

CAPÍTULO 4

EJEMPLOS DE CÁLCULO DE DEPÓSITOS

4.1.- INTRODUCCIÓN

En el presente capítulo se presentan cuatro ejemplos de aplicación de los distintos criterios empleados en el cálculo de depósitos de agua, a fin de reforzar y clarificar al máximo las ideas expuestas en los dos capítulos anteriores.

Se trata de calcular de manera detallada y con todos los pasos necesarios la pared de un depósito rectangular de hormigón armado, la pared de un depósito cilíndrico de hormigón armado, la pared de un depósito cilíndrico de hormigón pretensado, y finalmente la solera de un depósito rectangular.

Se ha seguido el mismo desarrollo y consideraciones que figuraban en la exposición teórica anterior, a fin de establecer una total correspondencia entre la teoría y la práctica.

4.2.- EJEMPLO DE CÁLCULO DE LA PARED DE UN DEPÓSITO RECTANGULAR DE HORMIGÓN ARMADO

4.2.1.- Enunciado

Se pide calcular las paredes de un depósito rectangular enterrado de hormigón armado de medidas:

$a = b = 8,00$ m, para una altura de agua de $H_w = 4,00$ m. y un resguardo de 0,50 m.

La altura del relleno de tierras también es de $H_t = 4,00$ m., y sus características geotécnicas son las siguientes:

- Peso específico de las tierras: $\gamma_t = 19$ KN/m³
- Angulo de rozamiento interno de las tierras: $\phi = 27,50^\circ$

Dado que el resguardo solo representa un 10% de la altura total de la pared, proponemos simplificar el cálculo suponiendo que tanto el nivel de agua como el nivel de tierras llegan hasta la coronación del muro, con lo que $H = H_w = H_t = 4,0$ m.

El líquido contenido por el depósito es químicamente agresivo, lo que nos lleva a plantear la siguiente hipótesis de abertura máxima de fisura permitida:

- Por la cara interior, debido a la agresividad del líquido adoptaremos $w_{m\acute{a}x} = 0,1$ mm.
- Por la cara exterior, dado que el depósito está enterrado y por tanto, no habrá solicitaciones térmicas importantes, $w_{m\acute{a}x} = 0,2$ mm.

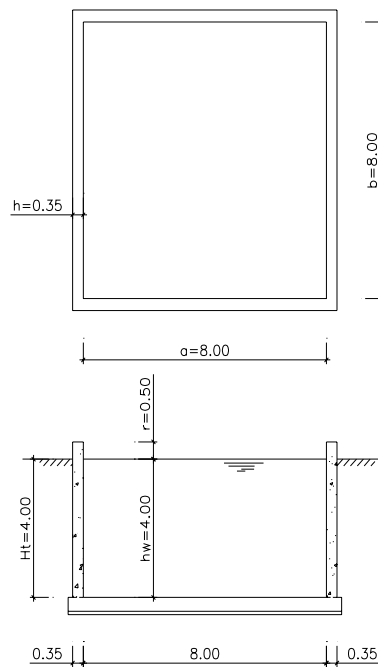


Figura 4.1.- Cálculo de la pared de un depósito rectangular de hormigón armado

4.2.2.- Datos preliminares

Proponemos un espesor de pared de $h = 0,35$ m.

Adoptaremos un hormigón del tipo HA-30/P/20/IV.

Esto supone tener:

$$f_{ck} = 30 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = \frac{30}{1,50} = 20 \text{ N/mm}^2 = 20.000.000 \text{ N/m}^2.$$

Adoptaremos unas armaduras pasivas del tipo B 500 S.

Esto supone tener:

$$f_{yk} = 500 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s} = \frac{500}{1,15} = 435 \text{ N/mm}^2 = 435.000.000 \text{ N/m}^2.$$

Adoptaremos un recubrimiento de $c = 40$ mm.

4.2.3.- Acciones a considerar en el cálculo de la pared

- Empuje hidrostático: $q_h (x=0) = \gamma_w \cdot H_w = 10.000 \cdot 4,00 = 40.000 \text{ N/m}^2$.
- Empuje de tierras: $q_t (x=0) = \gamma_t \cdot \text{tg}^2(45^\circ - \phi/2) \cdot H_t = 19.000 \cdot \text{tg}^2(45 - 27,5/2) \cdot 4,00 = 27.985 \text{ N/m}^2$.

4.2.4.- Armaduras mínimas en las paredes

- Cara interior: $A_{v\text{mín}1} = A_{h\text{mín}1} = 0,0020 \cdot 100 \cdot 35 = 7,00 \text{ cm}^2 = 1\phi 12c/16 \text{ cm}$.
- Cara exterior: $A_{v\text{mín}2} = A_{h\text{mín}2} = 0,0015 \cdot 100 \cdot 35 = 5,25 \text{ cm}^2 = 1\phi 10c/15 \text{ cm}$.

4.2.5.- Cálculo de la pared en Estado Límite Último de flexión

- Combinación de acciones C1: 1,50x(Empuje hidrostático)

$$\gamma = \frac{a}{b(=H_w)} = \frac{8,00}{4,00} = 2,0 \text{ (Tablas de Richard Bares) (*)}$$

$$q_{hd} = \gamma_f \cdot q_h = 1,50 \cdot 40.000 = 60.000 \text{ N/m}^2$$

$$M_{x1d}^o = -0,01610 \cdot q_{hd} \cdot a^2 = -0,01610 \cdot 60.000 \cdot (8,00)^2 = -61.824 \text{ N}\cdot\text{m/m. (hor, int.)}$$

$$M_{x6d}^o = +0,00690 \cdot q_{hd} \cdot a^2 = +0,00690 \cdot 60.000 \cdot (8,00)^2 = +26.496 \text{ N}\cdot\text{m/m (hor, ext)}$$

$$M_{y28d}^o = -0,0845 \cdot q_{hd} \cdot H_w^2 = -0,0845 \cdot 60.000 \cdot (4,00)^2 = -81.120 \text{ N}\cdot\text{m/m. (vertical, int.)}$$

$$M_{y14d}^o = +0,0159 \cdot q_{hd} \cdot H_w^2 = +0,0159 \cdot 60.000 \cdot (4,00)^2 = +15.264 \text{ N}\cdot\text{m/m. (vert, ext.)}$$

- Combinación de acciones C2: 1,60x(Empuje de tierras)

$$\gamma = \frac{a}{b(=H_{\omega})} = \frac{8,00}{4,00} = 2,0 \text{ (Tablas de Richard Bares)}$$

$$q_{td} = \gamma_f q_t = 1,60 \cdot 27.985 = 44.776 \text{ N/m}^2.$$

$$M_{x1d}^t = -0,01610 \cdot q_{td} \cdot a^2 = -0,01610 \cdot 44.776 \cdot (8,00)^2 = -46.137 \text{ N}\cdot\text{m/m. (hor, lado ext.)}$$

$$M_{x6d}^t = +0,00690 \cdot q_{td} \cdot a^2 = +0,00690 \cdot 44.776 \cdot (8,00)^2 = +19.773 \text{ N}\cdot\text{m/m (hor, int.)}$$

$$M_{y28d}^t = -0,0845 \cdot q_{td} \cdot H_t^2 = -0,0845 \cdot 44.776 \cdot (4,00)^2 = -60.537 \text{ N}\cdot\text{m/m. (vertical, ext.)}$$

$$M_{y14d}^t = +0,0159 \cdot q_{td} \cdot H_t^2 = +0,0159 \cdot 44.776 \cdot (4,00)^2 = +11.391 \text{ N}\cdot\text{m/m. (vertical, int.)}$$

(*) Conviene no olvidar que en las paredes de depósitos rectangulares se cambia la ordenada vertical x por la y , así como el convenio de signos empleado para el resto de la tesina, a fin de facilitar el correcto uso de las tablas de Bares (1970).

- La envolvente de la ley de momentos flectores verticales del lado interior en la unión de las combinaciones C1 y C2 nos da:

$$\text{- En la parte superior: } M_{y14d}^t = +11.391 \text{ N}\cdot\text{m/m}$$

$$\mu = \frac{M_{y14d}^t}{b \cdot d^2 \cdot f_{cd}} = \frac{11.391}{1,00 \cdot (0,35 - 0,05)^2 \cdot 20.000.000} = 0,0063 \rightarrow \omega_{\min} = 0,04$$

$$A_{v1}^{\text{sup}} = \frac{\omega \cdot b \cdot d \cdot f_{cd}}{f_{yd}} = \frac{0,04 \cdot 1,00 \cdot 0,30 \cdot 20.000.000}{435.000.000} \cdot 10.000 = 5,52 \text{ cm}^2 = 1\emptyset 12\text{c}/20 \text{ cm.}$$

$$\text{- En la parte inferior: } M_{y28d}^{\omega} = -81.120 \text{ N}\cdot\text{m/m}$$

$$\mu = \frac{M_{y28d}^{\omega}}{b \cdot d^2 \cdot f_{cd}} = \frac{81.120}{1,00 \cdot (0,35 - 0,05)^2 \cdot 20.000.000} = 0,045 \rightarrow \omega = 0,047$$

$$A_{v1}^{\text{inf}} = \frac{\omega \cdot b \cdot d \cdot f_{cd}}{f_{yd}} = \frac{0,047 \cdot 1,00 \cdot 0,30 \cdot 20.000.000}{435.000.000} \cdot 10.000 = 6,48 \text{ cm}^2 = 1\emptyset 12\text{c}/17 \text{ cm.}$$

- La envolvente de la ley de momentos flectores verticales del lado exterior en la unión de las combinaciones C1 y C2 nos da:

$$\text{- En la parte superior: } M_{y14d}^{\omega} = +15.264 \text{ N}\cdot\text{m/m}$$

$$\mu = \frac{M_{y14d}^{\omega}}{b \cdot d^2 \cdot f_{cd}} = \frac{15.264}{1,00 \cdot (0,35 - 0,05)^2 \cdot 20.000.000} = 0,0085 \rightarrow \omega_{\text{mín}} = 0,04$$

$$A_{v3}^{\text{sup}} = \frac{\omega \cdot b \cdot d \cdot f_{cd}}{f_{yd}} = \frac{0,04 \cdot 1,00 \cdot 0,30 \cdot 20.000.000}{435.000.000} \cdot 10.000 = 5,52 \text{ cm}^2 = 1\emptyset 10\text{c}/14 \text{ cm.}$$

$$\text{- En la parte inferior: } M_{y28d}^t = -60.537 \text{ N}\cdot\text{m/m}$$

$$\mu = \frac{M_{y28d}^t}{b \cdot d^2 \cdot f_{cd}} = \frac{60.537}{1,00 \cdot (0,35 - 0,05)^2 \cdot 20.000.000} = 0,034 \rightarrow \omega_{\text{mín}} = 0,04$$

$$A_{v3}^{\text{inf}} = \frac{\omega \cdot b \cdot d \cdot f_{cd}}{f_{yd}} = \frac{0,04 \cdot 1,00 \cdot 0,30 \cdot 20.000.000}{435.000.000} \cdot 10.000 = 5,52 \text{ cm}^2 = 1\emptyset 10\text{c}/14 \text{ cm.}$$

- La envolvente de la ley de momentos flectores horizontales del lado interior en la unión de las combinaciones C1 y C2 nos da:

$$\text{- En la parte del empotramiento: } M_{x1d}^{\omega} = -61.824 \text{ N}\cdot\text{m/m}$$

$$\mu = \frac{M_{x1d}^{\omega}}{b \cdot d^2 \cdot f_{cd}} = \frac{61.824}{1,00 \cdot (0,35 - 0,05)^2 \cdot 20.000.000} = 0,034 \rightarrow \omega_{\text{mín}} = 0,04$$

$$A_{h1}^{emp} = \frac{\omega \cdot b \cdot d \cdot f_{cd}}{f_{yd}} = \frac{0,04 \cdot 1,00 \cdot 0,30 \cdot 20.000.000}{435.000.000} \cdot 10.000 = 5,52 \text{ cm}^2 = 1\emptyset 12\text{c}/20 \text{ cm.}$$

- En la parte central: $M_{x6d}^t = +19.773 \text{ N}\cdot\text{m/m}$

$$\mu = \frac{M_{x6d}^t}{b \cdot d^2 \cdot f_{cd}} = \frac{19.773}{1,00 \cdot (0,35 - 0,05)^2 \cdot 20.000.000} = 0,011 \rightarrow \omega_{\min} = 0,04$$

$$A_{h1}^{cent} = \frac{\omega \cdot b \cdot d \cdot f_{cd}}{f_{yd}} = \frac{0,04 \cdot 1,00 \cdot 0,30 \cdot 20.000.000}{435.000.000} \cdot 10.000 = 5,52 \text{ cm}^2 = 1\emptyset 12\text{c}/20 \text{ cm.}$$

- La envolvente de la ley de momentos flectores horizontales del lado exterior en la unión de las combinaciones C1 y C2 nos da:

- En la parte del empotramiento: $M_{x1d}^t = -46.137 \text{ N}\cdot\text{m/m}$

$$\mu = \frac{M_{x1d}^t}{b \cdot d^2 \cdot f_{cd}} = \frac{46.137}{1,00 \cdot (0,35 - 0,05)^2 \cdot 20.000.000} = 0,026 \rightarrow \omega_{\min} = 0,04$$

$$A_{h4}^{emp} = \frac{\omega \cdot b \cdot d \cdot f_{cd}}{f_{yd}} = \frac{0,04 \cdot 1,00 \cdot 0,30 \cdot 20.000.000}{435.000.000} \cdot 10.000 = 5,52 \text{ cm}^2 = 1\emptyset 10\text{c}/14 \text{ cm.}$$

- En la parte central: $M_{x6d}^{\omega} = +26.496 \text{ N}\cdot\text{m/m}$

$$\mu = \frac{M_{x6d}^{\omega}}{b \cdot d^2 \cdot f_{cd}} = \frac{26.496}{1,00 \cdot (0,35 - 0,05)^2 \cdot 20.000.000} = 0,015 \rightarrow \omega_{\min} = 0,04$$

$$A_{h4}^{cent} = \frac{\omega \cdot b \cdot d \cdot f_{cd}}{f_{yd}} = \frac{0,04 \cdot 1,00 \cdot 0,30 \cdot 20.000.000}{435.000.000} \cdot 10.000 = 5,52 \text{ cm}^2 = 1\emptyset 10\text{c}/14 \text{ cm.}$$

