

CAPÍTULO 5

APLICACIÓN DE LOS PARÁMETROS

5.1.- INTRODUCCIÓN

Sentadas ya las bases para el cálculo, y visto el funcionamiento de fabricación de un tanque se procederá al dimensionamiento empleando paso a paso la formulación propuesta en el capítulo 3.

Para el ejemplo se han adoptado 3 situaciones que reflejan modelos bien diferenciados:

- Tanque pequeño de 10m^3 .
- Tanque mediano de 50m^3 .
- Tanque grande de 150m^3 .

De hecho, con estas situaciones se recogen también los casos analizados para los ejemplos 1 y 2 del capítulo 4. De esta manera se podrá probar la validez del método. Los volúmenes son valores nominales del volumen en cuanto a la parte cilíndrica del depósito para simplificar los cálculos.

En el análisis de la pared, para determinar las dimensiones del tanque, se tendrán en cuenta los siguientes aspectos:

- Fijado el volumen, las únicas variables son \emptyset (diámetro), H (altura de pared).
- En cuanto a la relación $\emptyset - H$ se tomará siempre $\emptyset \geq H$, ya que la estructura resulta más estable y robusta cuanto mayor sea la base, además resulta más fácil para la ejecución.

- Para volúmenes de tanque grandes la tendencia será siempre de aumentar el diámetro ϕ frente a la altura H ; hay que tener en cuenta que si bien se trata de una estructura autoestable (el empuje generado por la presión hidrostática es compensado por el axil circumferencial como se puede apreciar en la figura 5.1) y la flexión es mucho menor que por ejemplo en depósitos rectangulares, el volumen del depósito

$$V = \frac{\pi \cdot \phi^2 \cdot H}{4}$$

aumenta mucho más con el diámetro que con la altura. Luego, para lograr grandes volúmenes es más interesante aumentar ϕ y mantener H en condiciones normales de trabajabilidad (accesibles para los trabajadores).

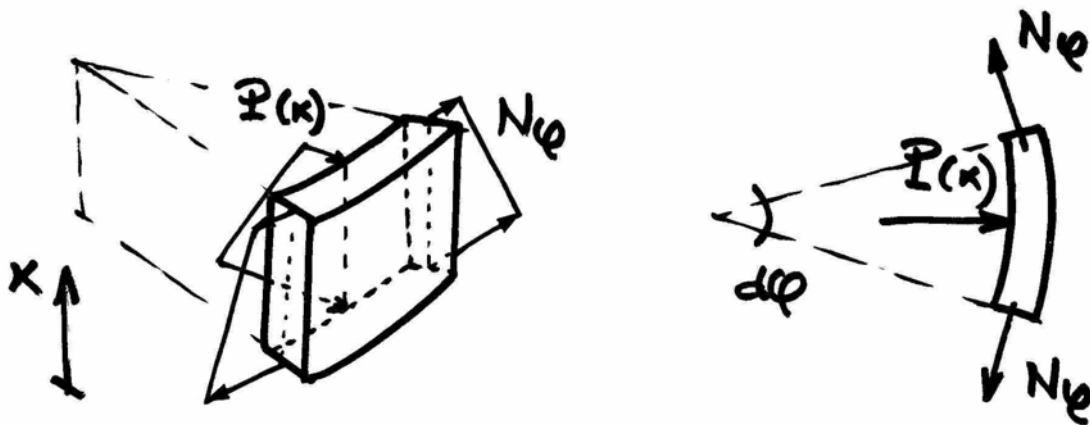


Fig.5.1.- Rebanada de elemento diferencial de pared.

5.2. – DIMENSIONAMIENTO DE UN TANQUE DE 10m³

5.2.1.- Análisis de la pared

Geometría

Puesto que no tenemos condicionantes en altura, se tomará como altura $H=1,8m$ que es una altura próxima a la de una persona adulta para facilitar la ejecución pero evitando que pueda subir alguien encima. Por otro lado se mantiene un diámetro (como se muestra a continuación) superior a la altura del depósito.

$$(1) \quad 10 = \frac{\pi \cdot \phi^2 \cdot 1,8}{4} \longrightarrow \boxed{\phi = 2,6m}$$

Esfuerzo axial de cálculo

El valor máximo del axial N_k según la expresión (3.2) es:

$$(2) \quad N_k = \gamma \cdot \frac{\phi}{2} \cdot H \cdot K$$

siendo $K = f(\beta)$ parámetro que se obtiene a partir de la figura 3.6 o la tabla 3.1, y en el que

$$\beta = \frac{\sqrt[4]{3 \cdot (1 - \nu^2)}}{\sqrt{R \cdot e}} \text{ y } \nu = 0,2.$$

Tomando como espesor de partida $e = 5\text{cm}$,

$$\beta = \frac{\sqrt[4]{3 \cdot (1 - 0,2^2)}}{\sqrt{1,3 \cdot 0,05}} = 5,11$$

$$\beta \cdot H = 9,20 \longrightarrow K = 0,7368$$

Tabla 3.1/Fig.3.3

$$N_k = 1000 \cdot \frac{2,6}{2} \cdot 1,8 \cdot 0,7368 = 1724 \text{ kp/ml} = 17240 \text{ N/ml}$$

Obtención del refuerzo

En base a la expresión (3.15) y aplicando $f_{ct,m}$ (1,6MPa de los ensayos en 2.5) un factor de seguridad de 1,5 (teniendo en cuenta malas condiciones en ejecución) $f'_{ct,m} = \frac{f_{ct,m}}{1,5} = 1,10\text{MPa}$

y considerando $n=7$ (valor habitual)

$$(3) \quad e_0 = \frac{N_k}{f_{ct,m} \cdot (9 \cdot n + 1000)} = \frac{17240}{1,10 \cdot (9 \cdot 7 + 1000)} = 15\text{mm}$$

este valor es muy distinto del planteado inicialmente, por tanto vamos a hacer una nueva iteración aplicando $e=15\text{mm}$ en (2),

$$(2') \quad \beta = 9,33$$

$$\beta \cdot H = 16,8 \longrightarrow K = 0,8715$$

$$N_k = 1000 \cdot \frac{2,6}{2} \cdot 1,8 \cdot 0,8715 = 2039 \text{ kp/ml} = 20390 \text{ N/ml}$$

$$(3') \quad e_0 = \frac{20390}{1,10 \cdot (9 \cdot 7 + 1000)} = 17 \text{ mm}$$

$$A_{s0} = 9 \cdot e_0 = 157 \text{ mm}^2/\text{ml}$$

Si utilizamos malla de alambre con un diámetro $\phi=1\text{mm}$ y una abertura de malla $s=25\text{mm}$ ($A_s = 45 \text{ mm}^2/\text{ml}$ malla) serán necesarias 4 mallas que dispondremos en un espesor de pared e_0 (ver figura 5.2)

