficas:

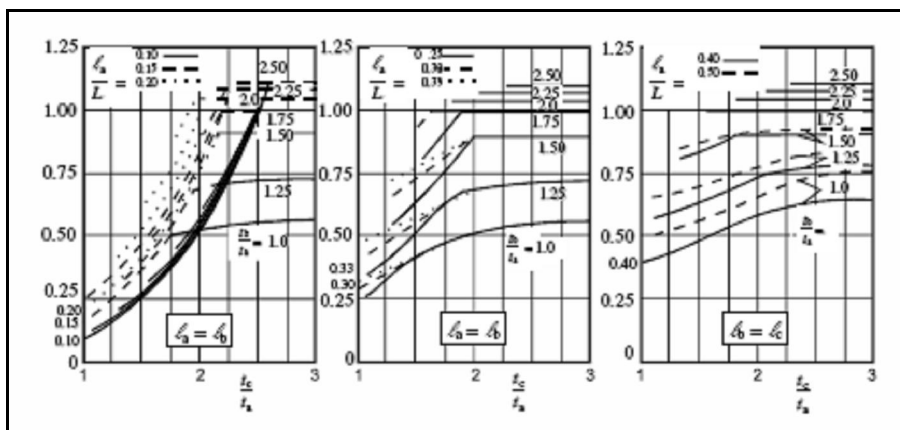


Fig 5.6: Gráficas para la determinación del factor adimensional  $\kappa$

Los resultados se resumen en la siguiente tabla:

$l_a$ (m)	$l_b$ (m)	$l_c$ (m)	$t_a$ (mm)	$t_b$ (mm)	$t_c$ (mm)	$l_{eff}$ (m)
6	6	8	9,33	20	33	4,8

Tabla 5.2: Valores para el cálculo del parámetro  $\omega$

Conocidos estos valores, el parámetro  $\omega$  toma el siguiente valor:

$$\omega = 16,6$$

Se comprueba que  $1,7 < \omega < 0,5 \frac{r}{t}$  y, por consiguiente, el cilindro se considera de mediana longitud.

Finalmente se calcula el coeficiente  $k_w$  :

$$k_w = 0,8119$$

Por consiguiente, la carga equivalente axisimétrica debida al viento debe de tomar el siguiente valor según la norma:

$$q_{eq} = 0,482kPa$$

#### 5.4.5.2 Cubierta esférica

Como ya se vio en el CAPÍTULO IV, la norma americana ASME B96.1 no contempla explícitamente la carga de viento en la cubierta. Sin embargo en este apartado se va a realizar un análisis de la influencia de esta carga en la estructura con el fin de determinar si es relevante su inclusión en el estudio del depósito.

Según el Código Técnico de la Edificación, la carga debida al viento se determina a partir de la siguiente expresión:

$$q_e = q_b \cdot c_e \cdot c_p$$



donde

$q_b$ : presión dinámica del viento.

De forma simplificada, como valor en cualquier punto del territorio español, puede adoptarse 0,5 kPa.

$c_e$ : coeficiente de exposición, variable con la altura del punto considerado, en función del grado de aspereza del entorno donde se encuentra ubicada la construcción.

Para este caso:

- Zona urbana en general, industrial o forestal
- Altura = 20 m

Este coeficiente toma un valor de 2,4.

$c_p$ : el coeficiente eólico o de presión, dependiente de la forma y orientación de la superficie respecto al viento, y en su caso, de la situación del punto respecto a los bordes de esa superficie; un valor negativo indica succión.

El coeficiente eólico presenta la siguiente distribución para cubiertas esféricas:

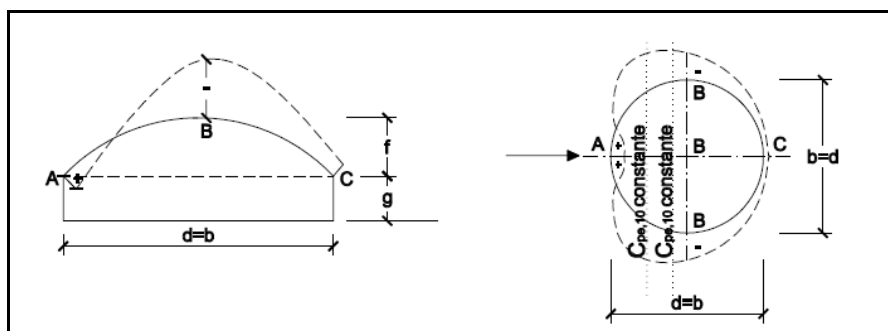


Fig 5.7: Distribución del coeficiente eólico

A partir de las siguientes gráficas se determina el valor de dicho coeficiente en los puntos A, B y C como indica la figura. Para ello es necesario conocer la relación entre el diámetro del cuerpo cilíndrico, el radio de curvatura de la cubierta, la altura de ésta y la altura de la parte cilíndrica:

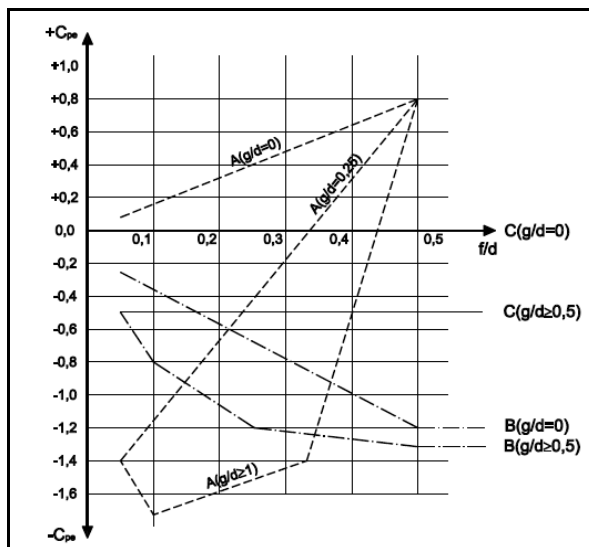


Fig 5.8: Gráfica que determina el coeficiente eólico para los puntos A, B y C.