4.2.6.- Cálculo de la pared en Estado Límite Último de esfuerzo cortante

- Combinación de acciones C1: 1,50x(Empuje hidrostático)

$$\gamma = \frac{a}{b(=H_{\omega})} = \frac{8,00}{4,00} = 2,0 \text{ (Tablas de Richard Bares)}$$

$$q_{hd} = \gamma_f q_h = 1,50 \cdot 40.000 = 60.000 \text{ N/m}^2.$$

$$R_{x7d}^{\omega} = +0,1282 \cdot q_{hd} \cdot a = +0,1282 \cdot 60.000 \cdot 8,00 = +61.536 \text{ N/m.}$$

$$R_{y28d}^{\omega} = +0,4584 \cdot q_{hd} \cdot H_{\omega} = +0,4584 \cdot 60.000 \cdot 4,00 = +110.016 \text{ N/m.}$$

- Combinación de acciones C2: 1,60x(Empuje de tierras)

$$\gamma = \frac{a}{b(=H_{\omega})} = \frac{8,00}{4,00} = 2,0 \text{ (Tablas de Richard Bares)}$$

$$q_{td} = \gamma_f q_t = 1,60 \cdot 27.985 = 44.776 \text{ N/m}^2.$$

$$R_{x7d}^t = +0,1282 \cdot q_{td} \cdot a = +0,1282 \cdot 44.776 \cdot 8,00 = +45.922 \text{ N/m.}$$

$$R_{y28d}^t = +0,4584 \cdot q_{td} \cdot H_{\omega} = +0,4584 \cdot 44.776 \cdot 4,00 = +82.101 \text{ N/m.}$$

Adoptaremos el criterio de que el máximo esfuerzo cortante (en nuestro caso $R_{y28d}^{\omega} = +110.016 \text{ N/m}$) pueda ser absorbido por la contribución del hormigón V_{cu} :

$$V_{cu} = \left(0,12 \cdot \xi \cdot \sqrt[3]{100 \cdot \rho_l \cdot f_{ck}}\right) b_0 \cdot d \text{ (en N/m)}$$

siendo:

$$\xi = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} = 1 + \sqrt{\frac{200}{300}} = 1,816$$

$$\rho_l = \frac{A_s}{b_0 \cdot d} = \frac{100/15 \cdot 1,13}{100 \cdot 30} = 0,00251$$

$$f_{ck} = 30 \text{ N/mm}^2.$$

$$b_0 = 1.000 \text{ mm. (ancho unidad).}$$

$$d = 300 \text{ mm.}$$

$$\rightarrow V_{cu} = (0,12 \cdot 1,816 \cdot \sqrt[3]{100 \cdot 0,0025 \cdot 1 \cdot 30}) \cdot 1.000 \cdot 300 = 128.140 \text{ N/m.}$$

Al ser $R_{y28d}^{\omega} = 110.016 \text{ N/m} \leq V_{cu} = 128.140 \text{ N/m}$, no precisamos cercos y el espesor adoptado de pared es correcto.

4.2.7.- Cálculo de la pared en Estado Límite Último de tracción simple

- Combinación de acciones C3: 1,00x(Empuje hidrostático)

$$\frac{H_{\omega}}{a} = \frac{4,00}{8,00} = 0,50 \rightarrow \beta_p = 0,20$$

En la pared lado a, $N_{apd} = 1,00 \cdot \beta_p \cdot 1/2 \cdot \gamma_{\omega} \cdot H_{\omega}^2 \cdot b = 1,00 \cdot 0,20 \cdot 1/2 \cdot 10.000 \cdot (4,00)^2 \cdot 8,00 = 128.000 \text{ N.}$

Con lo que adoptando una tensión en el acero de $\sigma_s = 100 \text{ N/mm}^2$, obtendremos una armadura de:

$$A_{h3} = \frac{N_{apd}}{\sigma_s \cdot H_{\omega}} = \frac{128.000}{100 \cdot 4,00} \cdot \frac{1}{100} = 3,20 \text{ cm}^2.$$

4.2.8.- Comprobación de la pared en Estado Límite de fisuración

- Combinación de acciones C4: 1,00x(Empuje hidrostático)

$$M_{x1}^{\omega} = M_{x1d}^{\omega} / \gamma_f = -61.824 / 1,50 = -41.216 \text{ N}\cdot\text{m/m. (horizontal, lado interior).}$$

$$M_{x6}^{\omega} = M_{x6d}^{\omega} / \gamma_f = +26.496/1,50 = +17.664 \text{ N}\cdot\text{m/m. (horizontal, lado exterior).}$$

$$M_{y28}^{\omega} = M_{y28d}^{\omega} / \gamma_f = -81.120/1,50 = -54.080 \text{ N}\cdot\text{m/m. (vertical, lado interior).}$$

$$M_{y14}^{\omega} = M_{y14d}^{\omega} / \gamma_f = +15.264/1,50 = +10.176 \text{ N}\cdot\text{m/m. (vertical, lado exterior).}$$

- Combinación de acciones C5: 1,00x(Empuje de tierras)

$$M_{x1}^t = M_{x1d}^t / \gamma_f = -46.137/1,60 = -28.836 \text{ N}\cdot\text{m/m. (horizontal, lado exterior).}$$

$$M_{x6}^t = M_{x6d}^t / \gamma_f = +19.773/1,60 = +12.358 \text{ N}\cdot\text{m/m. (horizontal, lado interior).}$$

$$M_{y28}^t = M_{y28d}^t / \gamma_f = -60.537/1,60 = -37.836 \text{ N}\cdot\text{m/m. (vertical, lado exterior).}$$

$$M_{y14}^t = M_{y14d}^t / \gamma_f = +11.391/1,60 = +7.119 \text{ N}\cdot\text{m/m. (vertical, lado interior).}$$

- La envolvente de la ley de momentos flectores verticales del lado interior en la unión de las combinaciones C4 y C5 nos da:

$$\text{- En la parte superior: } M_{y14}^t = +7.119 \text{ N}\cdot\text{m/m}$$

$$A_{v1}^{\text{sup}} = 1\emptyset 12\text{c}/20 \text{ cm.}$$

La abertura de fisura es: $w_k = \beta \cdot s_m \cdot \varepsilon_{sm} = 1,64 \cdot 203,63 \cdot 0,00009276 = 0,03 \text{ mm} \leq 0,1 \text{ mm}$

→ OK!!

Por tanto, $A_{v2}^{\text{sup}} = 1\emptyset 12\text{c}/20 \text{ cm.}$

$$\text{- En la parte inferior: } M_{y28}^{\omega} = -54.080 \text{ N}\cdot\text{m/m}$$

$$A_{v1}^{\text{inf}} = 1\emptyset 12\text{c}/17 \text{ cm.}$$

La abertura de fisura es: $w_k = \beta \cdot s_m \cdot \varepsilon_{sm} = 1,64 \cdot 192,98 \cdot 0,00060806 = 0,19 \text{ mm} > 0,1 \text{ mm}$

→ NO!!

Debemos incrementar la armadura, y proponemos $A_{v2}^{\text{inf}} = 1\emptyset 12\text{c}/17 \text{ cm} + 1\emptyset 8\text{c}/17 \text{ cm, y}$

en este caso, la nueva abertura de fisura es: $w_k = \beta \cdot s_m \cdot \varepsilon_{sm} = 1,64 \cdot 151,75 \cdot 0,00042154 = 0,10 \text{ mm} \leq 0,1 \text{ mm} \rightarrow \text{OK!!}$

- La envolvente de la ley de momentos flectores verticales del lado exterior en la unión de las combinaciones C4 y C5 nos da:

- En la parte superior: $M_{y14}^{\omega} = +10.176 \text{ N}\cdot\text{m/m}$

$$A_{v3}^{\text{sup}} = 1\emptyset 10\text{c}/14 \text{ cm.}$$

La abertura de fisura es: $w_k = \beta \cdot s_m \cdot \varepsilon_{sm} = 1,64 \cdot 185,53 \cdot 0,00013231 = 0,04 \text{ mm} \leq 0,2 \text{ mm} \rightarrow \text{OK!!}$

Por tanto, $A_{v4}^{\text{sup}} = 1\emptyset 10\text{c}/14 \text{ cm.}$

- En la parte inferior: $M_{y28}^t = -37.836 \text{ N}\cdot\text{m/m}$

$$A_{v3}^{\text{inf}} = 1\emptyset 10\text{c}/14 \text{ cm.}$$

La abertura de fisura es: $w_k = \beta \cdot s_m \cdot \varepsilon_{sm} = 1,64 \cdot 185,53 \cdot 0,00049196 = 0,15 \text{ mm} \leq 0,2 \text{ mm} \rightarrow \text{OK!!}$

Por tanto, $A_{v4}^{\text{inf}} = 1\emptyset 10\text{c}/14 \text{ cm.}$

- La envolvente de la ley de momentos flectores horizontales del lado interior en la unión de las combinaciones C4 y C5 nos da:

- En la parte del empotramiento: $M_{x1}^{\omega} = -41.216 \text{ N}\cdot\text{m/m}$

$$A_{h1}^{\text{emp}} = 1\emptyset 12\text{c}/20 \text{ cm.}$$

La abertura de fisura es: $w_k = \beta \cdot s_m \cdot \varepsilon_{sm} = 1,64 \cdot 203,63 \cdot 0,00053707 = 0,18 \text{ mm} > 0,1 \text{ mm} \rightarrow \text{NO!!}$

Debemos incrementar la armadura, y proponemos $A_{h2}^{emp} = 1\emptyset12c/18 \text{ cm} + 1\emptyset6c/18 \text{ cm}$, y en este caso, la nueva abertura de fisura es: $w_k = \beta \cdot s_m \cdot \varepsilon_{sm} = 1,64 \cdot 165,02 \cdot 0,00038737 = 0,10 \text{ mm} \leq 0,1 \text{ mm} \rightarrow \text{OK!!}$

- En la parte central: $M_{x6}^t = +12.358 \text{ N}\cdot\text{m/m}$

$$A_{h1}^{cent} = 1\emptyset12c/20 \text{ cm.}$$

La abertura de fisura es: $w_k = \beta \cdot s_m \cdot \varepsilon_{sm} = 1,64 \cdot 203,63 \cdot 0,00016103 = 0,05 \text{ mm} \leq 0,1 \text{ mm} \rightarrow \text{OK!!}$

Por tanto, $A_{h2}^{cent} = 1\emptyset12c/20 \text{ cm.}$

- La envolvente de la ley de momentos flectores horizontales del lado exterior en la unión de las combinaciones C4 y C5 nos da:

- En la parte del empotramiento: $M_{x1}^t = -28.836 \text{ N}\cdot\text{m/m}$

$$A_{h4}^{emp} = 1\emptyset10c/14 \text{ cm.}$$

La abertura de fisura es: $w_k = \beta \cdot s_m \cdot \varepsilon_{sm} = 1,64 \cdot 185,53 \cdot 0,00037495 = 0,11 \text{ mm} \leq 0,2 \text{ mm} \rightarrow \text{OK!!}$

Por tanto, $A_{h5}^{emp} = 1\emptyset10c/14 \text{ cm.}$

- En la parte central: $M_{x6}^o = +17.664 \text{ N}\cdot\text{m/m}$

$$A_{h4}^{cent} = 1\emptyset10c/14 \text{ cm.}$$

La abertura de fisura es: $w_k = \beta \cdot s_m \cdot \varepsilon_{sm} = 1,64 \cdot 185,53 \cdot 0,00022968 = 0,07 \text{ mm} \leq 0,2 \text{ mm} \rightarrow \text{OK!!}$

Por tanto, $A_{h5}^{cent} = 1\emptyset10c/14 \text{ cm.}$

4.2.9.- Disposición de armaduras en la pared del depósito

i) Armadura de la pared en la posición vertical interior:

- En la parte superior = $\max(A_{v1}^{\text{sup}}; A_{v2}^{\text{sup}}; A_{\text{vmin1}}) = \max(1\emptyset12\text{c}/20 \text{ cm}; 1\emptyset12\text{c}/20 \text{ cm}; 1\emptyset12\text{c}/16 \text{ cm}) \approx \mathbf{1\emptyset12\text{c}/15 \text{ cm}}$.

- En la parte inferior = $\max(A_{v1}^{\text{inf}}; A_{v2}^{\text{inf}}; A_{\text{vmin1}}) = \max(1\emptyset12\text{c}/17 \text{ cm}; 1\emptyset12\text{c}/17 \text{ cm} + 1\emptyset8\text{c}/17 \text{ cm}; 1\emptyset12\text{c}/16 \text{ cm}) \approx \mathbf{1\emptyset12\text{c}/15 \text{ cm} + 1\emptyset8\text{c}/15 \text{ cm}}$ (refuerzo inferior interior).

ii) Armadura de la pared en la posición vertical exterior:

- En la parte superior = $\max(A_{v3}^{\text{sup}}; A_{v4}^{\text{sup}}; A_{\text{vmin2}}) = \max(1\emptyset10\text{c}/14 \text{ cm}; 1\emptyset10\text{c}/14 \text{ cm}; 1\emptyset10\text{c}/15 \text{ cm}) \approx \mathbf{1\emptyset10\text{c}/15 \text{ cm}}$.

- En la parte inferior = $\max(A_{v3}^{\text{inf}}; A_{v4}^{\text{inf}}; A_{\text{vmin2}}) = \max(1\emptyset10\text{c}/14 \text{ cm}; 1\emptyset10\text{c}/14 \text{ cm}; 1\emptyset10\text{c}/15 \text{ cm}) \approx \mathbf{1\emptyset10\text{c}/15 \text{ cm}}$.

iii) Armadura de la pared en la posición horizontal interior:

- En la parte del empotramiento = $\max(A_{h1}^{\text{emp}}; A_{h2}^{\text{emp}}; A_{\text{hmin1}}) + A_{h3}/2 = \max(1\emptyset12\text{c}/20 \text{ cm}; 1\emptyset12\text{c}/18 \text{ cm} + 1\emptyset6\text{c}/18 \text{ cm}; 1\emptyset12\text{c}/16 \text{ cm}) + 3,20/2 \text{ cm}^2 \approx \mathbf{1\emptyset12\text{c}/15 \text{ cm} + 1\emptyset6\text{c}/15 \text{ cm}}$ (refuerzo lateral interior).