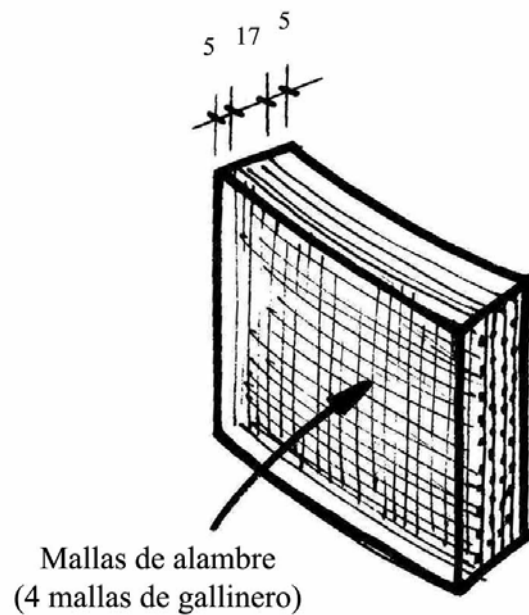


Fig.5.2.- Disposición de las mallas en el espesor de pared.

Bajo estas condiciones la fracción volumétrica (V_f) y la superficie específica (S_r) del refuerzo, dadas por las expresiones (3.11) y (3.12) respectivamente son:

$$V_f = \frac{2 \cdot A_s}{e_0 \cdot 1000} = 2,1\% > 1,8$$

$$S_r = \frac{4 \cdot V_f}{\phi} = \frac{4 \cdot 0,021}{1,2} = 0,071 \text{ mm}^2/\text{mm}^3 > 0,05$$

que como podemos comprobar cumplen las directivas establecidas por [22] en la IV Conferencia Latinoamericana sobre Ferrocemento (tabla 3.3).

Recubrimiento. Espesor de pared

Tal como se describe en 3.2.2 se va a tomar un recubrimiento $r=5mm$, con lo cual el espesor tomado será $e = e_0 + 2 \cdot r = 27mm$ (figura 5.2). El espesor de pared no será uniforme, sino que en la parte baja se recrecerá para soportar el incremento de M_f que se produce en el contacto pared-losa. Aproximadamente se tomará en la base de pared el doble de espesor que en el resto.

Comprobaciones

1) Resistencia al agrietamiento en tracción

En relación a la expresión (3.17), la resistencia a la aparición de la primera grieta en la pared del depósito, considerando $R_b=1,60MPa$ como resultado de los ensayos citados en 2.5.1, será

$$\sigma_{fis} = K \cdot S_{rL} + R_b = 20 \cdot \frac{0,071}{2} + 1,60 = 2,31MPa$$

Para el cálculo de la tracción soportada por el ferrocemento σ_{fi} , se ha empleado el espesor ficticio e_0 , que es la parte que se considera que trabajará como tal.

$$\sigma_{fi} = \frac{N_k}{e_0} = \frac{20390}{17} = 1,20MPa < 2,31$$

2) Resistencia a flexión

El momento de fisuración M_{fis} que puede resistir una sección según la expresión (3.19) es

$$M_{fis} = \frac{f_{ct,m} \cdot b \cdot e^2}{6} = \frac{1,60 \cdot 1000 \cdot 27^2}{6} = 194400 N \cdot mm/ml = 19,44 kp \cdot m/ml$$

Por otro lado el momento flector de cálculo, según la expresión (3.18) es

$$M_x = \frac{\gamma \cdot R \cdot e \cdot H}{2 \cdot \sqrt{3 \cdot (1 - \nu^2)}} \cdot k_1 = \frac{1000 \cdot 1,3 \cdot 0,027 \cdot 1,8}{2 \cdot \sqrt{3 \cdot (1 - 0,2^2)}} \cdot 0,9198 = 17,12 kp \cdot m/ml < 19,44$$

3) Resistencia a cortante

Según la expresión (3.22) el esfuerzo cortante de agotamiento es

$$V_{u2} = \left[0,12 \cdot \xi \cdot (100 \cdot \rho_l \cdot f_{ck})^{1/3} - 0,15 \cdot \sigma'_{cd} \right] \cdot b \cdot d$$

$$= \left[0,12 \cdot 4,85 \cdot (100 \cdot 0,013 \cdot 12,32)^{1/3} - 0,15 \cdot 0 \right] \cdot 1000 \cdot 13,5 = 19,97 \text{ kN/ml}$$

donde ζ , ρ_l y f_{ck} se han obtenido según lo descrito en el apartado 3.2.4.3. Para facilitar el cálculo se ha considerado despreciable el efecto del peso propio de la pared en el término σ'_{cd} .

El esfuerzo cortante de cálculo según lo descrito en (3.21) es

$$\begin{aligned} V_{rd} = Q_x &= - \frac{\gamma \cdot H \cdot \sqrt{R \cdot e}}{2 \cdot \sqrt[4]{3 \cdot (1 - \nu^2)}} \cdot k_2 \\ &= - \frac{1000 \cdot 1,8 \cdot \sqrt{1,3 \cdot 0,027}}{2 \cdot \sqrt[4]{3 \cdot (1 - 0,2^2)}} \cdot (-1,9198) = 2,48 \text{ kN/ml} < 19,97 \end{aligned}$$

4) Abertura de fisura

La tensión en el refuerzo para una sección fisurada es $\sigma_{sd} = \frac{N_k}{A_s} = \frac{20390}{180} = 113 \text{ MPa}$, y tal

como ya se ha descrito en la expresión (3.24) para $\sigma_{sd} < 345 \cdot S_{rL} = 345 \cdot \frac{0,71}{2} = 122$

$$\omega_{\max} = \frac{3500}{E_r} = \frac{3500}{1,05 - 1,75 \cdot 10^5} = 0,02 - 0,03 \text{ mm} < 0,05$$

Se verifica pues la limitación de abertura de fisura en estructuras de ferrocemento para la contención de agua.