Conocidas las dimensiones de la estructura, los valores de los coeficientes para los tres puntos dados son:

Punto	Coefficiente eólico
A	-1,7
B	-0,8
C	-0,5

Tabla 5.3: Valores del coeficiente eólico

Puesto que el signo de estos coeficientes es negativo la fuerza ejercida por el viento en este caso es de succión.

Por consiguiente, el punto más desfavorable es el punto A siendo la carga de viento en dicho punto:

$$q_e = 2,04kPa$$

Puesto que, como se verá en apartados posteriores, el criterio determinante en el diseño de la cubierta es el de estabilidad y al ser la carga producida por el viento de succión, ésta no participará en el posible pandeo de la estructura. Así, únicamente se deberá de tener en cuenta en el criterio resistente.

Esta carga no presenta una distribución axisimétrica, por lo que se realizará un análisis del orden de magnitud de las tensiones producidas sin tener en cuenta esta carga y posteriormente incluyéndola en el análisis.

Para poder usar un modelo axisimétrico se va a considerar una carga uniforme de succión en la cubierta de valor 2,04 kPa, el cuál es el máximo que se presenta en la estructura.

Como se expondrá en apartados posteriores, la hipótesis compuesta más desfavorable desde el punto de vista del criterio de resistencia es la hipótesis 8 (todas las hipótesis compuestas se analizan en apartados posteriores y se detallan en el Anexo 3 del presente documento):

$$\text{HC 8)} \quad 0,8\text{PP} + \text{PI} + 1 \cdot 1,20 \cdot \text{PH} + 0,6 \cdot 1,5 \cdot \text{V}$$

Los esfuerzos que se obtienen en ambos casos se detallan en las siguientes figuras:

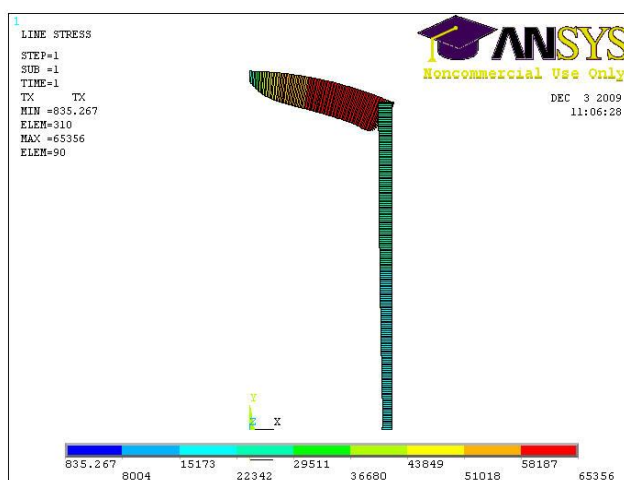


Fig 5.9: Esfuerzos axiales sin considerar la carga de viento en la cubierta

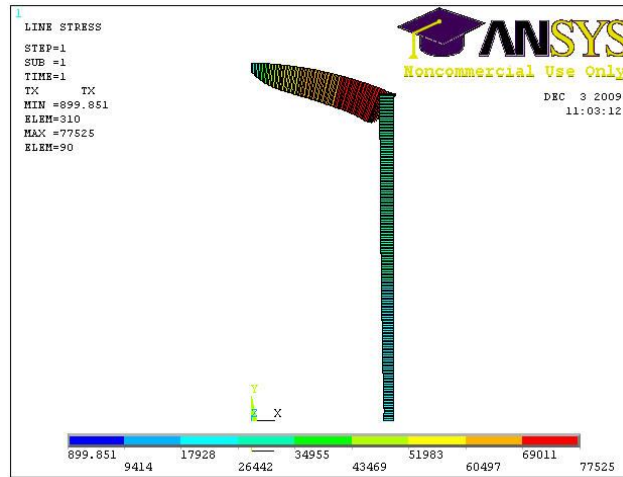


Fig 5.10: Esfuerzos axiales considerando la carga de viento en la cubierta

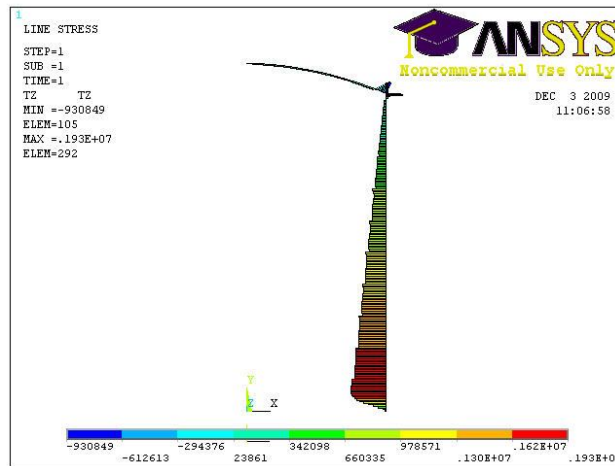


Fig 5.11: Esfuerzos circunferenciales sin considerar la carga de viento en la cubierta

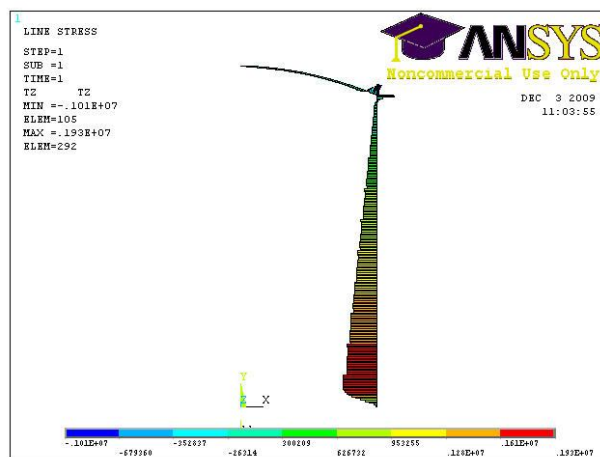


Fig 5.12: Esfuerzos circunferenciales considerando la carga de viento en la cubierta

A la vista de estas imágenes se comprueba que no existe un incremento considerable en los esfuerzos de la estructura al considerar una carga de viento uniforme en la cubierta de valor el máximo posible.