- En la parte central = $\max(A_{h1}^{\text{cent}}; A_{h2}^{\text{cent}}; A_{\text{hmin1}}) + A_{h3}/2 = \max(1\emptyset12\text{c}/20 \text{ cm}; 1\emptyset12\text{c}/20 \text{ cm}; 1\emptyset12\text{c}/16 \text{ cm}) + 3,20/2 \text{ cm}^2 \approx \mathbf{1\emptyset12\text{c}/15 \text{ cm}}$.

iv) Armadura de la pared en la posición horizontal exterior:

- En la parte del empotramiento = $\max(A_{h4}^{\text{emp}}; A_{h5}^{\text{emp}}; A_{\text{hmin2}}) + A_{h3}/2 = \max$

$$(1\emptyset10c/14 \text{ cm}; 1\emptyset10c/14 \text{ cm}; 1\emptyset10c/15 \text{ cm}) + 3,20/2 \text{ cm}^2 = \mathbf{1\emptyset12c/15 \text{ cm.}}$$

- En la parte central = $\text{máx}(A_{h4}^{cent}; A_{h5}^{cent}; A_{h\text{mín}2}) + A_{h3}/2 = \text{máx}(1\emptyset10c/14 \text{ cm};$
 $1\emptyset10c/14 \text{ cm}; 1\emptyset10c/15 \text{ cm}) + 3,20/2 \text{ cm}^2 = \mathbf{1\emptyset12c/15 \text{ cm.}}$

4.3.- EJEMPLO DE CÁLCULO DE LA PARED DE UN DEPÓSITO CILÍNDRICO DE HORMIGÓN ARMADO

4.3.1.- Enunciado

Se pide calcular la pared de un depósito cilíndrico enterrado de hormigón armado de medidas:

$R = 8,00$ m, para una altura de agua de $H_w = 4,00$ m.

La altura del relleno de tierras también es de $H_t = 4,00$ m., y sus características geotécnicas son las siguientes:

- Peso específico de las tierras: $\gamma_t = 19$ KN/m³
- Angulo de rozamiento interno de las tierras: $\phi = 27,50^\circ$

Dado que el resguardo solo representa un 10% de la altura total de la pared, proponemos simplificar el cálculo suponiendo que tanto el nivel de agua como el nivel de tierras llegan hasta la coronación del muro, con lo que $H = H_w = H_t = 4,0$ m.

El líquido contenido por el depósito es químicamente agresivo, lo que nos lleva a plantear la siguiente hipótesis de abertura máxima de fisura permitida:

- Por la cara interior, debido a la agresividad del líquido adoptaremos $w_{m\acute{a}x} = 0,1$ mm.
- Por la cara exterior, dado que el depósito está enterrado y por tanto, no habrá solicitaciones térmicas importantes, $w_{m\acute{a}x} = 0,2$ mm.

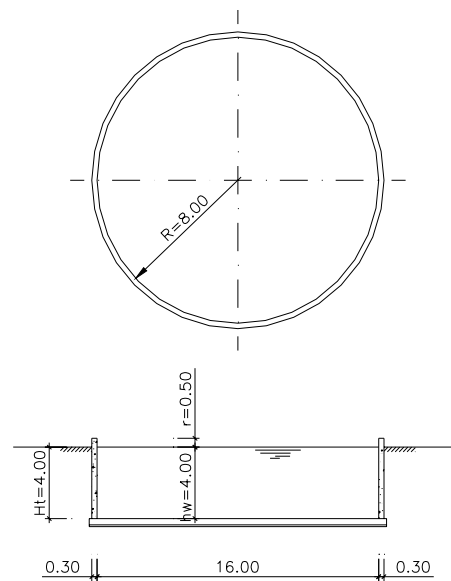


Figura 4.2.- Cálculo de la pared de un depósito cilíndrico de hormigón armado

4.3.2.- Datos preliminares

Proponemos un espesor de pared de $h = 0,30$ m.

Adoptaremos un hormigón del tipo HA-30/P/20/IV.

Esto supone tener:

$$f_{ck} = 30 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = \frac{30}{1,50} = 20 \text{ N/mm}^2 = 20.000.000 \text{ N/m}^2.$$

Adoptaremos unas armaduras pasivas del tipo B 500 S.

Esto supone tener:

$$f_{yk} = 500 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s} = \frac{500}{1,15} = 435 \text{ N/mm}^2 = 435.000.000 \text{ N/m}^2.$$

Adoptaremos un recubrimiento de $c = 40$ mm.

4.3.3.- Características mecánicas

ν : coeficiente de Poisson; $\nu = 0,20$.

E : módulo de deformación longitudinal del hormigón; $E = 8500 \cdot \sqrt[3]{f_{ck} + 8} = 8500 \cdot \sqrt[3]{30 + 8} = 28.576,79 \text{ N/mm}^2 = 28.576.790.000 \text{ N/m}^2$.

D : rigidez a flexión; $D = \frac{E \cdot h^3}{12 \cdot (1 - \nu^2)} = \frac{28.576.790.000 \cdot (0,30)^3}{12 \cdot (1 - 0,20^2)} = 66.976.852 \text{ N}\cdot\text{m}$

λ : coeficiente cilíndrico de forma; $\lambda = \sqrt[4]{\frac{3 \cdot (1 - \nu^2)}{R^2 \cdot h^2}} = \sqrt[4]{\frac{3 \cdot (1 - 0,20^2)}{(8,00)^2 \cdot (0,30)^2}} = 0,8409 \text{ m}^{-1}$

4.3.4.- Acciones a considerar en el cálculo de la pared

- Empuje hidrostático: $q_h (x=0) = \gamma_w \cdot H_w$
- Empuje de tierras: $q_t (x=0) = \gamma_t \cdot \text{tg}^2(45^\circ - \phi/2) \cdot H_t$

4.3.5.- Armaduras mínimas en las paredes

- Cara interior: $A_{v\text{mín}1} = A_{h\text{mín}1} = 0,0020 \cdot 100 \cdot 30 = 6,00 \text{ cm}^2 = 1\phi 12\text{c}/18,8 \text{ cm}$.
- Cara exterior: $A_{v\text{mín}2} = A_{h\text{mín}2} = 0,0015 \cdot 100 \cdot 30 = 4,50 \text{ cm}^2 = 1\phi 10\text{c}/17,5 \text{ cm}$.

4.3.6.- Cálculo de la pared del depósito en Estado Límite Último de flexión

- Combinación de acciones C1: $1,50x(\text{Empuje hidrostático})$

$$M_{xd}(x) = 1,50 \cdot M_x(x) = 1,50 \cdot \frac{h^2 \cdot \lambda^2 \cdot \gamma_w \cdot R^2}{6 \cdot (1 - \nu^2)} \cdot (-H_w \cdot e^{-\lambda x} \cdot \sin(\lambda x) + (H_w - \frac{1}{\lambda}) \cdot e^{-\lambda x} \cdot \cos(\lambda x))$$

y su valor máximo que se da en el empotramiento vale:

$$M_{xd\text{máx}} = M_{xd}(x=0) = 1,50 \cdot \frac{h^2 \cdot \lambda^2 \cdot \gamma_\omega \cdot R^2}{6 \cdot (1 - \nu^2)} \cdot \left(H_\omega - \frac{1}{\lambda} \right)$$

Se tantea con diferentes valores de la ordenada vertical x, encontrando el máximo momento flector positivo y el máximo momento flector negativo:

$$M_{xd}(x=0) = M_{xd,\text{inf}}^\omega = \frac{1,50 \cdot 0,30^2 \cdot 0,8409^2 \cdot 10.000 \cdot 8,00^2 \cdot (4,00 - 1/0,8409)}{6 \cdot (1 - 0,20^2)} = +29.813 \text{ N}\cdot\text{m/m (vertical, interior)}$$

$$M_{xd}(x=1,65) = M_{xd,\text{sup}}^\omega = -9.059 \text{ N}\cdot\text{m/m, (vertical, lado exterior).}$$

- Combinación de acciones C2: 1,60x(Empuje de tierras)

$$M_{xd}(x) = 1,60 \cdot \frac{h^2 \cdot \lambda^2 \cdot \gamma_t \cdot \text{tg}^2(45^\circ - \phi/2) \cdot R^2}{6 \cdot (1 - \nu^2)} \cdot \left(H_t \cdot e^{-\lambda x} \cdot \sin(\lambda x) + \left(\frac{1}{\lambda} - H_t \right) \cdot e^{-\lambda x} \cdot \cos(\lambda x) \right)$$

y su valor máximo que se da en el empotramiento vale:

$$M_{xd\text{máx}} = M_{xd}(x=0) = 1,60 \cdot \frac{h^2 \cdot \lambda^2 \cdot \gamma_t \cdot \text{tg}^2(45^\circ - \phi/2) \cdot R^2}{6 \cdot (1 - \nu^2)} \cdot \left(\frac{1}{\lambda} - H_t \right)$$

Se tantea con diferentes valores de la ordenada vertical x, encontrando:

$$M_{xd}(x=0) = M_{xd,\text{inf}}^t = \frac{1,60 \cdot 0,30^2 \cdot 0,8409^2 \cdot 19.000 \cdot \text{tg}^2(45^\circ - \frac{27,5^\circ}{2}) \cdot 8,00^2 \cdot (1/0,8409 - 4,00)}{6 \cdot (1 - 0,20^2)} = -22.248 \text{ N}\cdot\text{m/m (ver, ext).}$$

$$M_{xd}(x=1,65) = M_{xd,\text{sup}}^t = +6.761 \text{ N}\cdot\text{m/m, (vertical, lado interior).}$$

- La envolvente de la ley de momentos flectores verticales del lado interior en la unión de las combinaciones C1 y C2 nos da:

$$\text{- En la parte superior: } M_{xd,\text{sup}}^t = +6.761 \text{ N}\cdot\text{m/m}$$

$$\mu = \frac{M_{xd,sup}^t}{b \cdot d^2 \cdot f_{cd}} = \frac{6.761}{1,00 \cdot (0,30 - 0,05)^2 \cdot 20.000.000} = 0,0054 \rightarrow \omega_{\min} = 0,04$$

$$A_{vl}^{sup} = \frac{\omega \cdot b \cdot d \cdot f_{cd}}{f_{yd}} = \frac{0,04 \cdot 1,00 \cdot 0,25 \cdot 20.000.000}{435.000.000} \cdot 10.000 = 4,60 \text{ cm}^2 = 1\emptyset 12\text{c}/24,6 \text{ cm.}$$

- En la parte inferior: $M_{xd,inf}^{\omega} = +29.813 \text{ N}\cdot\text{m/m}$

$$\mu = \frac{M_{xd,inf}^{\omega}}{b \cdot d^2 \cdot f_{cd}} = \frac{29.813}{1,00 \cdot (0,30 - 0,05)^2 \cdot 20.000.000} = 0,024 \rightarrow \omega_{\min} = 0,04$$

$$A_{vl}^{inf} = \frac{\omega \cdot b \cdot d \cdot f_{cd}}{f_{yd}} = \frac{0,04 \cdot 1,00 \cdot 0,25 \cdot 20.000.000}{435.000.000} \cdot 10.000 = 4,60 \text{ cm}^2 = 1\emptyset 12\text{c}/24,6 \text{ cm.}$$

- La envolvente de la ley de momentos flectores verticales del lado exterior en la unión de las combinaciones C1 y C2 nos da:

- En la parte superior: $M_{xd,sup}^{\omega} = -9.059 \text{ N}\cdot\text{m/m}$

$$\mu = \frac{M_{xd,sup}^{\omega}}{b \cdot d^2 \cdot f_{cd}} = \frac{9.059}{1,00 \cdot (0,30 - 0,05)^2 \cdot 20.000.000} = 0,0072 \rightarrow \omega_{\min} = 0,04$$

$$A_{v3}^{sup} = \frac{\omega \cdot b \cdot d \cdot f_{cd}}{f_{yd}} = \frac{0,04 \cdot 1,00 \cdot 0,25 \cdot 20.000.000}{435.000.000} \cdot 10.000 = 4,60 \text{ cm}^2 = 1\emptyset 10\text{c}/17 \text{ cm.}$$

- En la parte inferior: $M_{xd,inf}^t = -22.248 \text{ N}\cdot\text{m/m}$

$$\mu = \frac{M_{xd,inf}^t}{b \cdot d^2 \cdot f_{cd}} = \frac{22.248}{1,00 \cdot (0,30 - 0,05)^2 \cdot 20.000.000} = 0,018 \rightarrow \omega_{\min} = 0,04$$

$$A_{v3}^{\text{inf}} = \frac{\omega \cdot b \cdot d \cdot f_{cd}}{f_{yd}} = \frac{0,04 \cdot 1,00 \cdot 0,25 \cdot 20.000.000}{435.000.000} \cdot 10.000 = 4,60 \text{ cm}^2 = 1\emptyset 10\text{c}/17 \text{ cm.}$$

4.3.7.- Cálculo de la pared en Estado Límite Último de esfuerzo cortante

- Combinación de acciones C1: 1,50x(Empuje hidrostático)

$$Q_{xd\text{máx}} = Q_{xd}(x=0) = 1,50 \cdot \frac{h^2 \cdot \lambda^3 \cdot \gamma_{\omega} \cdot R^2}{6 \cdot (1 - \nu^2)} \cdot \left(\frac{1}{\lambda} - 2H_{\omega} \right)$$

Se sustituye el valor de x=0 en la anterior ecuación, obteniendo:

$$Q_{xd}(x=0) = Q_{xd}^{\omega} = \frac{1,50 \cdot 0,30^2 \cdot 0,8409^3 \cdot 10.000 \cdot 8,00^2 \cdot (1/0,8409 - 2 \cdot 4,00)}{6 \cdot (1 - 0,20^2)} = -60.747 \text{ N/m.}$$