5.2.2.- Análisis de la solera

Para un depósito de este tipo, como se ha analizado en el anejo 3, la solera que proporciona una mejor respuesta en cuanto a esfuerzos está formada por un casquete esférico con un ángulo en el borde de 30° con respecto a la vertical.

En cuanto al refuerzo, en este caso resultará suficiente disponer una malla de gallinero en la solera ya que toda la carga es soportada por el terreno.

El espesor de la solera va a ser (al menos en la unión pared-solera) el mismo que el de la base de la pared, que a su vez va a ser de unos 5cm; el doble que el resto. Esto es para mejorar el flujo de tensiones en la unión; se evitan discontinuidades en el espesor y la transmisión de esfuerzos entre pared y solera es más suave.

5.2.3.- Solución adoptada

La solución adoptada está integrada por una solera de 2,6m de diámetro y 5cm de espesor, las paredes tienen un espesor de unos 2,5cm y una altura de 1,8m sobre el nivel del suelo. Para la cubierta se ha escogido un diseño troncocónico de 35cm de altura y 2cm de espesor medio, con una abertura para la entrada de agua o inspección de 50cm de diámetro, como la descrita en el ejemplo 4 incluido en el capítulo 4 de esta tesina. En la figura 5.3 se muestra un croquis del depósito planteado.

En cuanto a puntos de entrada y salida de agua, se va a poner el grifo de salida a unos 25cm de la base de la pared (nivel del suelo), el rebosadero se va a montar en la parte más alta de la pared para evitar un exceso de agua en el depósito y el desagüe de fondo justo en el punto más bajo de la solera para facilitar la limpieza del depósito. Este último, va a permanecer sellado cuando no se utilice.

Tanto en la unión pared-solera como la de pared-cubierta se va a ejecutar un refuerzo de mortero para rigidizar la unión y también para mejorar la transición y evitar discontinuidades en la estructura.

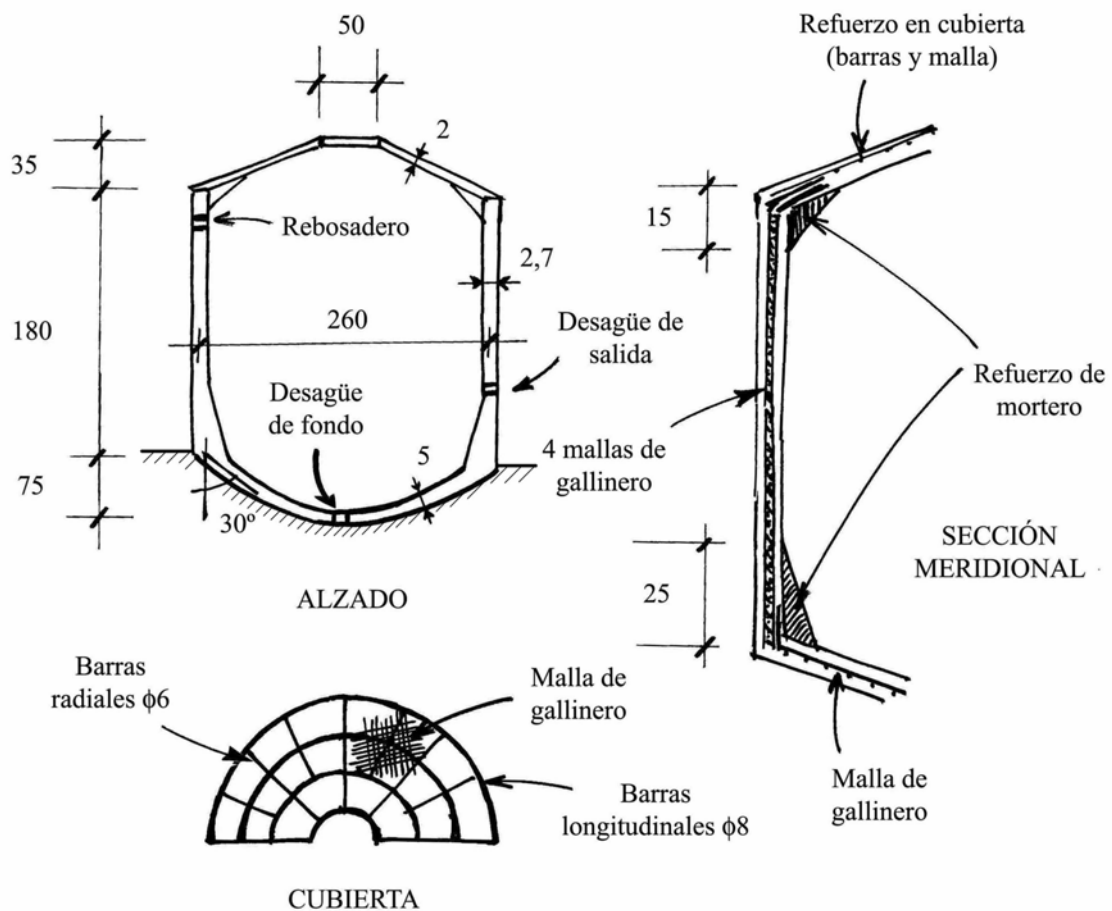


Fig.5.3.- Características y detalles de armado del depósito de 10m³ (cotas en cm).

