

**ANEXO I:**  
**DISEÑO SEGÚN ASME B96.1.**  
**CRITERIO DE TENSION MÁXIMA**  
**ADMISIBLE**

## **Anexo I: Diseño según ASME. Criterio de tensión máxima admisible**

### **Índice**

1	Diseño de la cubierta.....	114
2	Diseño de la envolvente.....	119

## 1 Diseño de la cubierta

### I. Peso propio de la cubierta

En el siguiente croquis se representa la distribución de la carga debido al peso propio de las láminas que conforman el techo del depósito:

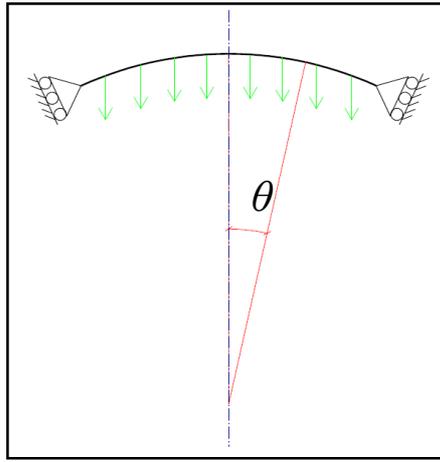


Fig A1.1.: Distribución de carga debido al peso propio de la estructura

La solución a este problema viene dada por los siguientes esfuerzos:

$$N_{\varphi}^I = \frac{R \cdot \gamma_{Al} \cdot h_i \cdot (\cos \theta - 1)}{\text{sen}^2 \theta}$$

$$N_{\theta}^I = \frac{R \cdot \gamma_{Al} \cdot h_i \cdot (1 - 2 \cos \theta + \cos^3 \theta)}{\text{sen}^2 \theta}$$

donde

$R$  : radio de curvatura de la lámina

$\gamma_{Al}$  : peso específico del aluminio EN-AW 6061-T6/T64

$h_i$  : espesor de la lámina incluyendo un sobreespesor de corrosión de 1mm

Particularizando para nuestro caso:

$$N_{\varphi}^I = 556.277 \frac{h_i (\cos \theta - 1)}{\text{sen}^2 \theta} N/m$$

$$N_{\theta}^I = 556.277 \frac{h_i \cdot (1 - 2 \cos \theta + \cos^3 \theta)}{\text{sen}^2 \theta} N/m$$

## II. Nieve y sobrecarga

Ambas cargas presentan la misma forma y distribución. Es por ello que ambas se incluyen en el mismo problema siendo el valor de la carga total la suma de las dos acciones.

$$\text{Así, } q = q_{\text{Sobrecarga}} + q_{\text{Nieve}} = 1,2 \text{ kPa}$$

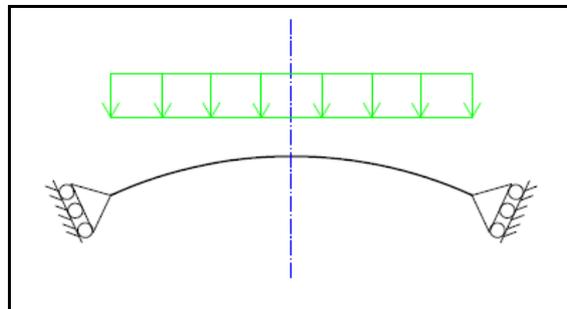


Fig A1.2: Distribución de carga debido a la carga de nieve y a la sobrecarga

Los esfuerzos de membrana que aparecen ante estas acciones son los siguientes:

$$N_{\varphi}^{II} = \frac{1}{2} \cdot \frac{R \cdot q \cdot (\cos^2 \theta - 1)}{\text{sen}^2 \theta}$$

$$N_{\theta}^{II} = \frac{1}{2} \cdot \frac{R \cdot q \cdot (1 - 3 \cos^2 \theta + 2 \cos^4 \theta)}{\text{sen}^2 \theta}$$

Sustituyendo valores:

$$N_{\varphi}^{II} = 12.600 \frac{(\cos^2 \theta - 1)}{\operatorname{sen}^2 \theta} N / m$$

$$N_{\theta}^{II} = 12.600 \frac{(1 - 3 \cos^2 \theta + 2 \cos^4 \theta)}{\operatorname{sen}^2 \theta} N / m$$

### III. Presión interna

El tanque está previsto que se inertice con gas a una presión máxima de 6 kPa, siendo ésta la presión interna de diseño.