- Combinación de acciones C2: 1,60x(Empuje de tierras)

$$Q_{xd\text{máx}} = Q_{xd}(x=0) = 1,60 \cdot \frac{h^2 \cdot \lambda^3 \cdot \gamma_t \cdot \text{tg}^2(45^\circ - \phi/2) \cdot R^2}{6 \cdot (1 - \nu^2)} \cdot \left(2H_t - \frac{1}{\lambda} \right)$$

Se sustituye el valor de x=0 en la anterior ecuación, obteniendo:

$$Q_{xd}(x=0) = Q_{xd}^t = \frac{1,60 \cdot 0,30^2 \cdot 0,8409^3 \cdot 19.000 \cdot \text{tg}^2(45^\circ - \frac{27,5^\circ}{2}) \cdot 8,00^2 \cdot (2 \cdot 4,00 - 1/0,8409)}{6 \cdot (1 - 0,20^2)} = +45.333 \text{ N/m.}$$

Adoptaremos el criterio de que el máximo esfuerzo cortante (en nuestro caso $Q_{xd}^{\omega} = -60.747 \text{ N/m}$) pueda ser absorbido por la contribución del hormigón V_{cu} :

$$V_{cu} = \left(0,12 \cdot \xi \cdot \sqrt[3]{100 \cdot \rho_l \cdot f_{ck}} \right) b_0 \cdot d \quad (\text{en N/m})$$

siendo:

$$\xi = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} = 1 + \sqrt{\frac{200}{250}} = 1,894$$

$$\rho_l = \frac{A_s}{b_0 \cdot d} = \frac{100/18,81,13}{100 \cdot 25} = 0,0024$$

$$f_{ck} = 30 \text{ N/mm}^2.$$

$$b_0 = 1.000 \text{ mm. (ancho unidad).}$$

$$d = 250 \text{ mm.}$$

$$\rightarrow V_{cu} = \left(0,12 \cdot 1,894 \cdot \sqrt[3]{100 \cdot 0,0024 \cdot 30}\right) \cdot 1.000 \cdot 250 = 109.718 \text{ N/m.}$$

Al ser $Q_{xd}^{\omega} = 60.747 \text{ N/m} \leq V_{cu} = 109.718 \text{ N/m}$, no precisamos cercos y el espesor adoptado de pared es correcto.

4.3.8.- Cálculo de la pared en Estado Límite Último de tracción simple

- Combinación de acciones C3: 1,00x(Empuje hidrostático)

$$N_{\phi d}(x) = 1,00 \cdot N_{\phi}(x) = 1,00 \cdot \gamma_{\omega} \cdot R \cdot \left[e^{-\lambda x} \cdot \left(\frac{\sin(\lambda x)}{\lambda} - H_{\omega} \cdot (\cos(\lambda x) + \sin(\lambda x)) \right) + (H_{\omega} - x) \right]$$

Se tantea con diferentes valores de la ordenada vertical x , encontrando el máximo esfuerzo de tracción simple:

$$N_{\phi d}(x=2,05) = +125.059 \text{ N/m.}$$

Con lo que adoptando una tensión en el acero de $\sigma_s = 100 \text{ N/mm}^2$, obtendremos una armadura de:

$$A_{hl} = \frac{N_{\phi d}}{\sigma_s} = \frac{125.059}{100} \cdot \frac{1}{100} = 12,51 \text{ cm}^2.$$

4.3.9.- Comprobación de la pared en Estado Límite de fisuración

- Combinación de acciones C4: 1,00x(Empuje hidrostático)

$$M_{x,\text{inf}}^{\omega} = M_{xd,\text{inf}}^{\omega} / \gamma_f = +29.813/1,50 = +19.875 \text{ N}\cdot\text{m/m, (vertical, lado interior).}$$

$$M_{x,\text{sup}}^{\omega} = M_{xd,\text{sup}}^{\omega} / \gamma_f = -9.059/1,50 = -6.039 \text{ N}\cdot\text{m/m, (vertical, lado exterior).}$$

- Combinación de acciones C5: 1,00x(Empuje de tierras)

$$M_{x,\text{inf}}^t = M_{xd,\text{inf}}^t / \gamma_f = -22.248/1,60 = -13.905 \text{ N}\cdot\text{m/m, (vertical, lado exterior).}$$

$$M_{x,\text{sup}}^t = M_{xd,\text{sup}}^t / \gamma_f = +6.761/1,60 = +4.226 \text{ N}\cdot\text{m/m, (vertical, lado interior).}$$

- La envolvente de la ley de momentos flectores verticales del lado interior en la unión de las combinaciones C4 y C5 nos da:

$$\text{- En la parte superior: } M_{x,\text{sup}}^t = +4.226 \text{ N}\cdot\text{m/m}$$

$$A_{v1}^{\text{sup}} = 1\emptyset 12\text{c}/24,6 \text{ cm.}$$

La abertura de fisura es: $w_k = \beta \cdot s_m \cdot \varepsilon_{sm} = 1,64 \cdot 200,88 \cdot 0,00008161 = 0,03 \text{ mm} \leq 0,1 \text{ mm}$

→ OK!!

Por tanto, $A_{v2}^{\text{sup}} = 1\emptyset 12\text{c}/24,6 \text{ cm.}$

$$\text{- En la parte inferior: } M_{x,\text{inf}}^{\omega} = +19.875 \text{ N}\cdot\text{m/m}$$

$$A_{v1}^{\text{inf}} = 1\emptyset 12\text{c}/24,6 \text{ cm.}$$

La abertura de fisura es: $w_k = \beta \cdot s_m \cdot \varepsilon_{sm} = 1,64 \cdot 200,88 \cdot 0,00038383 = 0,13 \text{ mm} > 0,1 \text{ mm}$

→ NO!!

Debemos incrementar la armadura, y proponemos $A_{v2}^{\text{inf}} = 1\emptyset 12\text{c}/20 \text{ cm,}$ y en este caso, la

nueva abertura de fisura es: $w_k = \beta \cdot s_m \cdot \varepsilon_{sm} = 1,64 \cdot 191,68 \cdot 0,00031205 = 0,10 \text{ mm} \leq 0,1 \text{ mm} \rightarrow \text{OK!!}$

- La envolvente de la ley de momentos flectores verticales del lado exterior en la unión de las combinaciones C4 y C5 nos da:

- En la parte superior: $M_{x,\text{sup}}^o = -6.039 \text{ N}\cdot\text{m/m}$

$$A_{v3}^{\text{sup}} = 1\emptyset 10\text{c}/17 \text{ cm.}$$

La abertura de fisura es: $w_k = \beta \cdot s_m \cdot \varepsilon_{sm} = 1,64 \cdot 185,20 \cdot 0,00011481 = 0,03 \text{ mm} \leq 0,2 \text{ mm} \rightarrow \text{OK!!}$

Por tanto, $A_{v4}^{\text{sup}} = 1\emptyset 10\text{c}/17 \text{ cm.}$

- En la parte inferior: $M_{x,\text{inf}}^t = -13.905 \text{ N}\cdot\text{m/m}$

$$A_{v3}^{\text{inf}} = 1\emptyset 10\text{c}/17 \text{ cm.}$$

La abertura de fisura es: $w_k = \beta \cdot s_m \cdot \varepsilon_{sm} = 1,64 \cdot 185,20 \cdot 0,00026435 = 0,08 \text{ mm} \leq 0,2 \text{ mm} \rightarrow \text{OK!!}$

Por tanto, $A_{v4}^{\text{inf}} = 1\emptyset 10\text{c}/17 \text{ cm.}$

4.3.10.- Disposición de las armaduras en la pared del depósito

i) Armadura de la pared en la posición vertical interior:

- En la parte superior = $\text{máx}(A_{v1}^{\text{sup}}; A_{v2}^{\text{sup}}; A_{v\text{mín}1}) = \text{máx}(1\emptyset 12\text{c}/24,6 \text{ cm}; 1\emptyset 12\text{c}/24,6 \text{ cm}; 1\emptyset 12\text{c}/18,8 \text{ cm}) \approx \mathbf{1\emptyset 12\text{c}/15 \text{ cm.}}$

- En la parte inferior = $\text{máx}(A_{v1}^{\text{inf}}; A_{v2}^{\text{inf}}; A_{v\text{mín}1}) = \text{máx}(1\emptyset 12\text{c}/24,6 \text{ cm}; 1\emptyset 12\text{c}/20$

cm; $1\phi 12\text{c}/18,8\text{ cm}$) = **$1\phi 12\text{c}/15\text{ cm}$** .

ii) *Armadura de la pared en la posición vertical exterior:*

- En la parte superior = $\text{máx}(A_{v3}^{\text{sup}}; A_{v4}^{\text{sup}}; A_{v\text{mín}2}) = \text{máx}(1\phi 10\text{c}/17\text{ cm}; 1\phi 10\text{c}/17\text{ cm}; 1\phi 10\text{c}/17,5\text{ cm}) \approx$ **$1\phi 10\text{c}/15\text{ cm}$** .

- En la parte inferior = $\text{máx}(A_{v3}^{\text{inf}}; A_{v4}^{\text{inf}}; A_{v\text{mín}2}) = \text{máx}(1\phi 10\text{c}/17\text{ cm}; 1\phi 10\text{c}/17\text{ cm}; 1\phi 10\text{c}/17,5\text{ cm}) \approx$ **$1\phi 10\text{c}/15\text{ cm}$** .

iii) *Armadura de la pared en la posición horizontal interior:*

- $\text{máx}(A_{h1}/2; A_{h\text{mín}1}) = \text{máx}(12,51/2\text{ cm}^2; 1\phi 12\text{c}/18,8\text{ cm}) = 6,25\text{ cm}^2 \approx$ **$1\phi 12\text{c}/15\text{ cm}$** .

iv) *Armadura de la pared en la posición horizontal exterior:*

- $\text{máx}(A_{h1}/2; A_{h\text{mín}2}) = \text{máx}(12,51/2\text{ cm}^2; 1\phi 10\text{c}/17,5\text{ cm}) = 6,25\text{ cm}^2 \approx$ **$1\phi 12\text{c}/15\text{ cm}$** .

4.4.- EJEMPLO DE CÁLCULO DE LA PARED DE UN DEPÓSITO CILÍNDRICO DE HORMIGÓN PRETENSADO

4.4.1.- Enunciado

Se pide calcular la pared de un depósito cilíndrico semi-enterrado de hormigón pretensado de 12.000 m^3 de capacidad y una altura de agua de $H_0 = 8,00 \text{ m}$.

La unión entre la pared y la solera será monolítica. Se propone un espesor de pared de $h = 0,25 \text{ m}$, y un espesor de solera de $h_s = 0,18 \text{ m}$.

Se impone la obligación de que la pared tenga una tensión de compresión circunferencial de $\sigma_{\text{res}} = 0,5 \text{ N/mm}^2$.

La altura del relleno de tierras es de $H_t = 4,00 \text{ m}$, y sus características geotécnicas son las siguientes:

- Peso específico de las tierras: $\gamma_t = 19 \text{ KN/m}^3$
- Angulo de rozamiento interno de las tierras: $\phi = 27,50^\circ$

La explanada sobre la que apoya el depósito es de muy buena calidad, con un coeficiente de balasto de $k = 8,0 \text{ Kp/cm}^3$.

El líquido contenido por el depósito es químicamente agresivo, lo que nos lleva a plantear la siguiente hipótesis de abertura máxima de fisura permitida:

- Por la cara interior, debido a la agresividad del líquido adoptaremos $w_{\text{máx}} = 0,1 \text{ mm}$.
- Por la cara exterior, dado que el depósito está enterrado y por tanto, no habrá sollicitaciones térmicas importantes, $w_{\text{máx}} = 0,2 \text{ mm}$.

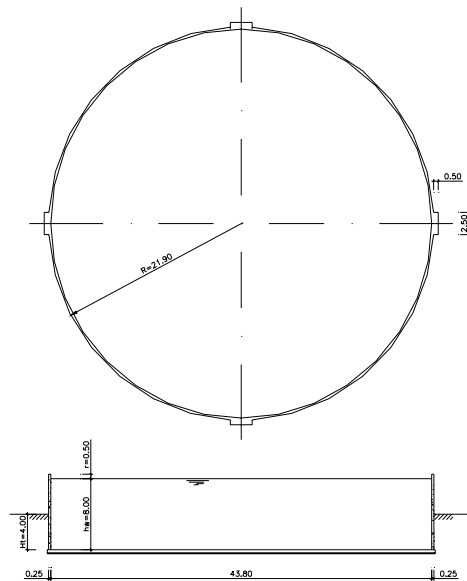


Figura 4.3.- Cálculo de la pared de un depósito cilíndrico de hormigón pretensado

4.4.2.- Datos preliminares

El radio del depósito será de: $R = \sqrt{\frac{V}{\pi \cdot H_w}} = \sqrt{\frac{12.000}{\pi \cdot 8,00}} = 21,9 \text{ m.}$

Adoptaremos un hormigón del tipo HA-35/P/20/IV.

Esto supone tener:

$$f_{ck} = 35 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = \frac{35}{1,50} = 23,33 \text{ N/mm}^2 = 23.330.000 \text{ N/m}^2.$$

Adoptaremos unas armaduras pasivas del tipo B 500 S.

Esto supone tener:

$$f_{yk} = 500 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s} = \frac{500}{1,15} = 435 \text{ N/mm}^2 = 435.000.000 \text{ N/m}^2.$$

Adoptaremos como armaduras activas cordones de 0,5" del tipo Y 1860 S7.

Esto supone tener:

$$D_{\text{cordón}} = 13,0 \text{ mm.}$$

$$A_{\text{cordón}} = 100 \text{ mm}^2.$$

$$P_0 = 139,5 \text{ KN (máxima fuerza que se puede aplicar a un cordón).}$$

$$f_{\text{pmáxk}} = 1.860 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{\text{pk}} \approx 1.674 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{\text{pd}} = \frac{f_{\text{pk}}}{\gamma_s} = \frac{1.674}{1,15} = 1.456 \text{ N/mm}^2 = 1.456.000.000 \text{ N/m}^2.$$

Finalmente, adoptaremos un recubrimiento de $c = 40 \text{ mm}$.