5.3.- DIMENSIONAMIENTO DE UN TANQUE DE 50m³

5.3.1.- Análisis de la pared

En este caso (como se verá a continuación) la armadura necesaria va a ser demasiado grande, con lo cual hará falta la disposición de una malla electrosoldada. Luego, la altura elegida va a ser el ancho de electromalla.

Geometría

La altura del depósito es de 2,4m que es el ancho de electromalla.

$$(1) \quad 50 = \frac{\pi \cdot \phi^2 \cdot 2,4}{4} \longrightarrow \boxed{\phi = 5m}$$

Esfuerzo axial de cálculo

$$(2) \quad N_k = \gamma \cdot \frac{\phi}{2} \cdot H \cdot K$$

iterando con $e = 5cm$,

$$\nu = 0,2$$

$$\beta = \frac{\sqrt[4]{3 \cdot (1 - \nu^2)}}{\sqrt{R \cdot e}} = \frac{\sqrt[4]{3 \cdot (1 - 0,2^2)}}{\sqrt{2,5 \cdot 0,05}} = 3,68$$

$$\beta \cdot H = 8,8 \longrightarrow K = 0,7352$$

$$N_k = 1000 \cdot \frac{5}{2} \cdot 2,4 \cdot 0,7352 = 4411 \text{ kp/ml} = 44112 \text{ N/ml}$$

Obtención del refuerzo

En base a la expresión (3.15) y aplicando $f_{ct,m}$ (1,6MPa de los ensayos en 2.5) un factor de seguridad de 1,5 (teniendo en cuenta malas condiciones en ejecución) $f'_{ct,m} = \frac{f_{ct,m}}{1,5} = 1,10 \text{ MPa}$

y considerando $n=7$ (valor habitual)

$$(3) \quad e_0 = \frac{N_k}{f_{ct,m} \cdot (9 \cdot n + 1000)} = \frac{44112}{1,10 \cdot (9 \cdot 7 + 1000)} = 38 \text{ mm}$$

$$A_{s0} = 9 \cdot e_0 = 340 \text{ mm}^2/\text{ml}$$

Para lograr esta armadura habría que disponer 8 mallas de gallinero, lo cual no tiene ningún sentido porque no se lograría embeber el acero en el mortero y la adherencia entre ambos sería mala. Así pues, plantearemos para este caso una solución como estructura de mortero armado.

Con 4 mallas de gallinero $A_{sm} = 180 \text{ mm}^2/\text{ml}$.

De la expresión (3.16) se obtiene:

$$e_0 = \frac{44112}{1000 \cdot 1,10} - \frac{7}{1000} \cdot 180 = 39 \text{ mm}$$

que es un espesor ligeramente distinto del planteado inicialmente (5cm). Así, vamos a hacer una nueva iteración con $e = 4 \text{ cm}$.

$$(2') \quad \beta = \frac{\sqrt[4]{3 \cdot (1 - 0,2^2)}}{\sqrt{2,5 \cdot 0,04}} = 4,12$$

$$\beta \cdot H = 9,9 \quad \longrightarrow \quad K = 0,7456$$

$$N_K = 1000 \cdot \frac{5}{2} \cdot 2,4 \cdot 0,7456 = 4474 \text{ kp/ml} = 44736 \text{ N/ml}$$

$$(3') \quad A_{s0} = \frac{9 \cdot N_K}{f_{ct,m} \cdot (9 \cdot n + 1000)} = 345 \text{ mm}^2/\text{ml}$$

$$e_0 = \frac{44736}{1000 \cdot 1,10} - \frac{7}{1000} \cdot 180 = 40 \text{ mm}$$

La armadura de refuerzo será

$$A_{sref} = 345 - 180 = 165 \text{ mm}^2/\text{ml}$$

Para ello se va a disponer una malla electrosoldada de barras $\text{Ø}5$ y espaciamiento de 15cm ($A_{sel} = \frac{\pi \cdot 5^2/4}{0,15} = 131 \text{ mm}^2/\text{ml}$). A la cual se van a atar las 4 mallas de gallinero (dos delante y 2 detrás).

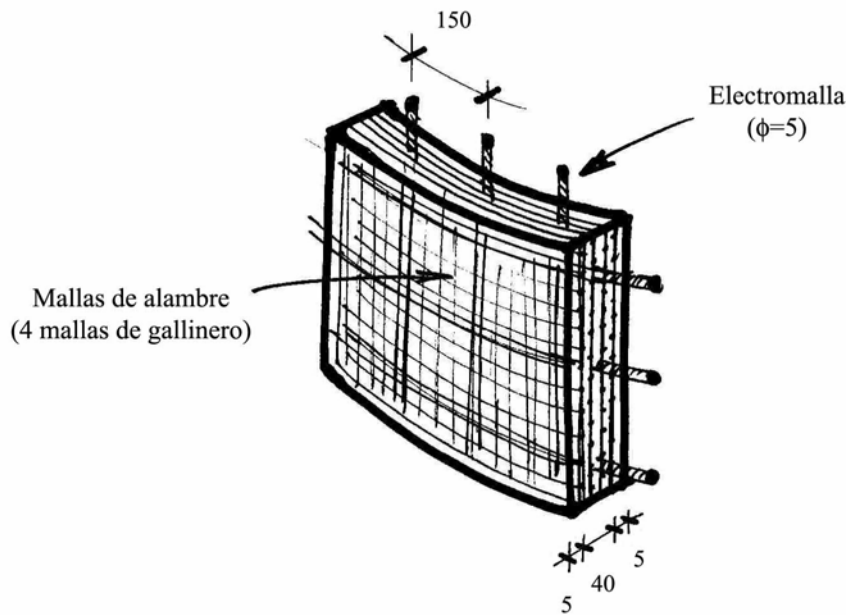


Fig.5.4.- Sección de pared para el depósito de 50m³.