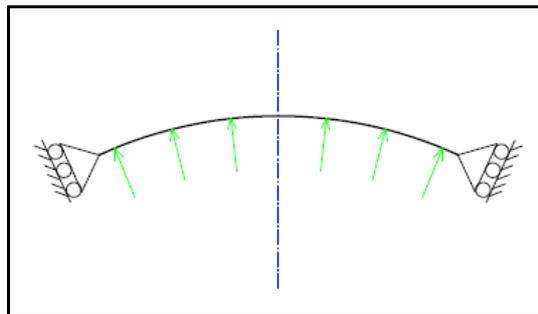


Fig A1.3: Distribución de carga debido a la presión interna

En los casos en que una lámina se encuentra sometida a una presión interna, los esfuerzos a los que da lugar la presión son los siguientes:

$$N_{\varphi}^{III} = \frac{R \cdot p_0}{2}$$

$$N_{\theta}^{III} = \frac{R \cdot p_0}{2}$$

donde

$p_0$  : presión interna de diseño

Sustituyendo valores, se obtienen los siguientes esfuerzos:

$$N_{\varphi}^{III} = 63.000N / m$$

$$N_{\theta}^{III} = 63.000N / m$$

### Cálculo de esfuerzos y de tensiones

Una vez calculados los esfuerzos provocados por cada una de las acciones que intervienen sobre el depósito podremos diseñar la cubierta teniendo en cuenta que en ningún caso se sobrepase la máxima tensión admisible del material.

Aplicando el Principio de Superposición se calculan los esfuerzos totales que aparecen en el techo del depósito:

$$N_{\theta} = N_{\theta}^I + N_{\theta}^{II} + N_{\theta}^{III}$$

$$N_{\varphi} = N_{\varphi}^I + N_{\varphi}^{II} + N_{\varphi}^{III}$$

Se calculan las tensiones que aparecen en la lámina:

$$\sigma_{\theta} = \frac{N_{\theta}}{h_f}$$

$$\sigma_{\varphi} = \frac{N_{\varphi}}{h_f}$$

donde

$h_f$  : espesor de la lámina sin incluir el sobreespesor de corrosión

Se toma como valor de referencia de las tensiones, el valor en los apoyos de la cubierta, ya que es la zona más crítica del problema.

Sustituimos para  $\theta = 24,6^\circ$ , obteniendo el valor máximo de las tensiones en la lámina en función del espesor:

$$\sigma_\varphi \Big|_{\theta=24,6^\circ} = \frac{-291.361 \cdot h_i + 50.400}{h_i - 0,001} Pa$$

$$\sigma_\theta \Big|_{\theta=24,6^\circ} = \frac{-214.426 \cdot h_i + 54.767}{h_i - 0,001} Pa$$

A priori se desconoce el signo de estas tensiones y, por consiguiente, si nos encontramos ante tracción o compresión. Se analiza pues el signo de los esfuerzos que aparecen en la cubierta:

$$N_\varphi \Big|_{\theta=24,6^\circ} = (-291.361 \cdot h_i + 50.400) N / m$$

$$N_\theta \Big|_{\theta=24,6^\circ} = (-214.426 \cdot h_i + 54.767) N / m$$

Fácilmente se comprueba que para un valor del espesor  $h_i < 0,173 m$  los esfuerzos de membrana obtenidos son de tracción. Puesto que el orden de magnitud de los espesores de las láminas que conforman una cubierta es de milímetros, se llega a que en los extremos de la cubierta aparece tracción en ambas direcciones.

Para el diseño del techo del depósito basta con determinar el espesor  $h_i$  teniendo en cuenta que en ningún punto de la lámina se sobrepasa la máxima tensión admisible dada por el estándar ASME B96.1.

## 2 Diseño de la envolvente

### Virola 1

Se examinan los efectos de las cargas que aparecen en cada virola por separado.