A continuación se calculan las tensiones equivalentes producidas en el punto más desfavorable de la estructura para ambas situaciones:

<i>Zona</i>	<i><math>\sigma</math> equivalente (Pa)</i>
Cubierta	8,791E+07
Cubierta con viento	9,254E+07

Tabla 5.4: Valores de la tensión equivalente

Se comprueba que el incremento que se produce en las tensiones de la cubierta al incluir la carga de viento es despreciable.

Por consiguiente, teniendo en cuenta que en la norma ASME B96.1 no se detalla explícitamente que se considere carga de viento en la cubierta y que, tras el análisis realizado, el incremento producido en las tensiones es despreciable, esta carga no se tendrá en cuenta para el diseño del depósito.

## 5.5 Combinaciones de Carga

Según el artículo 3.2 del Eurocódigo EN 1990: Bases de Cálculo de Estructuras, las situaciones del presente proyecto deben clasificarse como persistentes o transitorias. En ese caso, el valor de cálculo de los efectos de las acciones se determina mediante combinaciones de cargas a partir de la expresión:

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} \cdot G_{k,j} + \gamma_p \cdot P + \gamma_{Q,1} \cdot Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \cdot \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i}$$

El valor de los coeficientes parciales se recoge en el del Código Técnico de la Edificación, según se verifique la resistencia o la estabilidad de la estructura. Para la hipótesis de presión hidrostática, los coeficientes se recogen en la tabla 2.1 de la Norma EN 1993-4-2, en el caso de acciones variables debidas a líquidos no tóxicos ni inflamables. El valor de la presión interna no se ve afectado por coeficientes parciales de seguridad por ser un dato de diseño.

Criterio	Acción	Coeficiente $\gamma$	
		<i>Desfavorable</i>	<i>Favorable</i>
<b><i>Resistencia</i></b>	Peso Propio	1,35	0,80
	Presión Hidrostática	1,20	0
	Sobrecarga de uso	1,50	0
	Viento	1,50	0
<b><i>Estabilidad</i></b>	Peso Propio	1,10	0,90
	Presión Hidrostática	1,05	0
	Sobrecarga de uso	1,50	0
	Viento	1,50	0

Tabla 5.5: Coeficientes parciales

Los valores de los coeficientes de combinación de las distintas sobrecargas se recogen en el Anexo A de la norma EN 1991-4: Acciones en silos y depósitos, y se muestran a continuación:

---

<b>Acción</b>	<b>Coefficiente <math>\psi_0</math></b>
<b>Presión Hidráulica</b>	<b>1,0</b>
<b>Presión Interior</b>	<b>0,7</b>
<b>Sobrecarga de uso</b>	<b>0,7</b>
<b>Viento</b>	<b>0,6</b>

Tabla 5.6: Coeficientes de combinación de cargas

Finalmente, conocidos los coeficientes necesarios y el valor de las acciones que actúan sobre la estructura, se obtienen 23 hipótesis compuestas para la comprobación de resistencia y otras 23 hipótesis para la comprobación de estabilidad que se listan en el Anexo 3 del presente proyecto.

## 5.6 Estados Límite

### 5.6.1 Estados Límite Últimos

En el apartado 4 de la norma EN 1993-1-3 se establecen los estados límite últimos que deben ser considerados para estructuras laminares de acero, y en este caso de aluminio, como se referencia en la norma EN-1999-1-5:

- LS1: Estado Límite Plástico
- LS2: Plasticidad Cíclica
- LS3: Pandeo
- LS4: Fatiga

El estudio de los estados límite de plasticidad cíclica y de fatiga no son objeto de este proyecto. En los apartados siguientes se detallan las comprobaciones para los estados límite LS1 y LS3.

- **Estado Límite Plástico**

Condición según la cual la capacidad resistente de la estructura se agota debido a la deformación del material al alcanzar el límite plástico.

La resistencia de la estructura en este estado límite se calcula como la carga de colapso plástico, es decir, el estado límite plástico permite la plastificación completa de la sección transversal.

En la verificación de este estado límite, bajo la combinación de acciones más desfavorable, la tensión de diseño debe satisfacer la condición:

$$\sigma_{eq,Ed} \leq f_{eq,Rd}$$

**Tensión de diseño  $\sigma_{eq,Ed}$**

Aunque con el modelo de elementos finitos obtengamos la tensión de Von-Mises real, la norma recomienda usar el criterio elástico de Ilyushin, que se acerca al verdadero estado de colapso plástico con una simple evaluación de la tensión elástica superficial. Este criterio utiliza una expresión modificada de las tensiones producidas por los esfuerzos de flexión:

$$\sigma_{x,Ed} = \frac{N_{x,Ed}}{t} \pm \frac{M_{x,Ed}}{(t/2)^2}$$

$$\sigma_{\theta,Ed} = \frac{N_{\theta,Ed}}{t} \pm \frac{M_{\theta,Ed}}{(t/2)^2}$$

$$\tau_{\theta x,Rd} = \frac{Q_{\theta x}}{t}$$



Para problemas axil-simétricos la tensión de diseño resulta ser:

$$\sigma_{eq,Rd} = \sqrt{\sigma_{\theta,Rd}^2 + \sigma_{x,Rd}^2 - \sigma_{\theta,Rd} \cdot \sigma_{x,Rd} + 3\tau_{\theta x,Rd}^2}$$

**Valor de diseño de la resistencia**  $f_{eq,Ed}$

La resistencia de diseño se toma:

$$f_{eq,Ed} = \frac{f_o}{\gamma_{M0}}$$

Para este estado, el valor del coeficiente parcial de resistencia es:

$$\gamma_{M0} = 1$$

#### ▪ Pandeo

Las comprobaciones de estabilidad que deben de considerarse se detallan en el Anexo A de la norma EN-1999-1-5.

Aunque el pandeo no sea un modo de fallo iniciado por fenómenos puramente de tensión, el Eurocódigo representa este estado límite con restricciones sobre los valores de la tensión de membrana. La influencia de los efectos de la flexión en la resistencia de pandeo puede despreciarse si surgen como consecuencia de las condiciones de contorno. En el caso de tensiones de flexión debidas a cargas locales o gradientes de temperatura deberían seguirse consideraciones especiales, pero no es el caso.