Bajo estas condiciones la fracción volumétrica (V_f) y la superficie específica (S_r) del refuerzo, dadas por las expresiones (3.11) y (3.12) respectivamente son:

$$V_f = \frac{2 \cdot (A_{sm} + A_{sel})}{e_0 \cdot 1000} = \frac{2 \cdot (180 + 131)}{40 \cdot 1000} = 0,9 + 0,65 = 1,55\% < 1,8$$

para el cálculo de la superficie específica, la malla electrosoldada no contabiliza, luego

$$S_r = \frac{4 \cdot V_{fm}}{\phi} = \frac{4 \cdot 0,09}{1,2} = 0,03 \text{ mm}^2 / \text{mm}^3 < 0,05$$

No se cumplen las directivas establecidas por [22] en la IV Conferencia Latinoamericana sobre Ferrocemento (tabla 3.3). Entonces, efectivamente la suposición de estructura de mortero armado establecida para el dimensionamiento es correcta.

Recubrimiento. Espesor de pared

Tal como se describe en 3.2.2 se va a tomar un recubrimiento $r=5\text{mm}$, con lo cual el espesor tomado será $e = e_0 + 2 \cdot r = 50\text{mm}$ (figura 5.3). El espesor de pared no será uniforme, sino que en la base se recrecerá para soportar el incremento de M_f que se produce en el contacto pared-losa. Para la base de la pared se tomará aproximadamente un espesor del doble que en el resto de la pared.

Comprobaciones

1) Resistencia al agrietamiento en tracción

En relación a la expresión (3.17), la resistencia a la aparición de la primera grieta en la pared del depósito, considerando $R_b=1,60MPa$ como resultado de los ensayos citados en 2.5.1, será

$$\sigma_{fis} = K \cdot S_{rL} + R_b = 20 \cdot \frac{0,03}{2} + 1,60 = 1,90MPa$$

Para el cálculo de la tracción soportada por el ferrocemento σ_{ft} , se ha empleado el espesor ficticio e_0 , que es la parte que se considera que trabajará como tal.

$$\sigma_{ft} = \frac{N_k}{e_0} = \frac{44736}{40} = 1,12MPa < 1,90$$

2) Resistencia a flexión

El momento de fisuración M_{fis} que puede resistir una sección según la expresión (3.19) es

$$M_{fis} = \frac{f_{ct,m} \cdot b \cdot e^2}{6} = \frac{1,60 \cdot 1000 \cdot 50^2}{6} = 666667 N \cdot mm/ml = 66,67 kp \cdot m/ml$$

Por otro lado el momento flector de cálculo, según la expresión (3.18) es

$$M_x = \frac{\gamma \cdot R \cdot e \cdot H}{2 \cdot \sqrt{3 \cdot (1 - \nu^2)}} \cdot k_1 = \frac{1000 \cdot 2,5 \cdot 0,05 \cdot 2,4}{2 \cdot \sqrt{3 \cdot (1 - 0,2^2)}} \cdot 0,8867 = 78,38 kp \cdot m/ml > 66,67$$

Sin embargo, recreciendo la base de la pared hasta 10cm

$$M_{fis} = \frac{f_{ct,m} \cdot b \cdot e^2}{6} = \frac{1,60 \cdot 1000 \cdot 100^2}{6} = 266,67 kp \cdot m/ml$$

No obstante a efectos de los esfuerzos podemos seguir considerando el mismo espesor en todo el depósito sin cometer mucho error con lo cual,

$$M_x = 78,38 kp \cdot m/ml < 266,67$$

Se cumple la comprobación a flexión.

3) Resistencia a cortante

Según la expresión (3.22), para el cálculo de la resistencia a cortante habrá que tener en cuenta ahora el ancho de base de 10cm,

$$\begin{aligned} V_{u2} &= \left[0,12 \cdot \xi \cdot (100 \cdot \rho_l \cdot f_{ck})^{1/3} - 0,15 \cdot \sigma'_{cd} \right] \cdot b \cdot d \\ &= \left[0,12 \cdot 3 \cdot (100 \cdot 0,00736 \cdot 12,32)^{1/3} - 0,15 \cdot 0 \right] \cdot 1000 \cdot 50 = 37,53 \text{ kN/ml} \end{aligned}$$

donde ξ , ρ_l y f_{ck} se han obtenido según lo descrito en el apartado 3.2.4.3. Para facilitar el cálculo se ha considerado despreciable el efecto del peso propio de la pared en el término σ'_{cd} .

El esfuerzo cortante de cálculo según lo descrito en (3.21) es

$$\begin{aligned} V_{rd} = Q_x &= -\frac{\gamma \cdot H \cdot \sqrt{R \cdot e}}{2 \cdot \sqrt[4]{3 \cdot (1 - \nu^2)}} \cdot k_2 \\ &= -\frac{1000 \cdot 2,4 \cdot \sqrt{2,5 \cdot 0,05}}{2 \cdot \sqrt[4]{3 \cdot (1 - 0,2^2)}} \cdot (-1,8867) = 6,14 \text{ kN/ml} < 37,53 \end{aligned}$$

4) Abertura de fisura

La tensión en el refuerzo para una sección fisurada es $\sigma_{s,d} = \frac{44736}{180 + 188} = 121 \text{ MPa}$, y tal como ya se ha descrito en la expresión (3.25) para $\sigma_{s,d} > 345 \cdot S_{rL} = 345 \cdot \frac{0,30}{2} = 51,75$

$$\begin{aligned} \omega_{\max} &= \frac{20}{E_r} \cdot [175 + 3,69 \cdot (\sigma_{s,d} - 345 \cdot S_{rL})] \\ &= \frac{20}{2,1 \cdot 10^5} \cdot [175 + 3,69 \cdot (121,57 - 51,75)] = 0,04 \text{ mm} < 0,05 \end{aligned}$$

Se verifica pues la limitación de apertura de fisura en estructuras de ferrocemento para la contención de agua.

5.3.2.- Análisis de la solera

En el anejo 3 se ha estudiado la solera que proporciona una mejor respuesta en cuanto a esfuerzos en un depósito de este tipo. Como se puede consultar, la solución planteada consiste en una solera plana unida rígidamente a la pared.

El espesor de la solera, como ya se ha hecho en el apartado 5.2, es el mismo que el de la base de la pared; unos 10cm; el doble que en el resto de pared. De esta forma se evitan discontinuidades en el espesor y se suaviza la transición entre pared y solera. A su vez, por ser el espesor de solera el doble que el resto de pared se proporciona a la estructura rigidez suficiente para que en la unión no se produzca un levantamiento de solera debido a la flexión.