4.4.3.- Características mecánicas

ν : coeficiente de Poisson; $\nu = 0,20$.

E : módulo de deformación longitudinal del hormigón; $E = 8500 \cdot \sqrt[3]{f_{ck} + 8} = 8500 \cdot \sqrt[3]{35 + 8} = 29.778,88 \text{ N/mm}^2 = 29.778.880.000 \text{ N/m}^2$.

D : rigidez a flexión; $D = \frac{E \cdot h^3}{12 \cdot (1 - \nu^2)} = \frac{29.778.880.000 \cdot (0,25)^3}{12 \cdot (1 - 0,20^2)} = 40.390.195 \text{ N} \cdot \text{m}$

λ : coeficiente cilíndrico de forma; $\lambda = \sqrt[4]{\frac{3 \cdot (1 - \nu^2)}{R^2 \cdot h^2}} = \sqrt[4]{\frac{3 \cdot (1 - 0,20^2)}{(21,9)^2 \cdot (0,25)^2}} = 0,55674 \text{ m}^{-1}$

4.4.4.- Acciones a considerar en el cálculo de la pared

- Empuje hidrostático: $q_h (x=0) = \gamma_w \cdot H_w$
- Empuje de tierras: $q_t (x=0) = \gamma_t \cdot \text{tg}^2(45^\circ - \phi/2) \cdot H_t$
- Pretensado horizontal.

4.4.5.- Armaduras mínimas en las paredes

- Cara interior, armadura vertical: $A_{v\text{mín1}} = 0,0020 \cdot 100 \cdot 25 = 5,00 \text{ cm}^2 = 1\emptyset 10\text{c}/15,8 \text{ cm}$.
- Cara exterior, armadura vertical: $A_{v\text{mín2}} = 0,0015 \cdot 100 \cdot 25 = 3,75 \text{ cm}^2 = 1\emptyset 10\text{c}/21 \text{ cm}$.
- Caras interior y exterior, armadura horizontal: $A_{h\text{mín}} = 0,0008 \cdot 100 \cdot 25 = 2,00 \text{ cm}^2 = 1\emptyset 8\text{c}/25 \text{ cm}$.

4.4.6.- Cálculo de la armadura activa de la pared en la posición horizontal

Se debe buscar la función óptima de pretensado para poder determinar el volumen total de pretensado a disponer en la pared del depósito. La función óptima de pretensado se descompone en dos funciones:

i) *Función Hidrostática de Pretensado (FHP):*

$$P_{\text{tot,FHP}} = \frac{\gamma_{\omega} \cdot R \cdot H_{\omega}^2}{2} = \frac{10.000 \cdot 21,9 \cdot (8,00)^2}{2} = 7.008.000 \text{ N} = 7.008 \text{ KN}.$$

La forma de esta función es la de un trapecio truncado verticalmente en su base, donde:

- La base inferior mide B.
- La base superior mide $c_1 \cdot B = 0,01 \cdot B$ (ver tabla 2.9)
- La altura del tramo truncado mide $(1-e_1) \cdot H_{\omega} = (1-0,83) \cdot 8,00 = 1,36 \text{ m}$.

El área de esta figura me permite encontrar el valor de B:

$$B \cdot 1,36 + \frac{B + 0,01 \cdot B}{2} \cdot (8,00 - 1,36) = 7.008 \rightarrow B = 1.487 \text{ KN}$$

ii) *Función Uniforme de Pretensado (FUP):*

$$P_{\text{tot,FUP}} = \beta \cdot \sigma_{\text{res}} \cdot h \cdot H_{\omega}$$

La tabla 2.10 nos recomienda que en un depósito como el planteado:

- $\sigma_{\text{res}} = 1,0 \text{ N/mm}^2$. En nuestro caso prevalece el enunciado que fija un valor de $\sigma_{\text{res}} = 0,5 \text{ N/mm}^2$.

- $H_{\text{inf}} = 0,10 \cdot H_{\omega} = 0,10 \cdot 8,00 = 0,80 \text{ m}$.

- $\beta = 0,28 \cdot (D/H_{\omega}) + 0,38 = 0,28 \cdot (2 \cdot 21,9/8,0) + 0,38 = 0,28 \cdot 5,5 + 0,38 = 1,92$

Entonces,

$$P_{\text{tot,FUP}} = 1,92 \cdot 500.000 \cdot 0,25 \cdot 8,00 = 1.920.000 \text{ N} = 1.920 \text{ KN.}$$

La forma de esta función es un rectángulo en el tramo superior de pared de ancho $a_5 \cdot B' = 0,15 \cdot B'$ (ver tabla 2.12), y un triángulo en el tramo inferior de base B' y altura $a_1 \cdot H_{\omega} = 0,32 \cdot 8,00 = 2,56 \text{ m}$.

El área de esta figura me permite encontrar el valor de B' :

$$\frac{B' \cdot 2,56}{2} + 0,15 \cdot B' \cdot (8,00 - 2,56) = 1.920 \rightarrow B' = 916 \text{ KN}$$

4.4.7.- Pérdidas del pretensado

Proponemos usar tendones de pretensado compuestos por cinco cordones de 0,5". Cada tendón se podrá tesar con una fuerza máxima de $P_0 = 139,5 \cdot n = 139,5 \cdot 5 = 697,5 \approx 700 \text{ KN}$.

Adoptaremos tendones lubricados, con lo que según la Tabla 2.3 podemos adoptar:

- $\mu = 0,15 \text{ rad}^{-1}$
- $k = 0,0018 \text{ m}^{-1}$

Dado que se trata de un depósito de una capacidad superior a los 8.000 m^3 , proponemos disponer cuatro contrafuertes, con el trazado de los tendones a 180° y alternando los anclajes en alturas consecutivas.

Calculemos las pérdidas del pretensado:

i) *Pérdidas de fuerza por rozamiento:*

$$\Delta P_1(\alpha) = P_0 \cdot (1 - e^{-\mu \cdot \alpha - k \cdot \alpha \cdot R})$$

En nuestro caso,

$$\Delta P_{1\text{máx}} = \Delta P_1(\alpha=\pi/2) = 700 \cdot \left(1 - e^{-0,15 \cdot \frac{\pi}{2} - 0,0018 \cdot \frac{\pi}{2} \cdot 21,9} \right) = 180 \text{ KN.}$$

ii) *Pérdidas por penetración de cuña:*

$$\Delta P_2(\alpha=0) = 2 \cdot P_0 \cdot (1 - e^{-\mu \cdot \alpha_p - k \cdot \alpha_p \cdot R})$$

$$a = \frac{\Delta P_2 \cdot R \cdot \alpha_p}{2 \cdot E_p \cdot A_p}$$

$$5 \text{ mm} = 0,005 \text{ m} = \frac{2 \cdot 700 \cdot (1 - e^{-0,15 \cdot \alpha_p - 0,0018 \cdot \alpha_p \cdot 21,9}) \cdot 21,9 \cdot \alpha_p}{2 \cdot 190.000.000 \cdot \left(5 \cdot 100 \cdot \frac{1}{1.000.000} \right)} \rightarrow \alpha_p = 0,4128 \text{ rad}$$

$$\rightarrow \Delta P_2(\alpha=0) = 2 \cdot 700 \cdot (1 - e^{-0,15 \cdot 0,4128 - 0,0018 \cdot 0,4128 \cdot 21,9}) = 105 \text{ KN.}$$

iii) *Pérdidas por acortamiento elástico del hormigón:*

$$\Delta P_3 = 0,025 \cdot P_0 = 0,025 \cdot 700 = 17 \text{ KN.}$$

iv) *Pérdidas diferidas:*

$$\Delta P_{\text{dif}} = 0,10 \cdot (P_0 - (\Delta P_1 \cup \Delta P_2) - \Delta P_3)$$

Así pues,

La fuerza de pretensado inicial será $P_{ki} = P_0 - \text{mín}(\Delta P_1 \cup \Delta P_2) - \Delta P_3$

dónde: $\text{mín}(\Delta P_1 \cup \Delta P_2) = \Delta P_1(\alpha=0,4128) = 700 \cdot (1 - e^{-0,15 \cdot 0,4128 - 0,0018 \cdot 0,4128 \cdot 21,9}) = 53 \text{ KN}$

$\rightarrow P_{ki} = 700 - 53 - 17 = 630 \text{ KN}$.

La fuerza de pretensado final será $P_{k\infty} = 0,90 \cdot [P_0 - \text{máx}(\Delta P_1 \cup \Delta P_2) - \Delta P_3] = 0,90 \cdot [700 - 180 - 17] = 453 \text{ KN}$.

4.4.8.- Posición en altura de los tendones de pretensado

La Función Hidrostática de Pretensado (FHP) precisa de: $\frac{7.008}{453} = 15,5 \approx 16$ tendones.

Para conocer la distribución de los tendones en altura haremos uso del perfil trapecial truncado de base inferior $B=1.487 \text{ KN}$ que ya conocemos, y obtenemos:

Nº de tendón:	Ordenada x (m):	Nº de tendón:	Ordenada x (m):
1	0,15	12	2,60
2	0,45	13	3,00
3	0,75	14	3,40
5	1,05	16	3,90
6	1,35	17	4,40
7	1,65	18	5,00
9	1,95	19	5,80
10	2,25	21	6,95

Tabla 4.1.- Posición de los tendones en altura para la función F.H.P.

La Función Uniforme de Pretensado (FUP) precisa de: $\frac{1.920}{453} = 4,2 \approx 5$ tendones.

Para conocer la distribución de los tendones en altura haremos uso del perfil rectangular-triangular de base $B'=916 \text{ KN}$ que ya conocemos, y obtenemos:

Nº de tendón:	Ordenada x (m):	Nº de tendón:	Ordenada x (m):
4	0,95	15	3,80
8	1,80	20	6,70
11	2,35		

Tabla 4.2.- Posición de los tendones en altura para la función F.U.P.

Tanto el número de tendones requeridos como la separación entre unidades consecutivas ($<3 \cdot h$) indican que los tendones adoptados (con cinco cordones de 5") es adecuada.

4.4.9.- Cálculo de los coeficientes reductores en la interacción pared-solera-terreno

En el caso de considerar que la unión pared-solera no es un empotramiento perfecto, podemos hacer un análisis de interacción de la pared y la solera con el terreno.

- Para el empuje hidrostático:

$$M_{x(real)}^{\omega} = \eta_h \cdot M_{x(empotramientoperfecto)}^{\omega}$$

$$Q_{r(real)}^{\omega} = \xi_h \cdot Q_{x(empotramientoperfecto)}^{\omega}$$

- Para el pretensado circunferencial (en la función FHP):

$$M_{x(real)}^{Pk,FHP} = \eta_p \cdot M_{x(empotramientoperfecto)}^{Pk,FHP}$$

$$Q_{x(real)}^{Pk,FHP} = \xi_p \cdot Q_{x(empotramientoperfecto)}^{Pk,FHP}$$

siendo:

$$\eta_h = A \cdot e^{B \cdot (h_s)^C}$$

$$\xi_h = D \cdot e^{E \cdot (h_s)^F}$$

$$\eta_p = G \cdot e^{H \cdot (h_s)^I}$$

$$\xi_p = J \cdot e^{K \cdot (h_s)^L}$$

con:

$$A = \frac{1 + 2,27 \cdot e^{-1,26 \cdot k^{0,48}}}{0,97 - 3,46 \cdot 10^{-4} \cdot h^{1,99}} = \frac{1 + 2,27 \cdot e^{-1,26 \cdot (8,0)^{0,48}}}{0,97 - 3,46 \cdot 10^{-4} \cdot (25)^{1,99}} = 1,41$$

$$B = -(3,55 \cdot 10^{-2} + 4,38 \cdot 10^{-4} \cdot h)^{-1} = -(3,55 \cdot 10^{-2} + 4,38 \cdot 10^{-4} \cdot (25))^{-1} = -21,53$$

$$C = -3,08 + 0,66 \cdot h^{0,34} = -3,08 + 0,66 \cdot (25)^{0,34} = -1,11$$

$$\rightarrow \eta_h = A \cdot e^{B \cdot (h_s)^C} = 1,41 \cdot e^{-21,53 \cdot (18)^{-1,11}} = 0,59$$

$$D = \frac{1 + 12,58 \cdot e^{-3,81 \cdot k^{0,21}}}{0,52 + 0,20 \cdot h^{0,19}} = \frac{1 + 12,58 \cdot e^{-3,81 \cdot (8,0)^{0,21}}}{0,52 + 0,20 \cdot (25)^{0,19}} = 1,16$$

$$E = -(0,15 + 4,51 \cdot 10^{-4} \cdot h)^{-1} = -(0,15 + 4,51 \cdot 10^{-4} \cdot (25))^{-1} = -6,20$$

$$F = -2,33 + 0,76 \cdot h^{0,18} = -2,33 + 0,76 \cdot (25)^{0,18} = -0,97$$

$$\rightarrow \xi_h = D \cdot e^{E \cdot (h_s)^F} = 1,16 \cdot e^{-6,20 \cdot (18)^{-0,97}} = 0,80$$

$$G = \frac{3,78 \cdot e^{-2,32 \cdot k^{-0,0966}}}{0,63 - 3,90 \cdot 10^{-6} \cdot h^{2,91}} = \frac{3,78 \cdot e^{-2,32 \cdot (8,0)^{-0,0966}}}{0,63 - 3,90 \cdot 10^{-6} \cdot (25)^{2,91}} = 0,97$$

$$H = -(1,09 \cdot 10^{-2} + 8,62 \cdot 10^{-4} \cdot h)^{-1} = -(1,09 \cdot 10^{-2} + 8,62 \cdot 10^{-4} \cdot (25))^{-1} = -30,82$$

$$I = -3,57 + 0,90 \cdot h^{0,30} = -3,57 + 0,90 \cdot (25)^{0,30} = -1,21$$

$$\rightarrow \eta_p = G \cdot e^{H \cdot (h_s)^I} = 0,97 \cdot e^{-30,82 \cdot (18)^{-1,21}} = 0,38$$

$$J = \frac{4,05 \cdot e^{-1,86 \cdot k^{-0,0638}}}{0,52 + 1,96 \cdot 10^{-4} \cdot h^{1,88}} = \frac{4,05 \cdot e^{-1,86 \cdot (8,0)^{-0,0638}}}{0,52 + 1,96 \cdot 10^{-4} \cdot (25)^{1,88}} = 1,32$$

$$K = -(0,36 + 1,29 \cdot 10^{-3} \cdot h)^{-1} = -(0,36 + 1,29 \cdot 10^{-3} \cdot (25))^{-1} = -2,55$$

$$L = -1,05 + 0,51 \cdot h^{0,0539} = -1,05 + 0,51 \cdot (25)^{0,0539} = -0,44$$

$$\rightarrow \xi_p = J \cdot e^{K \cdot (h_s)^L} = 1,32 \cdot e^{-2,55 \cdot (18)^{-0,44}} = 0,65$$