Según la situación de carga y tensión, las componentes de la tensión de membrana deben verificar las siguientes restricciones:

$$\sigma_{x,Ed} \leq \sigma_{x,Rd}$$

$$\sigma_{\theta,Ed} \leq \sigma_{\theta,Rd}$$

donde

$\sigma_{x,Ed}$  : valor de diseño de la tensión axial

$\sigma_{\theta,Ed}$  : valor de diseño de la tensión circunferencial

$\sigma_{x,Rd}$  : valor de diseño de la resistencia a pandeo axial

$\sigma_{\theta,Rd}$  : valor de diseño de la resistencia a pandeo circunferencial

### **Valor de diseño de las tensiones $\sigma_{x,Ed}$ y $\sigma_{\theta,Ed}$**

Serán los valores de compresión obtenidos por análisis lineal de membrana. La teoría de membrana puede usarse bajo condiciones de simetría en geometría y cargas, y en otros casos de estructuras simples. Estos valores de tensión se obtendrán a partir del modelo de elementos finitos.

### **Pandeo del cuerpo cilíndrico**

### **Valor de diseño de resistencia a pandeo $\sigma_{x,Rd}$ y $\sigma_{\theta,Rd}$**

Los valores de resistencia a pandeo se obtienen a partir de:

$$\sigma_{x,Rd} = \alpha_x \cdot \rho_{x,w} \cdot \chi_{x,perf} \cdot \frac{f_o}{\gamma_{M1}}$$

$$\sigma_{\theta,Rd} = \alpha_{\theta} \cdot \rho_{\theta,w} \cdot \chi_{\theta,perf} \cdot \frac{f_o}{\gamma_{M1}}$$

donde

$\alpha_i$ : coeficiente de reducción debido a las imperfecciones

$\rho_{i,w}$ : coeficiente de reducción debido a las soldaduras

$\chi_{i,perf}$ : coeficiente de reducción de pandeo

El valor del coeficiente de parcial de resistencia a pandeo es  $\gamma_{M1} = 1,10$ .

Las expresiones que determinan en valor del coeficiente debido a las imperfecciones se detallará a continuación, cuando se analicen los dos tipos de pandeo.

El coeficiente de reducción debido a las soldaduras de las chapas viene dado en la norma EN-1999-1-1, según el tipo de material empleado. Para este caso  $\rho_{i,w} = 0,65$ .

Las expresiones para el cálculo del coeficiente a pandeo son las siguientes:

$$\chi_{i,perf} = \frac{1}{\phi_i + \sqrt{\phi_i^2 - \bar{\lambda}_i^2}}$$

donde  $\chi_{i,perf} \leq 1$

$$\phi_i = 0,5 \cdot (1 + \mu_i \cdot (\bar{\lambda}_i - \bar{\lambda}_{i,0}) + \bar{\lambda}_i^2)$$

donde

$\mu_i$ : parámetro que depende de la aleación de aluminio y los tipos de carga, en este caso  $\mu_x = 0,20$  y  $\mu_\theta = 0,70$

$\bar{\lambda}_{i,0}$ : esbeltez reducida relativa,  $\bar{\lambda}_{x,0} = 0,10$  y  $\bar{\lambda}_{\theta,0} = 0,20$

$\bar{\lambda}_i$ : esbeltez reducida,

$$\bar{\lambda}_x = \sqrt{\frac{f_o}{\sigma_{x,cr}}} \qquad \bar{\lambda}_\theta = \sqrt{\frac{f_o}{\sigma_{\theta,cr}}}$$

El valor de la tensión crítica y el parámetro de imperfecciones depende del tipo de compresión analizado, así:

- Compresión axial

$$\sigma_{x,cr} = 0,605 \cdot E \cdot C_x \cdot \frac{t}{r}$$

donde

$C_x$ : factor, depende de las condiciones de pandeo, para cilindros de mediana longitud,  $C_x = 1$

$$\alpha_x = \frac{1}{1 + 2,60 \cdot \left( \frac{1}{Q} \cdot \sqrt{\frac{0,6 \cdot E}{f_o}} \cdot (\bar{\lambda}_x - \bar{\lambda}_{x,0}) \right)^{1,44}} \quad \text{con } \alpha_x \leq 1$$

donde

$Q$ : parámetro de calidad de fabricación, para una tolerancia de calidad de fabricación de clase B (alta)  $Q = 60$

- Compresión circunferencial

Puesto que el espesor del cilindro no es constante:

$$\sigma_{\theta,cr,eff} = 0,92 \cdot E \cdot \frac{C_\theta}{\omega} \cdot \frac{t}{r}$$

calculada con las dimensiones del cilindro equivalente y  $C_\theta = 1$ .

$$\sigma_{\theta,cr,j} = \left( \frac{t_a}{t_j} \right) \sigma_{\theta,cr,eff}$$

$$\alpha_{\theta} = \frac{1}{1 + 0,2 \cdot (1 - \alpha_{\theta,ref}) (\bar{\lambda}_{\theta} - \bar{\lambda}_{\theta,0}) / \alpha_{\theta,ref}^2} \text{ con } \alpha_{\theta} \leq 1$$

donde

$\alpha_{\theta,ref}$  : parámetro de referencia,  $\alpha_{\theta,ref} = 0,75$  .

### Pandeo de la cubierta esférica

En el Eurocódigo 9 no se definen explícitamente las comprobaciones a pandeo necesarias para cubiertas esféricas.

Para verificar si el espesor de la cubierta es suficiente, se usarán las comprobaciones descritas en la norma DIN 18800- Parte 4: Análisis de seguridad de láminas frente a pandeo. Este procedimiento utiliza factores de reducción del límite elástico para determinar la resistencia a pandeo de láminas esféricas.

La coordenada  $\varphi$  representa la dirección meridional y la coordenada  $\theta$  la dirección circunferencial de la cubierta.