5.3.3.- Solución adoptada

La solución adoptada que se muestra en la figura 5.5 consta de una solera de 5m de diámetro y 10cm de espesor. Las paredes tienen un espesor de 5cm y una altura de 2,4m sobre el nivel del suelo. Para la cubierta se ha elegido un casquete esférico para minimizar las flechas que pueden aparecer habida cuenta de que el diámetro es de 5m. La altura de cubierta es de unos 30 a 40cm y el espesor unos 3cm. El proceso para la ejecución de la cubierta se puede hacer de forma similar al ya descrito con el ejemplo 4 del capítulo 4, a base de barras $\phi 8$ y malla de gallinero, con una trampilla de acceso superior de unos 50cm de diámetro.

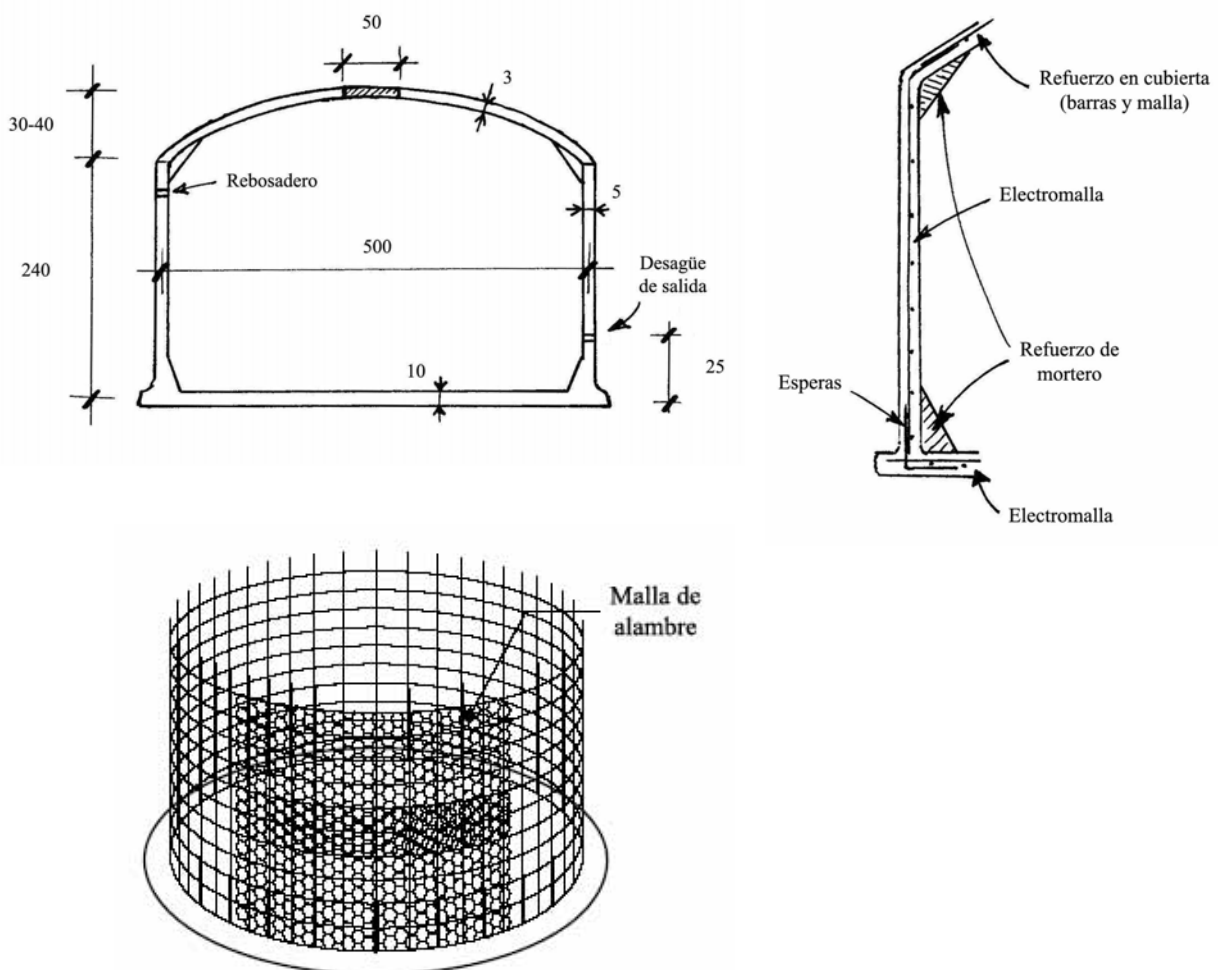


Fig.5.5.- Características y detalles del depósito de 50m³ (cotas en cm).

En este caso, el hecho de tener una unión curva, suavizada entre pared y cubierta responde al hecho de evitar la concentración de tensiones que provocan los contactos angulosos. De esta forma según Watt [4] se pueden ejecutar cubiertas de hasta 5m de diámetro e incluso algo más, con espesores de entre 3 y 5cm. El croquis del depósito planteado se muestra en la figura 5.5.

En lo que refiere a los puntos de entrada y salida de agua, el grifo de salida se va a colocar a unos 25cm del suelo, mientras que el rebosadero va a ir en la parte más alta de la pared.

Las uniones pared-solera y pared-cubierta se van a rigidizar ambas mediante un refuerzo de mortero.

5.4- DIMENSIONAMIENTO DE UN TANQUE DE 150m³

5.4.1.- Análisis de la pared

En este caso, como ya se verá más adelante es necesaria la disposición de una malla electrosoldada que aporte cuantía y actúe como esqueleto de refuerzo. La altura elegida pues, va a ser el ancho de electromalla.