4.4.10.- Cálculo del campo de esfuerzos en la pared

i) *Pared solicitada por el empuje hidrostático:*

Resolveremos el sistema de ecuaciones planteado en el anterior apartado 2.4.3.1.i, y aplicaremos a la base la reducción establecida con los coeficientes η_h y ξ_h . Disponemos de todos los datos para resolverlo, y obtenemos los siguientes resultados:

- Ley de esfuerzos axiales de tracción $N_\phi(x)$; de la que destacamos:

$$N_\phi(x=0) = 0 \text{ N/m}$$

$$N_{\phi\text{máx}} = N_\phi(x=3,50) = +899.141 \text{ N/m}$$

- Ley de momentos flectores $M_x(x)$; de la que destacamos:

$$M_{x,\text{inf}}^\omega = \eta_h \cdot M_x(x=0) = 0,59 \cdot 100.077 = +59.045 \text{ N}\cdot\text{m/m} \text{ (vertical, lado interior).}$$

$$M_{x,\text{sup}}^\omega = -27.168 \text{ N}\cdot\text{m/m} \text{ (vertical, lado exterior).}$$

- Ley de esfuerzos cortantes $Q_x(x)$; de la que destacamos:

$$Q_{x\text{máx}}^\omega = \xi_h \cdot Q_x(x=0) = 0,80 \cdot (-127.538) = -102.030 \text{ N/m}$$

ii) *Pared solicitada por el empuje de tierras con $H_t < H$:*

Resolveremos el sistema de ecuaciones planteado en el anterior apartado 2.4.3.3.i. Disponemos de todos los datos para resolverlo, y obtenemos los siguientes resultados:

- Ley de momentos flectores $M_x(x)$; de la que destacamos:

$$M_{x,\text{inf}}^t = M_x(x=0) = -23.569 \text{ N}\cdot\text{m/m} \text{ (vertical, lado exterior).}$$

$$M_{x,\text{sup}}^t = +7.427 \text{ N}\cdot\text{m/m} \text{ (vertical, lado interior).}$$

- Ley de esfuerzos cortantes $Q_x(x)$; de la que destacamos:

$$Q_{x\text{máx}}^t = Q_x(x=0) = +37.269 \text{ N/m}$$

iii) *Pared solicitada por el pretensado a tiempo inicial:*

Dado que nos encontramos en un caso en el que se considera la interacción de la pared-solera con el terreno, será preciso, tal como se ha explicado en el anterior apartado 2.4.16. resolver la unión de tres estados diferentes: FUP con empotramiento perfecto + FHP con empotramiento perfecto + FHP con el borde inferior solicitado por ΔM y ΔQ . Todo ello, considerando los tendones solicitados por la fuerza de pretensado inicial P_{ki} . Disponemos de todos los datos para resolverlo, y obtenemos:

- Ley de momentos flectores $M_x(x)$; de la que destacamos:

$$M_{x,\text{inf}}^{P_{ki}} = M_x(x=0) = -20.030 \text{ (FUP)} - 56.320 \text{ (FHP)} = -76.350 \text{ N}\cdot\text{m/m} \text{ (vertical, lado exterior).}$$

$$M_{x,\text{sup}}^{P_{ki}} = +22.500 \text{ (FUP)} + 45.700 \text{ (FHP)} = +68.200 \text{ N}\cdot\text{m/m} \text{ (vertical, lado interior).}$$

- Ley de esfuerzos cortantes $Q_x(x)$; de la que destacamos:

$$Q_{x\text{máx}}^{P_{ki}} = Q_x(x=0) = +30.040 \text{ (FUP)} + 121.410 \text{ (FHP)} = +151.450 \text{ N/m}$$

iv) *Pared solicitada por el pretensado a tiempo final:*

Estamos en un caso análogo al anterior, pero considerando los tendones solicitados por la fuerza de pretensado final $P_{k\infty}$. Disponemos de todos los datos para resolverlo, y obtenemos:

- Ley de momentos flectores $M_x(x)$; de la que destacamos:

$M_{x,\text{inf}}^{Pk\infty} = M_x(x=0) = -14.400 \text{ (FUP)} - 40.500 \text{ (FHP)} = -54.900 \text{ N}\cdot\text{m/m}$ (vertical, lado exterior).

$M_{x,\text{sup}}^{Pk\infty} = +16.180 \text{ (FUP)} + 32.860 \text{ (FHP)} = +49.040 \text{ N}\cdot\text{m/m}$ (vertical, lado interior).

- Ley de esfuerzos cortantes $Q_x(x)$; de la que destacamos:

$Q_{x\text{máx}}^{Pk\infty} = Q_x(x=0) = +21.600 \text{ (FUP)} + 87.300 \text{ (FHP)} = +108.900 \text{ N/m}$

4.4.11.- Comprobación de los axiles anulares

Una vez dibujadas las leyes de $N_\phi(x)$ y de $N_{\phi\text{pret},\infty}(x)$, se observa que las tensiones que provocan los axiles anulares son superiores a $0,5 \text{ N/mm}^2$ en toda la altura de la pared, excepto en el primer 4% de la misma. Por tanto, el pretensado propuesto cumple con la tensión residual establecida de $\sigma_{\text{res}} = 0,5 \text{ N/mm}^2$ y con que se permitan valores menores de esta tensión residual en un tramo de $H_{\text{inf}} = 0,10 \cdot H_0$.

4.4.12.- Secuencia de tesado

El hecho de ir calculando los campos de desplazamientos y esfuerzos para cada tendón de pretensado de manera individual, nos permite escoger la secuencia de tesado más conveniente, que nos garantice que los máximos esfuerzos correspondientes a una etapa genérica de tesado, no superen los valores de los esfuerzos una vez finalizada la puesta en tensión de todos los tendones.

4.4.13.- Comprobación de la pared en Estado Límite de Servicio (armadura activa horizontal)

Debemos ser capaces de encontrar la posición “e” de los tendones en el sentido radial, y

para ello resolveremos las combinaciones de acciones C6 y C7:

$$\sigma(x=x_i) = \frac{1,10 \cdot N_{ppret,i}(x=x_i)}{h} + \frac{1,10 \cdot 6 \cdot N_{ppret,i}(x=x_i) \cdot e}{h^2} > -0,60 \cdot f_{ckj}$$

$$\sigma(x=x_i) = \frac{0,90 \cdot N_{ppret,\infty}(x=x_i)}{h} - \frac{0,90 \cdot 6 \cdot N_{ppret,\infty}(x=x_i) \cdot e}{h^2} + \frac{N_{\varphi}(x=x_i)}{h} < 0$$

para cada uno de los 21 tendones, quedándonos con aquel que aporte un valor de la “e” más pequeño.

En nuestro caso esto sucede con el tendón número 13, que está situado en la ordenada $x_i=3,00$ m.

$$\sigma(x=3,00) = \frac{1,10 \cdot (-2.218.000)}{0,25} + \frac{1,10 \cdot 6 \cdot (-2.218.000) \cdot e}{0,25^2} = -0,60 \cdot 35.000.000 \rightarrow e = +0,048 \text{ m.}$$

$$\sigma(x=3,00) = \frac{0,90 \cdot (-1.595.000)}{0,25} - \frac{0,90 \cdot 6 \cdot (-1.595.000) \cdot e}{0,25^2} + \frac{874.283}{0,25} = 0 \rightarrow e = +0,016 \text{ m.}$$

Por tanto los tendones de pretensado se desplazaran del eje hacia el exterior en una magnitud igual a $e = +0,016 \text{ m} = 1,6 \text{ cm}$.

4.4.14.- Cálculo de la pared en Estado Límite Último de flexión (armadura pasiva vertical)

- Combinación de acciones C8: $1,35x(\text{Empuje hidrostático}) + 1,00x(\text{Esfuerzos adicionales debidos al pretensado a tiempo inicial ó a tiempo final})$

$$M_{xd,inf}^{\omega+p} = 1,35 \cdot M_{x,inf}^{\omega} + 1,00 \cdot M_{x,inf}^{Pk\infty} = 1,35 \cdot 59.045 + 1,00 \cdot (-54.900) = +24.811 \text{ N}\cdot\text{m/m}$$

(vertical, interior).

$$M_{xd,sup}^{\omega+p} = 1,35 \cdot M_{x,sup}^{\omega} + 1,00 \cdot M_{x,sup}^{Pk\infty} = 1,35 \cdot (-27.168) + 1,00 \cdot 49.040 = +12.363 \text{ N}\cdot\text{m/m}$$

(vertical, interior).

- Combinación de acciones C9: 1,50x(Empuje de tierras) + 1,00x(Esfuerzos adicionales debidos al pretensado a tiempo inicial ó a tiempo final)

$$M_{xd,inf}^{t+p} = 1,50 \cdot M_{x,inf}^t + 1,00 \cdot M_{x,inf}^{Pki} = 1,50 \cdot (-23.569) + 1,00 \cdot (-76.350) = -111.703 \text{ N}\cdot\text{m/m}$$

(vertical, exterior).

$$M_{xd,sup}^{t+p} = 1,50 \cdot M_{x,sup}^t + 1,00 \cdot M_{x,sup}^{Pki} = 1,50 \cdot 7.427 + 1,00 \cdot 68.200 = +79.340 \text{ N}\cdot\text{m/m}$$

(vertical, interior).

- La envolvente de la ley de momentos flectores verticales del lado interior en la unión de las combinaciones C8 y C9 nos da:

- En la parte superior: $M_{xd,sup}^{t+p} = +79.340 \text{ N}\cdot\text{m/m}$

$$\mu = \frac{M_{xd,sup}^{t+p}}{b \cdot d^2 \cdot f_{cd}} = \frac{79.340}{1,00 \cdot (0,25 - 0,05)^2 \cdot 23.330.000} = 0,085 \rightarrow \omega = 0,09$$

$$A_{v1}^{sup} = \frac{\omega \cdot b \cdot d \cdot f_{cd}}{f_{yd}} = \frac{0,09 \cdot 1,00 \cdot 0,20 \cdot 23.330.000}{435.000.000} \cdot 10.000 = 9,65 \text{ cm}^2 = 1\emptyset 16\text{c}/20,8 \text{ cm.}$$

- En la parte inferior: $M_{xd,inf}^{\omega+p} = +24.811 \text{ N}\cdot\text{m/m}$

$$\mu = \frac{M_{xd,inf}^{\omega+p}}{b \cdot d^2 \cdot f_{cd}} = \frac{24.811}{1,00 \cdot (0,25 - 0,05)^2 \cdot 23.330.000} = 0,026 \rightarrow \omega_{\min} = 0,04$$

$$A_{v1}^{inf} = \frac{\omega \cdot b \cdot d \cdot f_{cd}}{f_{yd}} = \frac{0,04 \cdot 1,00 \cdot 0,20 \cdot 23.330.000}{435.000.000} \cdot 10.000 = 4,30 \text{ cm}^2 = 1\emptyset 12\text{c}/26 \text{ cm.}$$

- La envolvente de la ley de momentos flectores verticales del lado exterior en la unión de las combinaciones C8 y C9 nos da:

- En la parte inferior: $M_{xd,inf}^{t+p} = -111.703 \text{ N}\cdot\text{m/m}$

$$\mu = \frac{M_{xd,inf}^{t+p}}{b \cdot d^2 \cdot f_{cd}} = \frac{111.703}{1,00 \cdot (0,25 - 0,05)^2 \cdot 23.330.000} = 0,12 \rightarrow \omega = 0,13$$

$$A_{v3}^{inf} = \frac{\omega \cdot b \cdot d \cdot f_{cd}}{f_{yd}} = \frac{0,13 \cdot 1,00 \cdot 0,20 \cdot 23.330.000}{435.000.000} \cdot 10.000 = 13,94 \text{ cm}^2 = 1\emptyset 16\text{c}/14,4 \text{ cm.}$$

4.4.15.- Cálculo de la pared en Estado Límite Último de esfuerzo cortante

- Combinación de acciones C8: 1,35x(Empuje hidrostático) + 1,00x(Esfuerzos adicionales debidos al pretensado a tiempo inicial ó a tiempo final)

$$Q_{xdm\acute{a}x}^{\omega+p} = 1,35 \cdot Q_{xdm\acute{a}x}^{\omega} + 1,00 \cdot Q_{xdm\acute{a}x}^{Pk\infty} = 1,35 \cdot (-102.030) + 1,00 \cdot 108.900 = -28.840 \text{ N/m.}$$

- Combinación de acciones C9: 1,50x(Empuje de tierras) + 1,00x(Esfuerzos adicionales debidos al pretensado a tiempo inicial ó a tiempo final)

$$Q_{xdm\acute{a}x}^{t+p} = 1,50 \cdot Q_{xdm\acute{a}x}^t + 1,00 \cdot Q_{xdm\acute{a}x}^{Pki} = 1,50 \cdot 37.269 + 1,00 \cdot 151.450 = +207.354 \text{ N/m.}$$

La contribución del hormigón a la resistencia a esfuerzo cortante es, según EHE:

$$V_{cu} = \left(0,12 \cdot \xi \cdot \sqrt[3]{100 \cdot \rho_l \cdot f_{ck}} - 0,15 \cdot \frac{P_{k\infty}}{A_c} \right) \cdot b_0 \cdot d \quad (\text{en N/m})$$

siendo:

$$\xi = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} = 1 + \sqrt{\frac{200}{200}} = 2,00$$

$$\rho_l = \frac{A_s}{b_0 \cdot d} = \frac{13,94}{100 \cdot 20} = 0,007$$

$$f_{ck} = 35 \text{ N/mm}^2$$

$$P_{k\infty} = -453.000 \text{ N}$$

$$A_c = 1.000 \cdot 250 = 250.000 \text{ mm}^2$$

$b_0 = 1.000$ mm. (ancho unidad).