Para esferas laminares de espesor constante se definen:

- Tensiones de pandeo ideal

$$\sigma_{\varphi, Si} = \sigma_{\theta, Si} = 0,605 \cdot C_k \cdot E \cdot \frac{t}{r}$$

El factor  $C_k$  modela la disminución de la tensión de pandeo debida a los efectos de la flexión o a desplazamientos en los bordes de techos esféricos. Depende del ángulo que abarca la cubierta. Para  $\theta < 60^\circ$ ,  $C_k = 0,2$  .

- Tensiones de pandeo real

$$\sigma_{\varphi S, Rk} = \sigma_{\theta S, Rk} = \chi_2 \cdot f_y$$

El factor de reducción  $\chi_2$  corresponde al pandeo de láminas con alta sensibilidad a las imperfecciones y se calcula según:

$$\chi_2 = \begin{cases} 1 \Leftrightarrow \bar{\lambda}_s \leq 0,25 \\ 1,233 - 0,933\bar{\lambda}_s \Leftrightarrow 0,25 < \bar{\lambda}_s \leq 1 \\ \frac{0,3}{\bar{\lambda}_s^3} \Leftrightarrow 1 < \bar{\lambda}_s \leq 1,5 \\ \frac{0,2}{\bar{\lambda}_s^2} \Leftrightarrow 1,5 < \bar{\lambda}_s \end{cases}$$

La esbeltez adimensional  $\bar{\lambda}_s$  se calcula a partir de la tensión de pandeo ideal como:

$$\bar{\lambda}_s = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{S,i}}}$$

- Tensiones límite de pandeo

$$\sigma_{\varphi S, Rd} = \frac{\sigma_{\varphi S, Rk}}{\gamma_M} \qquad \sigma_{\theta S, Rd} = \frac{\sigma_{\theta S, Rk}}{\gamma_M}$$

El coeficiente parcial de seguridad para la resistencia en láminas con alta sensibilidad a las imperfecciones depende de la esbeltez adimensional según:

$$\gamma_M = \begin{cases} 1,1 \Leftrightarrow \bar{\lambda}_s \leq 0,25 \\ 1,1 \cdot \left( 1 + 0,318 \frac{\bar{\lambda}_s - 0,25}{1,75} \right) \Leftrightarrow 0,25 \leq \bar{\lambda}_s < 2 \\ 1,45 \Leftrightarrow 2 < \bar{\lambda}_s \end{cases}$$

Este coeficiente tiene en cuenta la considerable dispersión de la resistencia de pandeo experimental para esferas de pared delgada sometidas a presión uniforme.

La comprobación a pandeo consiste en verificar:

$$\sigma_{\varphi} \leq \sigma_{\varphi S, Rd} \quad \sigma_{\theta} \leq \sigma_{\theta S, Rd}$$

### 5.6.2 Estado Límite de Servicio

En el apartado 5.5 del Eurocódigo EN 1003-4-2 se definen los estados límite de servicios que deben cumplir los depósitos como:

- Deformaciones y flechas que afecten negativamente al uso efectivo de la estructura
- Deformaciones, flechas o vibraciones que dañen los elementos no estructurales

Las deformaciones, flechas y vibraciones deberán limitarse para cumplir con estos criterios. El Eurocódigo no especifica los valores límite apropiados para estos parámetros, que habrá que decidir teniendo en cuenta el uso previsto de la estructura y la naturaleza del líquido almacenado.

En este caso se tomarán las limitaciones previstas en la normativa de referencia nacional: Código Técnico de la Edificación, Documento Básico de Seguridad Estructural, que se detallan a continuación.

#### *Flechas*

Cuando se considere la integridad de los elementos constructivos o la apariencia de la obra, se admite que la estructura horizontal de la cubierta es suficientemente rígida si, para toda combinación de acciones, la flecha relativa es menor que 1/300.

Cuando se considere el confort de los usuarios, se admite que la cubierta es suficientemente rígida si, considerando solo las acciones de corta duración, la flecha relativa es menor que 1/350.

Estas condiciones deben verificarse entre dos puntos cualesquiera de la planta, tomando como luz el doble de la distancia entre ellos.

### ***Desplazamientos horizontales***

Cuando se considere la integridad de los elementos constructivos o la apariencia de la obra, se admite que la estructura global tiene suficiente rigidez lateral si, para cualquier combinación de acciones, el desplome relativo es menor que 1/250.

## **5.7 Comprobación de Resistencia**

La comprobación del estado límite plástico es:

$$\sigma_{eq,Ed} \leq f_{eq,Rd}$$

El coeficiente parcial de resistencia toma el valor  $\gamma_{M0} = 1$ .

Así,

$$f_{eq,Rd} = 240MPa$$

Para asegurar esta comprobación con los valores de axil y flector en las direcciones  $(x, \theta)$  se evalúa la tensión de Von Mises modificada que utiliza el criterio de Ilyushin, y se realiza la comprobación exacta.



Las combinaciones de carga más desfavorables se listan a continuación:

$$\text{HC 5)} \quad 1,35\text{PP} + 1,2\text{PH} + 0,7\text{PI} + 0,7 \cdot 1,5 \cdot \text{SC} + 0,6 \cdot 1,5 \cdot \text{V}$$

$$\text{HC 8)} \quad 0,8\text{PP} + \text{PI} + 1 \cdot 1,20 \cdot \text{PH} + 0,6 \cdot 1,5 \cdot \text{V}$$

$$\text{HC 10)} \quad 1,35\text{PP} + 1,5\text{SC} + 1 \cdot 1,2 \cdot \text{PH} + 0,6 \cdot 1,5 \cdot \text{V}$$

$$\text{HC 16)} \quad 1,35\text{PP} + 1,5\text{V} + 1 \cdot 1,2 \cdot \text{PH} + 0,7\text{PI}$$

$$\text{HC 17)} \quad 1,35\text{PP} + 1,5\text{V} + 1 \cdot 1,2 \cdot \text{PH} + 0,7 \cdot 1,5 \cdot \text{SC}$$

Tras el análisis de las hipótesis de carga más desfavorables, se encuentra que la hipótesis más desfavorable para las virolas y la cubierta es la hipótesis compuesta 8.