Geometría

Puesto que en proyectos anteriores la malla electrosoldada tenía un ancho de 2,4m, se va a considerar esta altura para el depósito estudiado

$$(1) \quad 150 = \frac{\pi \cdot \phi^2 \cdot 2,4}{4} \longrightarrow \boxed{\phi = 9\text{m}}$$

Esfuerzo axial de cálculo

$$(2) \quad N_K = \gamma \cdot \frac{\phi}{2} \cdot H \cdot K$$

iterando con $e = 5\text{cm}$,

$$\nu = 0,2$$

$$\beta = 2,75$$

$$\beta \cdot H = 6,6 \longrightarrow K = 0,6441$$

$$N_K = 1000 \cdot \frac{9}{2} \cdot 2,4 \cdot 0,6441 = 6956 \text{ kp/ml} = 69563 \text{ N/ml}$$

Obtención del refuerzo

En base a la expresión (3.15) y aplicando $f_{ct,m}$ (1,6MPa de los ensayos en 2.5) un factor de seguridad de 1,5 (teniendo en cuenta malas condiciones en ejecución) $f'_{ct,m} = \frac{f_{ct,m}}{1,5} = 1,10MPa$ y considerando $n=7$ (valor habitual)

$$(3) \quad e_0 = \frac{69563}{1,10 \cdot (9 \cdot 7 + 1000)} = 60mm$$

$$A_{s0} = 9 \cdot e_0 = 540 mm^2/ml$$

Para lograr esta armadura habría que disponer 12 mallas de gallinero, lo cual no tiene ningún sentido porque no se lograría embeber el acero en el mortero y la adherencia entre ambos sería mala. Así pues, plantearemos para este caso una solución como estructura de mortero armado.

Con 4 mallas de gallinero $A_{sm} = 180 mm^2/ml$.

De la expresión (3.16) se obtiene:

$$e_0 = \frac{69563}{1000 \cdot 1,10} - \frac{7}{1000} \cdot 180 = 62mm$$

que es un espesor ligeramente distinto del planteado inicialmente (5cm). Así, vamos a hacer una nueva iteración con $e = 6cm$.

$$(2') \quad \beta = 2,51$$

$$\beta \cdot H = 6,02 \longrightarrow K = 0,616$$

$$N_k = 1000 \cdot \frac{9}{2} \cdot 2,4 \cdot 0,616 = 6653 kp/ml = 66528 N/ml$$

$$(3') \quad A_{s0} = \frac{9 \cdot N_k}{f_{ct,m} \cdot (9 \cdot n + 1000)} = 512 mm^2/ml$$

$$e_0 = \frac{66528}{1000 \cdot 1,10} - \frac{7}{1000} \cdot 180 = 60mm$$

La armadura de refuerzo será

$$A_{s_{ref}} = 512 - 180 = 332 mm^2/ml$$

Para ello se va a disponer una malla electrosoldada de barras Ø5 y espaciamiento de 15cm ($A_{Set} = \frac{\pi \cdot 5^2}{4} = 131 \text{ mm}^2/\text{ml}$). Malla de gallinero y electromalla soportan un axil:

$$N_k = \frac{(180 + 131) \cdot 1,10 \cdot (7 + 1000)}{9} = 40400 \text{ N/ml}$$

Luego, como se muestra en la figura 5.6 habrá que disponer barras de refuerzo longitudinales, para ello se va a estudiar los esfuerzos axiales localmente:

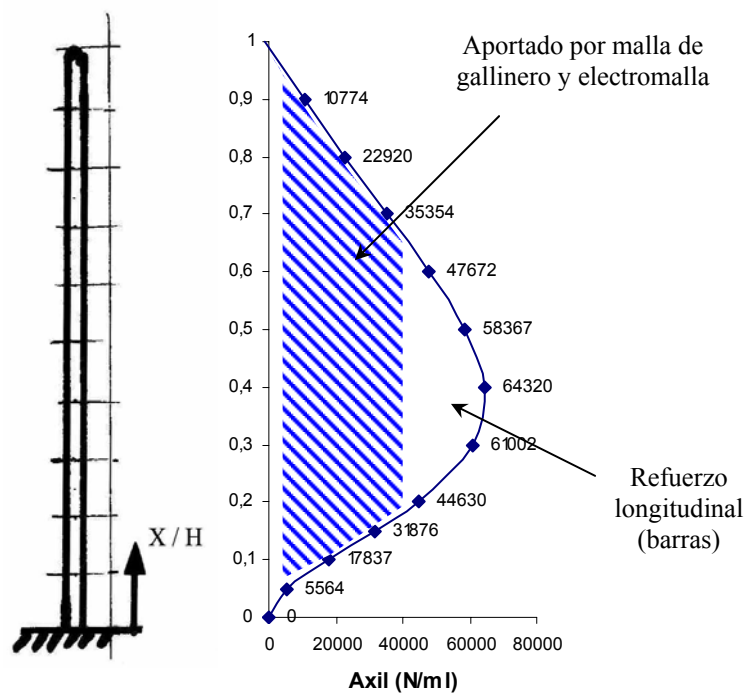


Fig.5.6.- Distribución de la ley de axiles en la pared.

En base a éstos se puede obtener el refuerzo correspondiente a cada punto aplicando el mismo proceso anterior,

X/H	A_s (mm ² /ml)	$A_{s \text{ ref}}$ (mm ²)
1	0	0
0,9	83	0
0,8	176	0
0,7	272	0
0,6	367	5,6
0,5	449	13,8
0,4	495	18,4
0,3	470	15,9

0,2	344	3,3
0,15	245	0
0,1	137	0
0,05	43	0
0	0	0

Tabla 5.1.- Distribución del refuerzo en altura.

Donde la columna central corresponde a los valores de armadura por metro lineal obtenidos mediante la expresión (3.15). A la derecha se disponen las cantidades de refuerzo en valor absoluto (mm^2) necesarias en cada punto descontando la aportación de las mallas de gallinero y electromalla. Así, utilizando barras $\phi 12$ ($A_\phi = 113\text{mm}^2$) para el refuerzo longitudinal sería suficiente disponer una en $X = 0,4 \cdot H = 0,96\text{m}$ y otra en la parte superior para el atado.