$d = 200$ mm.

$$\rightarrow V_{cu} = \left(0,12 \cdot 2,00 \cdot \sqrt[3]{100 \cdot 0,007 \cdot 35} - 0,15 \cdot \frac{(-453.000)}{250.000} \right) \cdot 1.000 \cdot 200 = 193.771 \text{ N/m.}$$

Al ser $Q_{x,dmáx}^{t+p} = 207.354 \text{ N/m} \approx V_{cu} = 109.718 \text{ N/m}$, no precisamos cercos y el espesor adoptado de pared es correcto.

4.4.16.- Comprobación de la pared en Estado Límite de fisuración

- Combinación de acciones C10: 1,00x(Empuje hidrostático) + 1,00x(Esfuerzos adicionales debidos al pretensado a tiempo inicial ó a tiempo final)

$$M_{x,\text{inf}}^{\omega+p} = 1,00 \cdot M_{x,\text{inf}}^{\omega} + 1,00 \cdot M_{x,\text{inf}}^{Pk\infty} = 1,00 \cdot 59.045 + 1,00 \cdot (-54.900) = +4.145 \text{ N}\cdot\text{m/m}$$

(vertical, interior).

$$M_{x,\text{sup}}^{\omega+p} = 1,00 \cdot M_{x,\text{sup}}^{\omega} + 1,00 \cdot M_{x,\text{sup}}^{Pk\infty} = 1,00 \cdot (-27.168) + 1,00 \cdot 49.040 = +21.872 \text{ N}\cdot\text{m/m}$$

(vertical, interior).

- Combinación de acciones C11: 1,00x(Empuje de tierras) + 1,00x(Esfuerzos adicionales debidos al pretensado a tiempo inicial ó a tiempo final)

$$M_{x,\text{inf}}^{t+p} = 1,00 \cdot M_{x,\text{inf}}^t + 1,00 \cdot M_{x,\text{inf}}^{Pki} = 1,00 \cdot (-23.569) + 1,00 \cdot (-76.350) = -99.919 \text{ N}\cdot\text{m/m}$$

(vertical exterior).

$$M_{x,\text{sup}}^{t+p} = 1,00 \cdot M_{x,\text{sup}}^t + 1,00 \cdot M_{x,\text{sup}}^{Pki} = 1,00 \cdot 7.427 + 1,00 \cdot 68.200 = +75.627 \text{ N}\cdot\text{m/m}$$

(vertical interior).

- La envolvente de la ley de momentos flectores verticales del lado interior en la unión de las combinaciones C10 y C11 nos da:

- En la parte superior: $M_{x,\text{sup}}^{t+p} = +75.627 \text{ N}\cdot\text{m/m}$

$$A_{v1}^{\text{sup}} = 1\emptyset 16\text{c}/20,8 \text{ cm.}$$

La abertura de fisura es: $w_k = \beta \cdot s_m \cdot \epsilon_{sm} = 1,64 \cdot 173,34 \cdot 0,0019915 = 0,57 \text{ mm} > 0,1 \text{ mm} \rightarrow$
NO!!

Debemos incrementar la armadura, y proponemos $A_{v2}^{\text{sup}} = 1\emptyset 16\text{c}/6 \text{ cm}$, y en este caso, la nueva abertura de fisura es: $w_k = \beta \cdot s_m \cdot \epsilon_{sm} = 1,64 \cdot 106,93 \cdot 0,00057447 = 0,10 \text{ mm} \leq 0,1 \text{ mm} \rightarrow$ OK!!

- En la parte inferior: $M_{x,\text{inf}}^{\omega+p} = +4.145 \text{ N}\cdot\text{m/m}$

$$A_{v1}^{\text{inf}} = 1\emptyset 12\text{c}/26 \text{ cm.}$$

Por motivos constructivos proponemos la misma armadura que en la parte superior: $A_{v2}^{\text{inf}} = 1\emptyset 16\text{c}/6 \text{ cm}$.

- La envolvente de la ley de momentos flectores verticales del lado exterior en la unión de las combinaciones C10 y C11 nos da:

- En la parte inferior: $M_{x,\text{inf}}^{t+p} = -99.919 \text{ N}\cdot\text{m/m}$

$$A_{v3}^{\text{inf}} = 1\emptyset 16\text{c}/14,4 \text{ cm.}$$

La abertura de fisura es: $w_k = \beta \cdot s_m \cdot \epsilon_{sm} = 1,64 \cdot 144,62 \cdot 0,00190527 = 0,45 \text{ mm} > 0,2 \text{ mm} \rightarrow$
NO!!

Debemos incrementar la armadura, y proponemos $A_{v4}^{\text{inf}} = 1\emptyset 16\text{c}/8 \text{ cm}$, y en este caso, la nueva abertura de fisura es: $w_k = \beta \cdot s_m \cdot \epsilon_{sm} = 1,64 \cdot 115,90 \cdot 0,00105848 = 0,20 \text{ mm} \leq 0,2 \text{ mm} \rightarrow$ OK!!

4.4.17.- Disposición de las armaduras en la pared del depósito

i) *Armadura activa de la pared en la posición horizontal:*

Dispondremos 5+16 tendones de 5 cordones de 0,5" del tipo Y 1860S7 repartidos según las funciones FHP y FUP, y situados con una excentricidad de +1,6 cm. respecto al eje de la pared.

ii) *Armadura pasiva de la pared en la posición vertical interior:*

- En la parte superior = $\max(A_{v1}^{\text{sup}}; A_{v2}^{\text{sup}}; A_{\text{vmin1}}) = \max(1\emptyset16\text{c}/20,8 \text{ cm}; 1\emptyset16\text{c}/6 \text{ cm}; 1\emptyset10\text{c}/15,8 \text{ cm}) = \mathbf{1\emptyset16\text{c}/6 \text{ cm.}}$

- En la parte inferior = $\max(A_{v1}^{\text{inf}}; A_{v2}^{\text{inf}}; A_{\text{vmin1}}) = \max(1\emptyset12\text{c}/26 \text{ cm}; 1\emptyset16\text{c}/6 \text{ cm}; 1\emptyset10\text{c}/15,8 \text{ cm}) = \mathbf{1\emptyset16\text{c}/6 \text{ cm.}}$

iii) *Armadura pasiva de la pared en la posición vertical exterior:*

- En la parte superior = $\max(A_{v3}^{\text{sup}}; A_{v4}^{\text{sup}}; A_{\text{vmin2}}) = \max(0 \text{ cm}^2; 0 \text{ cm}^2; 1\emptyset10\text{c}/21 \text{ cm}) \approx \mathbf{1\emptyset10\text{c}/8 \text{ cm.}}$

- En la parte inferior = $\max(A_{v3}^{\text{inf}}; A_{v4}^{\text{inf}}; A_{\text{vmin2}}) = \max(1\emptyset16\text{c}/14,4 \text{ cm}; 1\emptyset16\text{c}/8 \text{ cm}; 1\emptyset10\text{c}/21 \text{ cm}) = \mathbf{1\emptyset16\text{c}/8 \text{ cm.}}$

iv) *Armadura pasiva de la pared en la posición horizontal interior:*

- $A_{\text{hmin}} = \mathbf{1\emptyset8\text{c}/25 \text{ cm.}}$

v) *Armadura pasiva de la pared en la posición horizontal exterior:*

$$- A_{\text{hmin}} = \mathbf{108c/25 \text{ cm.}}$$

4.5.- EJEMPLO DE CÁLCULO DE LA SOLERA DE UN DEPÓSITO RECTANGULAR DE HORMIGÓN ARMADO

4.5.1.- Enunciado

Se pide calcular la solera del depósito rectangular del apartado 4.2 anterior. Recordemos que se trataba de un depósito enterrado de medidas:

$a = b = 8,00$ m, para una altura de agua de $H_0 = 4,00$ m.

La altura del relleno de tierras también era de $H_t = 4,00$ m., y sus características geotécnicas:

- Peso específico de las tierras: $\gamma_t = 19$ KN/m³
- Angulo de rozamiento interno de las tierras: $\phi = 27,50^\circ$

Supondremos que la explanada sobre la que apoya la solera es de calidad media con un coeficiente de balasto de $k = 20.000$ KN/m³.

Recordemos que el líquido contenido por el depósito es químicamente agresivo, lo que nos lleva a plantear la siguiente hipótesis de abertura máxima de fisura permitida:

- Por la cara superior, debido a la agresividad del líquido adoptaremos $w_{m\acute{a}x} = 0,1$ mm.
- Por la cara inferior, dado que no habrán sollicitaciones térmicas importantes, $w_{m\acute{a}x} = 0,2$ mm.

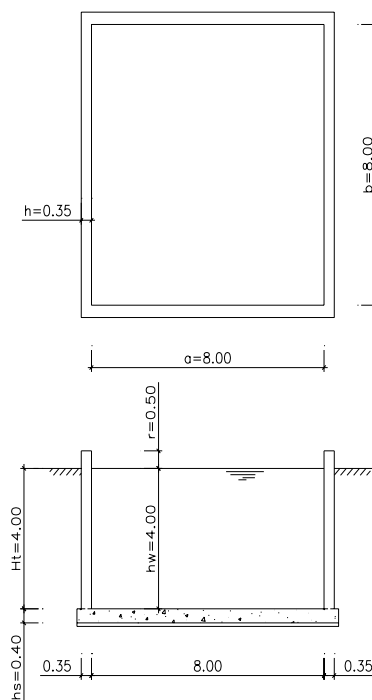


Figura 4.4.- Cálculo de la solera de un depósito rectangular de hormigón armado

4.5.2.- Datos preliminares

Proponemos un espesor de solera de $h_s = 0,40$ m.

Adoptaremos un hormigón del tipo HA-30/P/20/IV.

Esto supone tener:

$$f_{ck} = 30 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = \frac{30}{1,50} = 20 \text{ N/mm}^2 = 20.000.000 \text{ N/m}^2.$$

Adoptaremos unas armaduras pasivas del tipo B 500 S.

Esto supone tener:

$$f_{yk} = 500 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s} = \frac{500}{1,15} = 435 \text{ N/mm}^2 = 435.000.000 \text{ N/m}^2.$$

Adoptaremos un recubrimiento de $c = 40 \text{ mm}$.

4.5.3.- Acciones a considerar en el cálculo de la solera

- Peso propio de la solera: $q_s = \gamma_{\text{hormigón}} \cdot h_s = 25.000 \cdot 0,40 = 10.000 \text{ N/m}^2$.

- Carga hidrostática: $q_w = \gamma_w \cdot H_w = 10.000 \cdot 4,00 = 40.000 \text{ N/m}^2$.

- Empuje hidrostático contra la pared: $M_{y28}^o = -M_{sh} = 54.080 \text{ N}\cdot\text{m/m}$

$$R_{y28}^o = N_{sh} = \frac{110.016}{\gamma_f = 1,50} = 73.344 \text{ N/m (tracción)}$$

- Empuje de tierras contra la pared: $M_{y28}^t = -M_{st} = 37.836 \text{ N}\cdot\text{m/m}$

$$R_{y28}^t = N_{st} = \frac{82.101}{\gamma_f = 1,60} = 51.313 \text{ N/m (compresión)}$$

- Pretensado de la pared: en este caso no lo hay, pues se trataba de una pared de hormigón armado.

4.5.4.- Armaduras mínimas en la solera

- Cara superior: $A_{s\text{mín}1} = 0,0020 \cdot 100 \cdot 40 = 8,00 \text{ cm}^2 = 1\emptyset 12\text{c}/14 \text{ cm}$.

- Cara inferior: $A_{s\text{mín}2} = 0,0015 \cdot 100 \cdot 40 = 6,00 \text{ cm}^2 = 1\emptyset 12\text{c}/19 \text{ cm}$.