En la siguiente tabla se listan las tensiones equivalentes de cada una de las partes así como el ratio de aprovechamiento, siendo los espesores de éstas los obtenidos con la norma ASME B96.1:

<i>Zona</i>	<i><math>\sigma</math> equivalente (Pa)</i>	<i>Ratio de aprovechamiento</i>
Cubierta	8,791E+07	36,63%
1ª virola	2,926E+07	12,19%
2ª virola	4,305E+07	17,94%
3ª virola	4,775E+07	19,90%
4ª virola	4,760E+07	19,84%
5ª virola	4,751E+07	19,79%
6ª virola	4,760E+07	19,83%
7ª virola	4,919E+07	20,50%
8ª virola	4,893E+07	20,39%
9ª virola	4,882E+07	20,34%
10ª virola	5,101E+07	21,25%

Tabla 5.7: Comprobación de resistencia

Los cálculos se detallan en el Anexo 4 del presente capítulo.

Con estos resultados se comprueba que la solución obtenida por la norma americana cumple con el criterio de resistencia del Eurocódigo 9. Cabe destacar el bajo aprovechamiento de las partes que conforman el depósito. Habrá que estudiar el comportamiento en la comprobación de estabilidad para analizar las conclusiones de esta comparativa.

## 5.8 Comprobación de Estabilidad

La comprobación de estabilidad de la cubierta y de las virolas se realizará de forma independiente.

### 5.8.1 Pandeo del cuerpo cilíndrico

#### Compresión circunferencial

La carga más desfavorable para el pandeo circunferencial es la carga de viento, ya que provoca una compresión en esta dirección en el cilindro.

Las hipótesis compuestas más desfavorables para el pandeo del cuerpo cilíndrico en dirección circunferencial son:

$$\text{HC 12) } 1,10\text{PP} + 1,5\text{V}$$

$$\text{HC 18) } 0,9\text{PP} + 1,5\text{V}$$

$$\text{HC 15) } 1,10\text{PP} + 1,5\text{V} + 0,7 \cdot 1,5 \cdot \text{SC}$$

$$\text{HC 21) } 0,9\text{PP} + 1,5\text{V} + 0,7 \cdot 1,5 \cdot \text{SC}$$

Tras el análisis de estas hipótesis, se comprueba que la más desfavorable es la hipótesis 12. En la siguiente figura se muestran los esfuerzos que aparecen en el depósito bajo esta combinación de cargas:

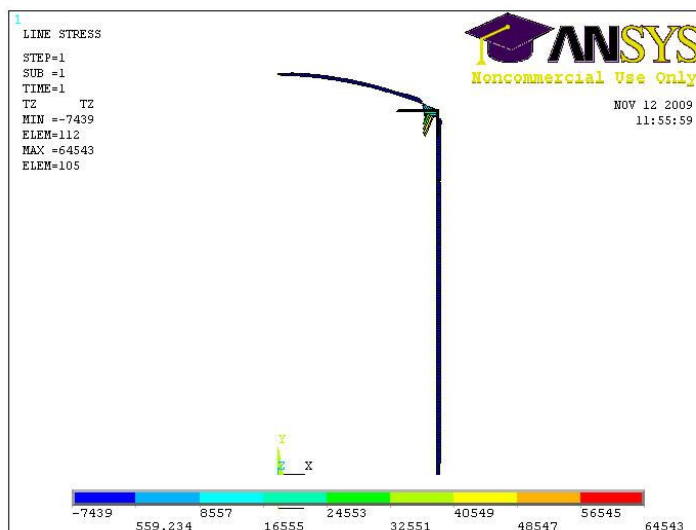


Fig 5.13: Esfuerzos circunferenciales en el depósito

Los cálculos necesarios para la comprobación de pandeo en esta dirección se muestran en el Anexo 5. En la siguiente tabla se resumen las tensiones de compresión que aparecen en cada una de las virolas, así como el valor de diseño de la resistencia a pandeo circunferencial:

Zona	$\sigma_{\theta,Ed}$ (Pa)	$\sigma_{\theta,Rd}$ (Pa)	Ratio de aprovechamiento
1ª virola	1,063E+06	1,95E+06	54,45%
2ª virola	7,734E+05	1,46E+06	52,86%
3ª virola	5,870E+05	1,05E+06	56,14%
4ª virola	4,389E+05	7,42E+05	59,12%
5ª virola	3,416E+05	5,67E+05	60,29%
6ª virola	2,795E+05	4,53E+05	61,69%
7ª virola	2,424E+05	3,92E+05	61,90%
8ª virola	2,114E+05	3,30E+05	64,14%
9ª virola	1,855E+05	2,83E+05	65,57%
10ª virola	1,660E+05	2,47E+05	67,27%

Tabla 5.8: Comprobación de estabilidad. Pandeo circunferencial

A diferencia del criterio de resistencia, ahora los ratios de aprovechamiento son mucho mayores. Se comprueba que los valores de los espesores de las virolas proporcionados por la norma ASME B96.1 hacen que el cuerpo cilíndrico verifique la comprobación de compresión circunferencial.

Compresión axial

Las cargas más desfavorables para el pandeo axial son las siguientes:

- Peso propio de la cubierta y de las virolas (PP)
- Sobrecarga de uso (SC)

Se comprueba que la hipótesis más desfavorable es la hipótesis compuesta 10:

$$HC\ 10) \quad 1,1PP + 1,5SC + 1 \cdot 1 \cdot PH + 0,6 \cdot 1,5 \cdot V$$

En la siguiente figura puede observarse la distribución de los esfuerzos que aparecen en esta dirección ante estas cargas:

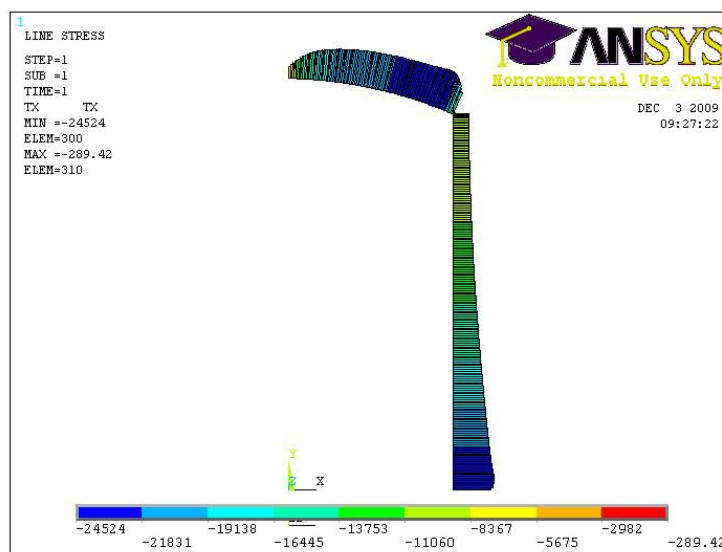


Fig 5.13: Esfuerzos axiales en el depósito

En la siguiente tabla se resumen las tensiones de compresión que aparecen en cada una de las virolas, así como el valor de diseño de la resistencia a pandeo axial:

<i>Zona</i>	$\sigma_{x,Ed}$ (Pa)	$\sigma_{x,Rd}$ (Pa)	<i>Ratio de aprovechamiento</i>
1ª virola	1,373E+06	5,03E+06	27,280%
2ª virola	1,139E+06	7,12E+06	15,993%
3ª virola	9,249E+05	1,05E+07	8,828%
4ª virola	7,648E+05	1,52E+07	5,030%
5ª virola	6,830E+05	2,01E+07	3,406%
6ª virola	6,403E+05	2,49E+07	2,573%
7ª virola	6,404E+05	2,85E+07	2,251%
8ª virola	6,291E+05	3,31E+07	1,903%
9ª virola	6,279E+05	3,75E+07	1,677%
10ª virola	6,288E+05	4,16E+07	1,512%

Tabla 5.9: Comprobación de estabilidad. Pandeo axial

La compresión en esta dirección presenta menores valores que en caso anterior, es por esto que se tiene una disminución del ratio de aprovechamiento de cada virola.

Los cálculos necesarios para esta comprobación se describen en el Anexo 5 de este capítulo.

### 5.8.2 Pandeo de la cubierta

#### Compresión circunferencial

Tras el estudio de las hipótesis compuestas, se verifica que la hipótesis más desfavorable para la compresión circunferencial de la cubierta es la número 8:

$$\text{HC 8)} \quad 0,9PP + PI + 1 \cdot 1 \cdot PH + 0,6 \cdot 1,5 \cdot V$$

Los esfuerzos que aparecen en la cubierta en la dirección circunferencial son:

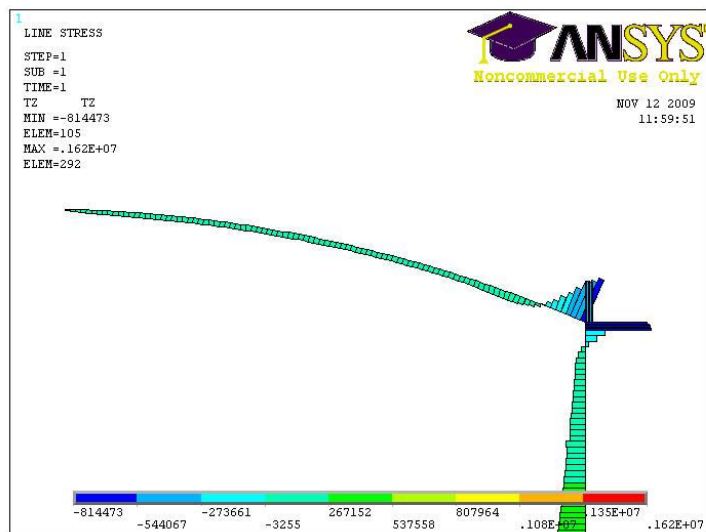


Fig 5.14: Esfuerzos circunferenciales en la cubierta

Resultando ser  $\sigma_{\theta,Ed} = 1,82E+07$ . Puesto que  $\sigma_{\theta,Rd} = 2,00E+07$ , como ya se verá en el Anexo 5 del capítulo, se tiene un ratio de aprovechamiento del 91,08%.

### Compresión axial

Se comprueba que la hipótesis más desfavorable es la hipótesis compuesta 10:

$$\text{HC 10)} \quad 1,1\text{PP} + 1,5\text{SC} + 1 \cdot 1 \cdot \text{PH} + 0,6 \cdot 1,5 \cdot \text{V}$$

En la siguiente figura puede observarse la distribución de los esfuerzos que aparecen en esta dirección ante estas cargas:

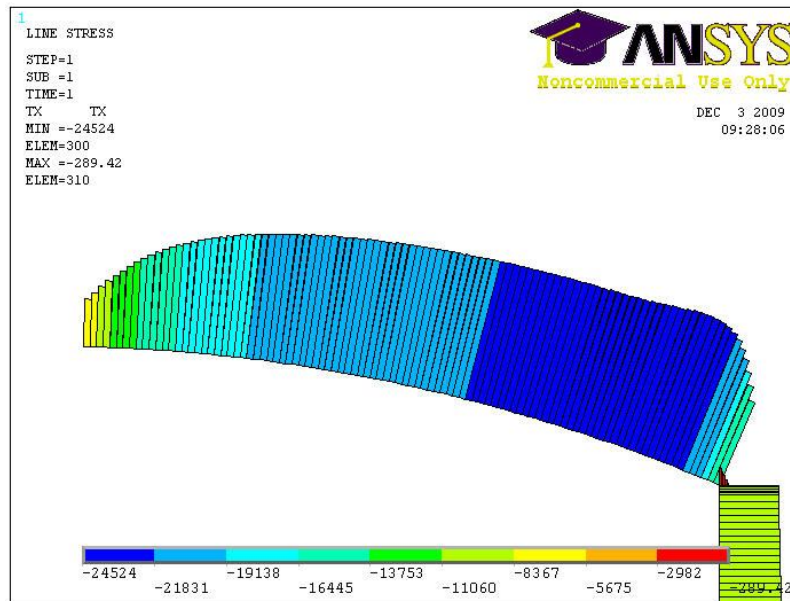


Fig 5.15: Esfuerzos axiales en la cubierta

Donde  $\sigma_{\varphi,Ed} = 1,16E+06$  y  $\sigma_{\gamma,Rd} = 2,00E+06$ . Por tanto, el ratio de aprovechamiento de esta parte del depósito y ante compresión axial es del 57,79%.