- *Peso propio*

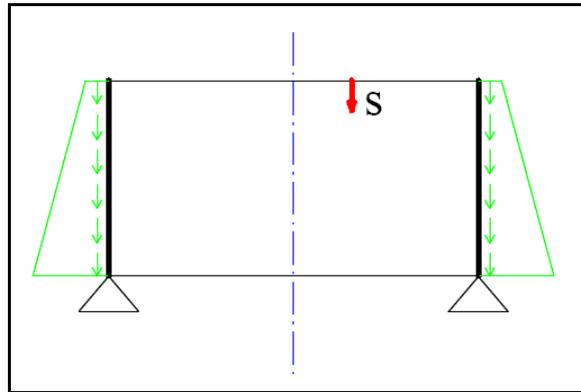


Fig A1.4: Distribución de carga debido al peso propio de la estructura

$$N_s^I = -\gamma_{Al} \cdot h_i \cdot s$$

$$N_\varphi^I = 0$$

donde

s: coordenada que recorre la longitud de la virola

Así,

$$N_s^I = -26.487 \cdot h_i \cdot s \quad N/m$$

- *Presión hidrostática del líquido*

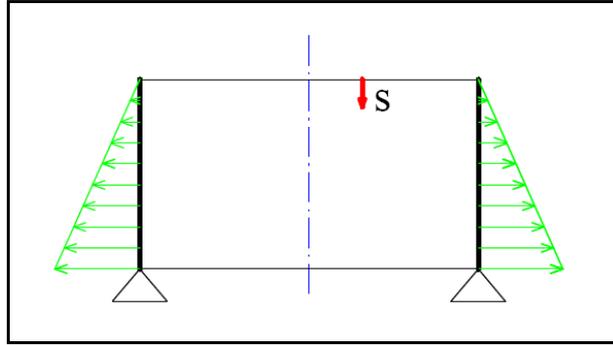


Fig A1.5: Distribución de carga debido a la presión hidrostática del líquido

$$N_s'' = 0$$

$$N_\varphi'' = \gamma_L \cdot L \cdot s$$

donde

$\gamma_L$  : peso específico del líquido

Como se detallo en el capítulo III  $\rho_L = 920 \text{kg} / \text{m}^3$  .

$L$  : radio del cilindro

En este caso  $L = 8,75$  m.

Sustituyendo los valores, obtenemos los esfuerzos debido a la presión que ejerce el líquido:

$$N_\varphi'' = 78.970,5 \cdot s \text{ N/m}$$

- *Presión interna*

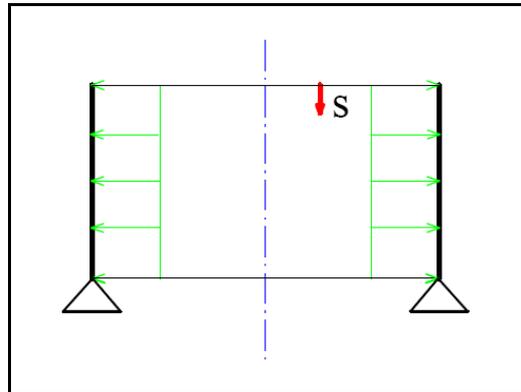


Fig A1.6: Distribución de carga debido a la presión interna

$$N_s^{III} = 0$$

$$N_\varphi^{III} = p_0 \cdot L$$

Por tanto, los esfuerzos que aparecen a causa de la presión interna son:

$$N_\varphi^{III} = 52.500 \text{ N/m}$$

- *Cargas de borde*

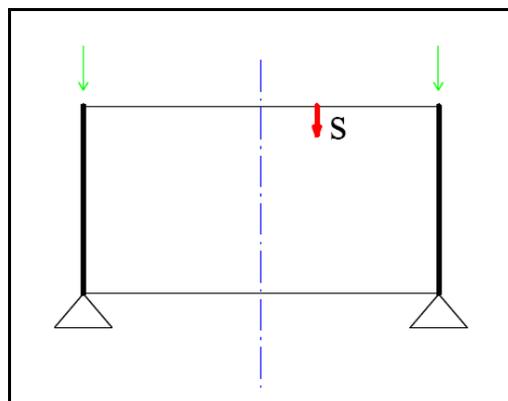


Fig A1.7: Cargas de borde

En esta primera virola, las cargas de borde aplicadas se deben exclusivamente a las reacciones transmitidas en la unión con la cubierta del depósito. Esta carga se calculó con anterioridad, dando lugar a:

$$N_s^{IV} = Y_{cubierta} = 20.617 \text{ N/m}$$

- *Cálculo de esfuerzos y tensiones*

Hallada la solución de cada uno de los problemas simples por separado procedemos al cálculo de los esfuerzos y de las tensiones en el conjunto de la virola:

$$N_{s_1} = (-26.487 \cdot h_i \cdot s + 20.617) \text{ N/m}$$

$$N_{\gamma_1} = (78.970,5 \cdot s + 52.500) \text{ N/m}$$

$$\sigma_{s_1} = \frac{N_{s_1}}{h_i - 0,001}$$

$$\sigma_{\gamma_1} = \frac{N_{\gamma_1}}{h_i - 0,001}$$

Se comprueba que, puesto que los esfuerzos varían linealmente con el parámetro  $s$ , las tensiones también lo harán. Así, los máximos valores de tensión se darán para  $s = 0$  en el caso de la tensión tangencial y para  $s = 2$  para la tensión circunferencial, obteniéndose los siguientes valores en función del espesor:

$$\sigma_{s_1} \Big|_{s=0} = \frac{20.617}{h_i - 0,001} \text{ Pa}$$

$$\sigma_{\gamma_1} \Big|_{s=2} = \frac{210.441}{h_i - 0,001} \text{ Pa}$$

De igual forma, dichas tensiones son positivas y, por tanto, nos encontramos con esfuerzos de tracción. Esto se cumple para un espesor  $h_i \leq 0,389 \text{ m}$  y teniendo en cuenta que el espesor comercial de chapas es del orden de milímetros/centímetros, se considera esta hipótesis válida.

- *Espesor de la virola*

Hallando el valor del espesor mínimo necesario para el caso más desfavorable, dónde la tensión toma el mayor valor, conociendo la máxima tensión admisible de la aleación y el factor de eficiencia de las uniones, se obtiene  $h_i \geq 5,49 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ .

Por tanto, para la virola superior del tanque de almacenamiento se tiene que el espesor mínimo para que cumpla el criterio de resistencia es:

$$h_i = 6 \text{ mm}$$

Se calculan finalmente las reacciones en el apoyo que se transmiten a la virola inferior:

$$Y_1 = N_{s_1} \Big|_{s=2} = 20.300 \text{ N / m}$$

Para cada una de las siguientes virolas el proceso es análogo. Para no resultar tedioso se obvian razonamientos descritos con anterioridad.

### Virola 2

- *Peso propio*

$$N_s^I = -26.487 \cdot h_i \cdot s \text{ N/m}$$

- *Presión hidrostática del líquido*

En este caso, como el nivel superior de líquido se encuentra en la virola anterior y para utilizar únicamente la variable  $s$ , se realizará un cambio de variables que permita expresar el esfuerzo debido a la presión hidrostática en función de  $s$ :

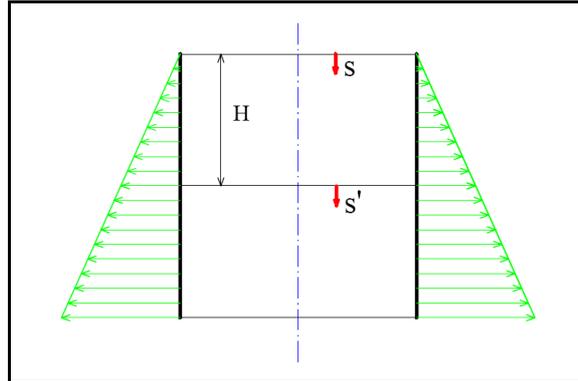


Fig A1.8: Distribución de cargas debido a la presión hidrostática

$$N_s^{II} = 0$$

$$N_\varphi^{II} = \gamma_L \cdot L \cdot s' = \gamma_L \cdot L \cdot (s + 2)$$

Sustituyendo los valores:

$$N_\varphi^{II} = 78.970,5 \cdot s + 157.941 \text{ N/m}$$

- *Presión interna*

$$N_\varphi^{III} = 52.500 \text{ N/m}$$

- *Cargas de borde*

En esta virola y en las siguientes, las cargas de borde se deberán a las reacciones transmitidas por la virola inmediatamente superior. Esta reacción fue calculada al final del diseño de la primera virola, resultando:

$$N_s^{IV} = Y_1 = 20.300 \text{ N/m}$$

- *Cálculo de esfuerzos y tensiones*

Aplicando el Principio de Superposición a la segunda virola del depósito:

$$N_{s_1} = (-26.487 \cdot h_i \cdot s + 20.300) \text{ N/m}$$

$$N_{\gamma_1} = (78.970,5 \cdot s + 210.441) \text{ N/m}$$

$$\sigma_{s_1} = \frac{N_{s_1}}{h_i - 0,001}$$

$$\sigma_{\gamma_1} = \frac{N_{\gamma_1}}{h_i - 0,001}$$

Realizando el mismo razonamiento anterior, se tiene que las tensiones máximas que aparecen en esta virola son:

$$\sigma_{s_1} \Big|_{s=0} = \frac{20.300}{h_i - 0,001} \text{ Pa}$$

$$\sigma_{\gamma_1} \Big|_{s=2} = \frac{368.382}{h_i - 0,001} \text{ Pa}$$

Se observa que la tensión circunferencial aumenta respecto al caso anterior. Esto se debe a que la columna de fluido se ve incrementada, por ello la presión hidrostática es mayor y, consecuentemente, el esfuerzo que aparece en la membrana debido a esta carga es mayor.

Sin embargo, la tensión tangencial se ve disminuida. Las cargas de borde son decrecientes con la longitud de lámina estudiada. Las reacciones transmitidas en la unión cubierta-envolvente, causantes de estas cargas, son resistidas por las láminas que conforman las distintas virolas del depósito.

- *Espesor de la virola*

Siguiendo bajo la hipótesis de esfuerzos de tracción, el espesor mínimo necesario es  $h_i = 8,86 \cdot 10^{-3}$

Por tanto, para esta segunda virola:

$$h_i = 9 \text{ mm}$$

Se calculan finalmente las reacciones en el apoyo que se transmiten a la virola inferior:

$$Y_2 = N_{s_2} \Big|_{s=2} = 19.820 \text{ N/m}$$

### Virola 3

- *Peso propio*

$$N_s^I = -26.487 \cdot h_i \cdot s \text{ N/m}$$

- *Presión hidrostática del líquido*

$$N_s^{II} = 0$$

$$N_\varphi^{II} = \gamma_L \cdot L \cdot s_1 = \gamma_L \cdot L \cdot (s + 4)$$

Sustituyendo los valores:

$$N_\varphi^{II} = 78.970,5 \cdot s + 315.882 \text{ N/m}$$

- *Presión interna*

$$N_\varphi^{III} = 52.500 \text{ N/m}$$

- *Cargas de borde*

$$N_s^{IV} = Y_2 = 19.820 \text{ N/m}$$

- *Cálculo de esfuerzos y tensiones*

Aplicando el Principio de Superposición:

$$N_{s_1} = (-26.487 \cdot h_i \cdot s + 19.820) \text{ N / m}$$

$$N_{\gamma_1} = (78.970,5 \cdot s + 368382) \text{ N / m}$$

$$\sigma_{s_1} = \frac{N_{s_1}}{h_i - 0,001}$$

$$\sigma_{\gamma_1} = \frac{N_{\gamma_1}}{h_i - 0,001}$$

Se tiene que las tensiones máximas que aparecen en esta virola son:

$$\sigma_{s_1} \Big|_{s=0} = \frac{19.820}{h_i - 0,001} Pa$$

$$\sigma_{\gamma_1} \Big|_{s=2} = \frac{526.323}{h_i - 0,001} Pa$$

- *Espesor de la virola*

Por tanto, para esta virola:

$$h_i = 12 \text{ mm}$$

Se calculan finalmente las reacciones en el apoyo que se transmiten a la virola inferior:

$$Y_3 = N_{s_3} \Big|_{s=2} = 19.180 N / m$$

#### Virola 4

- *Peso propio*

$$N_s^I = -26.487 \cdot h_i \cdot s \quad N/m$$

- *Presión hidrostática*

$$N_s^{II} = 0$$

$$N_\varphi^{II} = \gamma_L \cdot L \cdot s_1 = \gamma_L \cdot L \cdot (s + 6)$$

Sustituyendo los valores:

$$N_{\varphi}^{II} = 78.970,5 \cdot s + 473.823 \text{ N/m}$$

- *Presión interna*

$$N_{\varphi}^{III} = 52.500 \text{ N/m}$$

- *Cargas de borde*

$$N_s^{IV} = Y_3 = 19.120 \text{ N/m}$$

- *Cálculo de esfuerzos y tensiones*

$$N_{s_1} = (-26.487 \cdot h_i \cdot s + 19.120) \text{ N/m}$$

$$N_{\gamma_1} = (78.970,5 \cdot s + 526.323) \text{ N/m}$$

$$\sigma_{s_1} = \frac{N_{s_1}}{h_i - 0,001}$$

$$\sigma_{\gamma_1} = \frac{N_{\gamma_1}}{h_i - 0,001}$$

Tensiones máximas:

$$\sigma_{s_1} \Big|_{s=0} = \frac{19.120}{h_i - 0,001} \text{ Pa}$$

$$\sigma_{\gamma_1} \Big|_{s=2} = \frac{684.264}{h_i - 0,001} \text{ Pa}$$

- *Espesor de la virola*

Por tanto, para esta virola:

$$h_i = 16 \text{ mm}$$

Se calculan finalmente las reacciones en el apoyo que se transmiten a la virola inferior:

$$Y_4 = N_{s_4} \Big|_{s=2} = 18.270 \text{ N/m}$$

#### Virola 5

- *Peso propio*

$$N_s^I = -26.487 \cdot h_i \cdot s \text{ N/m}$$

- *Presión hidrostática del líquido*

$$N_s^{II} = 0$$

$$N_\varphi^{II} = \gamma_L \cdot L \cdot s_1 = \gamma_L \cdot L \cdot (s + 8)$$

Sustituyendo los valores:

$$N_\varphi^{II} = 78.970,5 \cdot s + 631.764 \text{ N/m}$$

- *Presión interna*

$$N_\varphi^{III} = 52.500 \text{ N/m}$$

- *Cargas de borde*

$$N_s^{IV} = Y_4 = 18.270 \text{ N/m}$$

- *Cálculo de esfuerzos y tensiones*

$$N_{s_1} = (-26.487 \cdot h_i \cdot s + 18.270) \text{ N/m}$$

$$N_{\gamma_1} = (78.970,5 \cdot s + 684.264) \text{ N/m}$$

$$\sigma_{s_1} = \frac{N_{s_1}}{h_i - 0,001}$$

$$\sigma_{\gamma_1} = \frac{N_{\gamma_1}}{h_i - 0,001}$$

Tensiones máximas:

$$\sigma_{s_1} \Big|_{s=0} = \frac{18.270}{h_i - 0,001} \text{ Pa}$$

$$\sigma_{\gamma_1} \Big|_{s=2} = \frac{842.205}{h_i - 0,001} \text{ Pa}$$

- *Espesor de la virola*

Por tanto, para esta virola:

$$h_i = 19 \text{ mm}$$

Se calculan finalmente las reacciones en el apoyo que se transmiten a la virola inferior:

$$Y_5 = N_{s_5} \Big|_{s=2} = 17.260 \text{ N/m}$$

Virola 6

- *Peso propio*

$$N_s^I = -26.487 \cdot h_i \cdot s \quad N/m$$

- *Presión hidrostática del líquido*

$$N_s^{II} = 0$$

$$N_\varphi^{II} = \gamma_L \cdot L \cdot s_1 = \gamma_L \cdot L \cdot (s+10)$$

Sustituyendo los valores:

$$N_\varphi^{II} = 78.970,5 \cdot s + 789.705 \quad N/m$$

- *Presión interna*

$$N_\varphi^{III} = 52.500 \quad N/m$$

- *Cargas de borde*

$$N_s^{IV} = Y_s = 17.260 \quad N/m$$

- *Cálculo de esfuerzos y tensiones*

$$N_{s_1} = (-26.487 \cdot h_i \cdot s + 17.260) \quad N/m$$

$$N_{\gamma_1} = (78.970,5 \cdot s + 842.205) \quad N/m$$

$$\sigma_{s_1} = \frac{N_{s_1}}{h_i - 0,001}$$

$$\sigma_{\gamma_1} = \frac{N_{\gamma_1}}{h_i - 0,001}$$

Tensiones máximas:

$$\sigma_{s_1} \Big|_{s=0} = \frac{17.260}{h_i - 0,001} Pa$$

$$\sigma_{\gamma_1} \Big|_{s=2} = \frac{1.000.146}{h_i - 0,001} Pa$$

- *Espesor de la virola*

Por tanto, para esta virola:

$$h_i = 22 \text{ mm}$$

Se calculan finalmente las reacciones en el apoyo que se transmiten a la virola inferior:

$$Y_6 = N_{s_6} \Big|_{s=2} = 16.100 N / m$$

### Virola 7

- *Peso propio*

$$N_s^I = -26.487 \cdot h_i \cdot s \quad N/m$$

- *Presión hidrostática del líquido*

$$N_s^{II} = 0$$

$$N_\varphi^{II} = \gamma_L \cdot L \cdot s_1 = \gamma_L \cdot L \cdot (s + 12)$$

Sustituyendo los valores:

$$N_\varphi^{II} = 78.970,5 \cdot s + 947.646 \quad N/m$$

- *Presión interna*

$$N_{\varphi}^{III} = 52.500 \text{ N/m}$$

- *Cargas de borde*

$$N_s^{IV} = Y_6 = 16.100 \text{ N/m}$$

- *Cálculo de esfuerzos y tensiones*

$$N_{s_1} = (-26.487 \cdot h_i \cdot s + 16.100) \text{ N/m}$$

$$N_{\gamma_1} = (78.970,5 \cdot s + 1.000.146) \text{ N/m}$$

$$\sigma_{s_1} = \frac{N_{s_1}}{h_i - 0,001}$$

$$\sigma_{\gamma_1} = \frac{N_{\gamma_1}}{h_i - 0,001}$$

Tensiones máximas:

$$\sigma_{s_1} \Big|_{s=0} = \frac{16.100}{h_i - 0,001} \text{ Pa}$$

$$\sigma_{\gamma_1} \Big|_{s=2} = \frac{1.158.087}{h_i - 0,001} \text{ Pa}$$

- *Espesor de la virola*

Por tanto, para esta virola:

$$h_i = 26 \text{ mm}$$

Se calculan finalmente las reacciones en el apoyo que se transmiten a la virola inferior:

$$Y_7 = N_{s_7} \Big|_{s=2} = 14.720 \text{ N/m}$$

### Virola 8

- *Peso propio*

$$N_s^I = -26.487 \cdot h_i \cdot s \text{ N/m}$$

- *Presión hidrostática del líquido*

$$N_s^{II} = 0$$

$$N_\varphi^{II} = \gamma_L \cdot L \cdot s_1 = \gamma_L \cdot L \cdot (s + 14)$$