4.5.5.- Discretización de la solera

La discretización de la solera se resuelve empleando un programa de cálculo de pórticos planos convencional, adoptando una viga de ancho unidad de longitud $l = 8,00 + 0,35/2 + 0,35/2 = 8,35 \text{ m}$. y apoyada sobre un lecho elástico de Winckler.

i) *Coordenadas de los nudos:*

1 (y=0,000; x=0,000)	6 (y=4,675; x=0,000)
2 (y=0,675; x=0,000)	7 (y=5,675; x=0,000)
3 (y=1,675; x=0,000)	8 (y=6,675; x=0,000)
4 (y=2,675; x=0,000)	9 (y=7,675; x=0,000)
5 (y=3,675; x=0,000)	10 (y=8,350; x=0,000)

ii) *Características mecánicas de las barras:*

- Barras 1 a 9:

$$\left. \begin{aligned} \nu &= 0,20 \\ E &= 8500 \cdot \sqrt[3]{f_{ck} + 8} = 8500 \cdot \sqrt[3]{30 + 8} = 28.576,79 \text{ N / mm}^2 = 28.576.790.000 \text{ N / m}^2 \\ A &= 1,00 \cdot 0,40 = 0,40 \text{ m}^2 \\ I &= \frac{1}{12} \cdot 1,00 \cdot (0,40)^3 = 0,005333 \text{ m}^4 \end{aligned} \right\}$$

iii) *Coacciones de los nudos:*

- Nudos 1, 10 (apoyo simple):

$$\left. \begin{aligned} K_y &= 0 \\ K_x &= 1 \cdot 10^{20} \\ K_g &= 0 \end{aligned} \right\}$$

- Nudos 2, 9 (muelles):

$$\left. \begin{aligned} K_y &= 0 \\ K_x &= 20.000 \text{ KN / m}^3 \cdot 1,00 \text{ m} \cdot \left(\frac{0,675}{2} + \frac{1,00}{2} \right) \text{ m} = 16.750 \text{ KN / m} \\ K_g &= 0 \end{aligned} \right\}$$

- Nudos 3 a 8 (muelles):

$$\left. \begin{aligned} K_y &= 0 \\ K_x &= 20.000 \text{ KN / m}^3 \cdot 1,00 \text{ m} \cdot 1,00 \text{ m} = 20.000 \text{ KN / m} \\ K_g &= 0 \end{aligned} \right\}$$

iv) *Combinación de hipótesis de carga:*

C12: 1,50x(Peso propio) + 1,50x(Carga hidrostática) + 1,50x(M_{sh}) + 1,00x(M_{sp})

$$- q_{sd} = \gamma_f q_s = 1,50 \cdot 10.000 \cdot 1,00 = 15.000 \text{ N/m, en barras 1 a 9.}$$

$$- q_{od} = \gamma_f q_w = 1,50 \cdot 40.000 \cdot 1,00 = 60.000 \text{ N/m, en barras 1 a 9.}$$

$$- M_{shd} = \gamma_f M_{sh} = 1,50 \cdot 54.080 = 81.120 \text{ N}\cdot\text{m/m, en nudos 1 y 10 (con su signo).}$$

$$- M_{spd} = \gamma_f M_{sp} = 0.$$

C13: 1,50x(Peso propio) + 1,60x(M_{st}) + 1,00x(M_{sp})

$$- q_{sd} = \gamma_f q_s = 1,50 \cdot 10.000 \cdot 1,00 = 15.000 \text{ N/m, en barras 1 a 9.}$$

$$- M_{std} = \gamma_f M_{st} = 1,60 \cdot 37.836 = 60.537 \text{ N}\cdot\text{m/m, en nudos 1 y 10 (con su signo).}$$

$$- M_{spd} = \gamma_f M_{sp} = 0.$$

C15: 1,00x(Peso propio) + 1,00x(Carga hidrostática) + 1,00x(M_{sh}) + 1,00x(M_{sp})

$$- q_{sd} = \gamma_f q_s = 1,00 \cdot 10.000 \cdot 1,00 = 10.000 \text{ N/m, en barras 1 a 9.}$$

$$- q_{od} = \gamma_f q_w = 1,00 \cdot 40.000 \cdot 1,00 = 40.000 \text{ N/m, en barras 1 a 9.}$$

$$- M_{shd} = \gamma_f M_{sh} = 1,00 \cdot 54.080 = 54.080 \text{ N}\cdot\text{m/m, en nudos 1 y 10 (con su signo).}$$

$$- M_{spd} = \gamma_f M_{sp} = 0.$$

C16: 1,00x(Peso propio) + 1,00x(M_{st}) + 1,00x(M_{sp})

$$- q_{sd} = \gamma_f q_s = 1,00 \cdot 10.000 \cdot 1,00 = 10.000 \text{ N/m, en barras 1 a 9.}$$

$$- M_{std} = \gamma_f M_{st} = 1,00 \cdot 37.836 = 37.836 \text{ N}\cdot\text{m/m, en nudos 1 y 10 (con su signo).}$$

$$- M_{spd} = \gamma_f M_{sp} = 0.$$

4.5.6.- Cálculo de la solera en Estado Límite Último de flexión

La resolución de la solera discretizada con el uso de las combinaciones C12 y C13 nos da los siguientes momentos flectores:

$$M_{sd,sup}^{borde} = -81.120 \text{ N}\cdot\text{m/m, (cara superior).}$$

$$M_{sd,sup}^{centro} = 0 \text{ N}\cdot\text{m/m, (cara superior).}$$

$$M_{sd,inf}^{borde} = +60.537 \text{ N}\cdot\text{m/m}, \text{ (cara inferior).}$$

$$M_{sd,inf}^{centro} = +69.850 \text{ N}\cdot\text{m/m}, \text{ (cara inferior).}$$

- La envolvente de la ley de momentos flectores de la cara superior en la unión de las combinaciones C12 y C13 nos da:

$$\text{- En la parte del borde: } M_{sd,sup}^{borde} = -81.120 \text{ N}\cdot\text{m/m}$$

$$\mu = \frac{M_{sd,sup}^{borde}}{b \cdot d^2 \cdot f_{cd}} = \frac{81.120}{1,00 \cdot (0,40 - 0,05)^2 \cdot 20.000.000} = 0,033 \rightarrow \omega_{\min} = 0,04$$

$$A_{s1}^{borde} = \frac{\omega \cdot b \cdot d \cdot f_{cd}}{f_{yd}} = \frac{0,04 \cdot 1,00 \cdot 0,35 \cdot 20.000.000}{435.000.000} \cdot 10.000 = 6,4 \text{ cm}^2 = 1\varnothing 12\text{c}/17,7 \text{ cm.}$$

$$\text{- En la parte central: } M_{sd,sup}^{centro} = 0 \text{ N}\cdot\text{m/m}$$

$$A_{s1}^{cent} = 0,0 \text{ cm}^2$$

- La envolvente de la ley de momentos flectores verticales de la cara inferior en la unión de las combinaciones C1 y C2 nos da:

$$\text{- En la parte del borde: } M_{sd,inf}^{borde} = +60.537 \text{ N}\cdot\text{m/m}$$

$$\mu = \frac{M_{sd,inf}^{borde}}{b \cdot d^2 \cdot f_{cd}} = \frac{60.537}{1,00 \cdot (0,40 - 0,05)^2 \cdot 20.000.000} = 0,025 \rightarrow \omega_{\min} = 0,04$$

$$A_{s4}^{borde} = \frac{\omega \cdot b \cdot d \cdot f_{cd}}{f_{yd}} = \frac{0,04 \cdot 1,00 \cdot 0,35 \cdot 20.000.000}{435.000.000} \cdot 10.000 = 6,4 \text{ cm}^2 = 1\varnothing 12\text{c}/17,7 \text{ cm.}$$

$$\text{- En la parte central: } M_{sd,inf}^{centro} = +69.850 \text{ N}\cdot\text{m/m}, \text{ (cara inferior).}$$

$$\mu = \frac{M_{sd,inf}^{centro}}{b \cdot d^2 \cdot f_{cd}} = \frac{69.850}{1,00 \cdot (0,40 - 0,05)^2 \cdot 20.000.000} = 0,029 \rightarrow \omega_{\min} = 0,04$$

$$A_{s4}^{cent} = \frac{\omega \cdot b \cdot d \cdot f_{cd}}{f_{yd}} = \frac{0,04 \cdot 1,00 \cdot 0,35 \cdot 20.000.000}{435.000.000} \cdot 10.000 = 6,4 \text{ cm}^2 = 1\emptyset 12 \text{ c}/17,7 \text{ cm.}$$

4.5.7.- Cálculo de la solera en Estado Límite Último de esfuerzo cortante

La resolución de la solera discretizada con el uso de las combinaciones C12 y C13 nos da el siguiente valor del esfuerzo cortante máximo:

$$Q_{sd\max} = 129.240 \text{ N/m.}$$

Adoptaremos el criterio de que el máximo esfuerzo cortante pueda ser absorbido por la contribución del hormigón V_{cu} :

$$V_{cu} = \left(0,12 \cdot \xi \cdot \sqrt[3]{100 \cdot \rho_l \cdot f_{ck}}\right) b_0 \cdot d \quad (\text{en N/m})$$

siendo:

$$\xi = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} = 1 + \sqrt{\frac{200}{350}} = 1,756$$

$$\rho_l = \frac{A_s}{b_0 \cdot d} = \frac{100/14 \cdot 1,13}{100 \cdot 35} = 0,0023$$

$$f_{ck} = 30 \text{ N/mm}^2.$$

$$b_0 = 1.000 \text{ mm. (ancho unidad).}$$

$$d = 350 \text{ mm.}$$

$$\rightarrow V_{cu} = \left(0,12 \cdot 1,756 \cdot \sqrt[3]{100 \cdot 0,0023 \cdot 30}\right) 1.000 \cdot 350 = 140.407 \text{ N/m.}$$

Al ser $Q_{sd\max} = 129.240 \text{ N/m} \leq V_{cu} = 140.407 \text{ N/m}$, no precisamos cercos y el espesor

adoptado para la solera es correcto.

4.5.8.- Cálculo de la solera en Estado Límite Último de tracción simple

- Combinación de acciones C15: $1,00x(N_{sh}) + 1,00x(N_{sp})$

$$N_{sd} = \gamma_f N_{sh} + \gamma_f N_{sp} = 1,00 \cdot 73.344 + 1,00 \cdot 0 = +73.344 \text{ N/m.}$$

Con lo que adoptando una tensión en el acero de $\sigma_s = 100 \text{ N/mm}^2$, obtendremos una armadura de:

$$A_{s3} = \frac{N_{sd}}{\sigma_s} = \frac{73.344}{100} \cdot \frac{1}{100} = 7,33 \text{ cm}^2.$$

4.5.9.- Comprobación de la solera en Estado Límite de fisuración

La resolución de la solera discretizada con el uso de las combinaciones C15 y C16 nos da los siguientes momentos flectores:

$$M_{s,\text{sup}}^{\text{borde}} = -54.080 \text{ N}\cdot\text{m/m, (cara superior).}$$

$$M_{s,\text{sup}}^{\text{centro}} = 0 \text{ N}\cdot\text{m/m, (cara superior).}$$

$$M_{s,\text{inf}}^{\text{borde}} = +37.836 \text{ N}\cdot\text{m/m, (cara inferior).}$$

$$M_{s,\text{inf}}^{\text{centro}} = +46.570 \text{ N}\cdot\text{m/m, (cara inferior).}$$

- La envolvente de la ley de momentos flectores de la cara superior en la unión de las combinaciones C4 y C5 nos da:

- En la parte del borde: $M_{s,\text{sup}}^{\text{borde}} = -54.080 \text{ N}\cdot\text{m/m}$

$$A_{s1}^{borde} = 1\emptyset12c/17,7 \text{ cm.}$$

La abertura de fisura es: $w_k = \beta \cdot s_m \cdot \epsilon_{sm} = 1,64 \cdot 209,38 \cdot 0,000533 = 0,18 \text{ mm} > 0,1 \text{ mm} \rightarrow$
NO!!

Debemos incrementar la armadura, y proponemos $A_{s2}^{borde} = 1\emptyset12c/16 \text{ cm} + 1\emptyset6c/16 \text{ cm}$, y en este caso, la nueva abertura de fisura es: $w_k = \beta \cdot s_m \cdot \epsilon_{sm} = 1,64 \cdot 164,09 \cdot 0,00038613 = 0,10 \text{ mm} \leq 0,1 \text{ mm} \rightarrow$ OK!!

- En la parte central: $M_{s,sup}^{centro} = 0 \text{ N}\cdot\text{m/m}$

$$A_{s1}^{cent} = A_{s2}^{cent} = 0 \text{ cm}^2.$$

- La envolvente de la ley de momentos flectores verticales de la cara inferior en la unión de las combinaciones C4 y C5 nos da:

- En la parte del borde: $M_{s,inf}^{borde} = +37.836 \text{ N}\cdot\text{m/m}$

$$A_{s4}^{borde} = 1\emptyset12c/17,7 \text{ cm.}$$

La abertura de fisura es: $w_k = \beta \cdot s_m \cdot \epsilon_{sm} = 1,64 \cdot 209,38 \cdot 0,00037291 = 0,13 \text{ mm} \leq 0,2 \text{ mm} \rightarrow$
OK!!

Por tanto, $A_{s5}^{borde} = 1\emptyset12c/17,7 \text{ cm.}$

- En la parte central: $M_{s,inf}^{centro} = +46.570 \text{ N}\cdot\text{m/m}$

$$A_{s4}^{cent} = 1\emptyset12c/17,7 \text{ cm.}$$

La abertura de fisura es: $w_k = \beta \cdot s_m \cdot \epsilon_{sm} = 1,64 \cdot 209,38 \cdot 0,0004501 = 0,15 \text{ mm} \leq 0,2 \text{ mm} \rightarrow$
OK!!

Por tanto, $A_{s5}^{cent} = 1\emptyset12c/17,7 \text{ cm.}$

4.5.10.- Disposición de las armaduras en la solera del depósito

i) *Armadura de la solera en la cara superior:*

- En la parte del borde = $\max(A_{s1}^{borde}; A_{s2}^{borde}; A_{smin1}) + A_{s3}/2 = \max(1\emptyset12c/17,7 \text{ cm}; 1\emptyset12c/16 \text{ cm} + 1\emptyset6c/16 \text{ cm}; 1\emptyset12c/14 \text{ cm}) + 7,33/2 \approx \mathbf{1\emptyset12c/15 \text{ cm} + 1\emptyset10c/15 \text{ cm}}$ (refuerzo lateral superior).

- En la parte central, al no haber flexión y tener $A_{s1}^{cent} = A_{s2}^{cent} = 0 \text{ cm}^2$, estamos en un caso particular, donde la armadura a disponer será = $\max(A_{smin1}; A_{s3}/2) = \max(1\emptyset12c/14 \text{ cm}; 7,33/2) \approx \mathbf{1\emptyset12c/15 \text{ cm}}$.

ii) *Armadura de la solera en la cara inferior:*

- En la parte del borde = $\max(A_{s4}^{borde}; A_{s5}^{borde}; A_{smin2}) + A_{s3}/2 = \max(1\emptyset12c/17,7 \text{ cm}; 1\emptyset12c/17,7 \text{ cm}; 1\emptyset12c/19 \text{ cm}) + 7,33/2 \approx \mathbf{1\emptyset12c/15 \text{ cm} + 1\emptyset8c/15 \text{ cm}}$.

- En la parte central = $\max(A_{s4}^{cent}; A_{s5}^{cent}; A_{smin2}) + A_{s3}/2 = \max(1\emptyset12c/17,7 \text{ cm}; 1\emptyset12c/17,7 \text{ cm}; 1\emptyset12c/19 \text{ cm}) + 7,33/2 \approx \mathbf{1\emptyset12c/15 \text{ cm} + 1\emptyset8c/15 \text{ cm}}$.