Con estas dos comprobaciones se verifica que la cubierta, como era de esperar, cumple también el criterio de estabilidad.

Los cálculos se detallan en el Anexo 5.

## 5.9 Solución óptima

Tras los análisis realizados se ha comprobado que las dimensiones proporcionadas por la norma ASME B96.1 no son los óptimos. Los mayores ratios de aprovechamiento aparecen en la cubierta (del orden del 90%). Es por ello que se plantea una disminución de los espesores de las virolas, puesto que esto conllevaría una reducción en el precio final de la estructura.

Por consiguiente se analiza la siguiente situación:

<b>Virola</b>	<b>Espesor (mm)</b>
<b>1</b>	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>7</b>
<b>3</b>	<b>10</b>
<b>4</b>	<b>14</b>
<b>5</b>	<b>18</b>
<b>6</b>	<b>22</b>
<b>7</b>	<b>25</b>
<b>8</b>	<b>29</b>
<b>9</b>	<b>33</b>
<b>10</b>	<b>37</b>

*Tabla 5.10: Espesores óptimos de las virolas*

Presentando la cubierta y el anillo de refuerzo las dimensiones anteriormente consideradas.

Se procede al análisis de la estructura ante el criterio de resistencia y de estabilidad.



### 5.9.1 Criterio de resistencia

La hipótesis más desfavorable en este caso sigue siendo la hipótesis compuesta 8:  $0,8 \cdot PP + PI + 1 \cdot 1,20 \cdot PH + 0,6 \cdot 1,5 \cdot V$ .

A continuación se listan los esfuerzos, las tensiones equivalentes y el ratio de aprovechamiento en esta nueva situación:

<i>Zona</i>	<i><math>\sigma</math> equivalente (Pa)</i>	<i>Ratio de aprovechamiento</i>
Cubierta	6,101E+07	25,42%
1ª virola	1,084E+08	45,15%
2ª virola	3,983E+07	16,60%
3ª virola	5,089E+07	21,20%
4ª virola	5,261E+07	21,92%
5ª virola	5,160E+07	21,50%
6ª virola	5,096E+07	21,23%
7ª virola	5,153E+07	21,47%
8ª virola	5,220E+07	21,75%
9ª virola	5,162E+07	21,51%
10ª virola	5,254E+07	21,89%

Tabla 5.11: Comprobación de resistencia

Se comprueba que aumenta el ratio de aprovechamiento de la estructura al disminuir el valor de los espesores de las virolas.

Los cálculos y la distribución de esfuerzos resultantes de esta comprobación se describen en el Anexo 6.

### 5.9.2 Criterio de estabilidad

Los cálculos efectuados para mostrar los resultados de este apartado y los esfuerzos obtenidos en cada caso se detallan en los Anexo 7, el cual corresponde al pandeo del cuerpo cilíndrico y al pandeo de la cubierta.

#### Pandeo del cuerpo cilíndrico

- Compresión circunferencial

Tras realizar el análisis ante un posible pandeo en la dirección circunferencial, se obtienen las siguientes tensiones y ratios de aprovechamiento:

<i>Zona</i>	$\sigma_{\theta,Ed}$ (Pa)	$\sigma_{\theta,Rd}$ (Pa)	<i>Ratio de aprovechamiento</i>
1ª virola	1,853E+06	2,85E+06	65,08%
2ª virola	1,313E+06	1,95E+06	67,28%
3ª virola	9,236E+05	1,29E+06	71,33%
4ª virola	6,544E+05	8,71E+05	75,14%
5ª virola	5,508E+05	6,44E+05	85,54%
6ª virola	4,438E+05	5,04E+05	88,02%
7ª virola	3,830E+05	4,31E+05	88,92%
8ª virola	3,306E+05	3,58E+05	92,30%
9ª virola	2,886E+05	3,05E+05	94,70%
10ª virola	2,560E+05	2,64E+05	97,05%

Tabla 5.12: Comprobación de estabilidad. Pandeo circunferencial

- Compresión axial

A modo de resumen, puesto que los cálculos realizados se describen en el Anexo 7 adjunto, se listan las tensiones que aparecen en el cuerpo y así como el ratio de aprovechamiento de cada una de las virolas:

<i>Zona</i>	$\sigma_{\theta,Ed}$ (Pa)	$\sigma_{\theta,Rd}$ (Pa)	<i>Ratio de aprovechamiento</i>
1ª virola	2,658E+06	3,12E+06	85,104%
2ª virola	1,333E+06	5,03E+06	26,502%
3ª virola	9,912E+05	8,21E+06	12,068%
4ª virola	7,659E+05	1,28E+07	5,976%
5ª virola	6,536E+05	1,76E+07	3,709%
6ª virola	5,928E+05	2,25E+07	2,637%
7ª virola	5,773E+05	2,61E+07	2,213%
8ª virola	5,578E+05	3,08E+07	1,812%
9ª virola	5,478E+05	3,53E+07	1,552%
10ª virola	5,423E+05	3,95E+07	1,371%

Tabla 5.13: Comprobación de estabilidad. Pandeo axial

### Pandeo de la cubierta

- Compresión circunferencial y axial

Las tensiones que se obtienen son respectivamente  $\sigma_{\theta,Ed} = 1,89E+06$ ,  $\sigma_{\phi,Ed} = 1,22E+06$  Pa. Conocida  $\sigma_{Rd} = 2,00E+06$  Pa, los ratios de aprovechamiento que se obtienen son del 94,41% y 78,21%.

## 5.10 Conclusiones

En este capítulo se comprueba que el depósito de partida, aquel obtenido mediante la norma americana ASME B96.1, es seguro ante los estados límite especificados por la norma EN-1999.

Sin embargo, los ratios de aprovechamiento de ciertas partes que componen el tanque de almacenamiento son demasiado bajos. Por ello se ha realizado un nuevo análisis de una estructura de dimensiones menores, en concreto una reducción de 2 mm en cada una de las virolas del depósito. Esta estructura también es segura y sin embargo da lugar a un mayor aprovechamiento del material.