Sustituyendo los valores:

$$N_\varphi^{II} = 78.970,5 \cdot s + 1.105.587 \text{ N/m}$$

- *Presión interna*

$$N_\varphi^{III} = 52.500 \text{ N/m}$$

- *Cargas de borde*

$$N_s^{IV} = Y_7 = 14.720 \text{ N/m}$$

- *Cálculo de esfuerzos y tensiones*

$$N_{s_1} = (-26.487 \cdot h_i \cdot s + 14.720) N / m$$

$$N_{\gamma_1} = (78.970,5 \cdot s + 1.158.087) N / m$$

$$\sigma_{s_1} = \frac{N_{s_1}}{h_i - 0,001}$$

$$\sigma_{\gamma_1} = \frac{N_{\gamma_1}}{h_i - 0,001}$$

Tensiones máximas:

$$\sigma_{s_1} \Big|_{s=0} = \frac{14.720}{h_i - 0,001} Pa$$

$$\sigma_{\gamma_1} \Big|_{s=2} = \frac{1.316.028}{h_i - 0,001} Pa$$

- *Espesor de la virola*

Por tanto, para esta virola:

$$h_i = 29 \text{ mm}$$

Se calculan finalmente las reacciones en el apoyo que se transmiten a la virola inferior:

$$Y_8 = N_{s_8} \Big|_{s=2} = 13.180 N / m$$

Virola 9

- *Peso propio*

$$N_s^I = -26.487 \cdot h_i \cdot s \quad N/m$$

- *Presión hidrostática del líquido*

$$N_s^{II} = 0$$

$$N_\varphi^{II} = \gamma_L \cdot L \cdot s_1 = \gamma_L \cdot L \cdot (s + 16)$$

Sustituyendo los valores:

$$N_\varphi^{II} = 78.970,5 \cdot s + 1.263.528 \quad N/m$$

- *Presión interna*

$$N_\varphi^{III} = 52.500 \quad N/m$$

- *Cargas de borde*

$$N_s^{IV} = Y_8 = 13.180 \quad N/m$$

- *Cálculo de esfuerzos y tensiones*

$$N_{s_1} = (-26.487 \cdot h_i \cdot s + 13.180) \quad N / m$$

$$N_{\gamma_1} = (78.970,5 \cdot s + 1.316.028) \quad N / m$$

$$\sigma_{s_1} = \frac{N_{s_1}}{h_i - 0,001}$$

$$\sigma_{\gamma_1} = \frac{N_{\gamma_1}}{h_i - 0,001}$$

Tensiones máximas:

$$\sigma_{s_1} \Big|_{s=0} = \frac{13.180}{h_i - 0,001} Pa$$

$$\sigma_{\gamma_1} \Big|_{s=2} = \frac{1.473.969}{h_i - 0,001} Pa$$

- *Espesor de la virola*

Por tanto, para esta virola:

$$h_i = 32 \text{ mm}$$

Se calculan finalmente las reacciones en el apoyo que se transmiten a la virola inferior:

$$Y_9 = N_{s_9} \Big|_{s=2} = 11.490 N / m$$

### Virola 10

- *Peso propio*

$$N_s^I = -26.487 \cdot h_i \cdot s \quad N/m$$

- *Presión hidrostática del líquido*

$$N_s^{II} = 0$$

$$N_\varphi^{II} = \gamma_L \cdot L \cdot s_1 = \gamma_L \cdot L \cdot (s+18)$$

Sustituyendo los valores:

$$N_{\varphi}^{II} = 78.970,5 \cdot s + 1.421.469 \text{ N/m}$$

- *Presión interna*

$$N_{\varphi}^{III} = 52.500 \text{ N/m}$$

- *Cargas de borde*

$$N_s^{IV} = Y_9 = 11.490 \text{ N/m}$$

- *Cálculo de esfuerzos y tensiones*

$$N_{s_1} = (-26.487 \cdot h_i \cdot s + 11.490) \text{ N/m}$$

$$N_{\gamma_1} = (78.970,5 \cdot s + 1.473.969) \text{ N/m}$$

$$\sigma_{s_1} = \frac{N_{s_1}}{h_i - 0,001}$$

$$\sigma_{\gamma_1} = \frac{N_{\gamma_1}}{h_i - 0,001}$$

Tensiones máximas:

$$\sigma_{s_1} \Big|_{s=0} = \frac{11.490}{h_i - 0,001} \text{ Pa}$$

$$\sigma_{\gamma_1} \Big|_{s=2} = \frac{1.631.910}{h_i - 0,001} \text{ Pa}$$

- *Espesor de la virola*

Por tanto, para esta virola se tiene:

$$h_i = 36 \text{ mm}$$