Una solución alternativa y más adecuada sería disponer $3\phi 6$ en $0,3 \cdot H$, $0,4 \cdot H$ y $0,5 \cdot H$ respectivamente de modo que $3A_\phi = 85\text{mm}^2 > A_{s,\text{ref total}}$, así como $2\phi 6$ en lugar de $1\phi 12$ en la parte superior. De este modo se reparte el refuerzo y su diámetro es parecido al de la electromalla. Sin embargo, se va a considerar el cálculo con la solución planteada inicialmente.

Bajo estas condiciones la fracción volumétrica (V_f) y la superficie específica (S_r) del refuerzo, dadas por las expresiones (3.11) y (3.12) respectivamente son:

$$V_f = \frac{2 \cdot (A_{sm} + A_{set})}{e_0 \cdot 1000} = \frac{2 \cdot (180 + 188)}{60 \cdot 1000} = 0,6 + 0,63 = 1,23\% < 1,8$$

para el cálculo de la superficie específica, la malla electrosoldada no contabiliza, luego

$$S_r = \frac{4 \cdot V_{fm}}{\phi} = \frac{4 \cdot 0,06}{1,2} = 0,02 \text{ mm}^2 / \text{mm}^3 < 0,05$$

No se cumplen las directivas establecidas por [22] en la IV Conferencia Latinoamericana sobre Ferrocemento (tabla 3.3). Entonces, efectivamente la suposición de estructura de mortero armado establecida para el dimensionamiento es correcta.

Recubrimiento. Espesor de pared

Tal como se describe en 3.2.2 se va a tomar un recubrimiento $r=5\text{mm}$, con lo cual el espesor tomado será $e = e_0 + 2 \cdot r = 70\text{mm}$ (figura 5.3). El espesor de pared no será uniforme, sino que en la base se recrecerá ligeramente para suavizar la unión con el anillo de cimentación.

Comprobaciones

1) Resistencia al agrietamiento en tracción

En relación a la expresión (3.17), la resistencia a la aparición de la primera grieta en la pared del depósito, considerando $R_b=1,60MPa$ como resultado de los ensayos citados en 2.5.1, será

$$\sigma_{fis} = K \cdot S_{rL} + R_b = 20 \cdot \frac{0,02}{2} + 1,60 = 1,80MPa$$

Para el cálculo de la tracción soportada por el ferrocemento σ_{ft} , se ha empleado el espesor ficticio e_0 , que es la parte que se considera que trabajará como tal.

$$\sigma_{ft} = \frac{N_k}{e_0} = \frac{66528}{60} = 1,11MPa < 1,80$$

2) Resistencia a flexión

El momento de fisuración M_{fis} que puede resistir una sección según la expresión (3.19) es

$$M_{fis} = \frac{f_{ct,m} \cdot b \cdot e^2}{6} = \frac{1,60 \cdot 1000 \cdot 70^2}{6} = 130,67 kp \cdot m/ml$$

Por otro lado el momento flector de cálculo, según la expresión (3.18) es

$$M_x = \frac{\gamma \cdot R \cdot e \cdot H}{2 \cdot \sqrt{3 \cdot (1 - \nu^2)}} \cdot k_1 = \frac{1000 \cdot 4,5 \cdot 0,07 \cdot 2,4}{2 \cdot \sqrt{3 \cdot (1 - 0,2^2)}} \cdot 0,8202 = 182,70 kp \cdot m/ml > 130,67$$

Sin embargo, recreciendo la base de la pared hasta 10cm

$$M_{fis} = \frac{f_{ct,m} \cdot b \cdot e^2}{6} = \frac{1,60 \cdot 1000 \cdot 100^2}{6} = 267 kp \cdot m/ml$$

No obstante a efectos de los esfuerzos podemos seguir considerando el mismo espesor en todo el depósito sin cometer mucho error con lo cual,

$$M_x = 182,70 kp \cdot m/ml < 267$$

Se cumple la comprobación a flexión.

3) Resistencia a cortante

Según la expresión (3.22) para el cálculo de la resistencia a cortante habrá que tener en cuenta ahora el ancho de base de 10cm,

$$\begin{aligned}
 V_{u2} &= \left[0,12 \cdot \xi \cdot (100 \cdot \rho_l \cdot f_{ck})^{1/3} - 0,15 \cdot \sigma'_{cd} \right] \cdot b \cdot d \\
 &= \left[0,12 \cdot 3 \cdot (100 \cdot 0,00621 \cdot 12,32)^{1/3} - 0,15 \cdot 0 \right] \cdot 1000 \cdot 50 = 35,47 \text{ kN/ml}
 \end{aligned}$$

donde ξ , ρ_l y f_{ck} se han obtenido según lo descrito en el apartado 3.2.4.3. Para facilitar el cálculo se ha considerado despreciable el efecto del peso propio de la pared en el término σ'_{cd} .

El esfuerzo cortante de cálculo según lo descrito en (3.21) es

$$\begin{aligned}
 V_{rd} = Q_x &= - \frac{\gamma \cdot H \cdot \sqrt{R \cdot e}}{2 \cdot \sqrt[4]{3 \cdot (1 - \nu^2)}} \cdot k_2 \\
 &= - \frac{1000 \cdot 2,4 \cdot \sqrt{4,5 \cdot 0,07}}{2 \cdot \sqrt[4]{3 \cdot (1 - 0,2^2)}} \cdot (-1,8202) = 9,41 \text{ kN/ml} < 35,47
 \end{aligned}$$

4) Abertura de fisura

La tensión en el refuerzo para una sección fisurada es $\sigma_{s,d} = \frac{66528}{180 + 188} = 181 \text{ MPa}$, y tal como ya se ha descrito en la expresión (3.25) para $\sigma_{s,d} > 345 \cdot S_{rL} = 345 \cdot \frac{0,20}{2} = 34,5$

$$\begin{aligned}
 \omega_{\max} &= \frac{20}{E_r} \cdot [175 + 3,69 \cdot (\sigma_{s,d} - 345 \cdot S_{rL})] \\
 &= \frac{20}{2,1 \cdot 10^5} \cdot [175 + 3,69 \cdot (181 - 34,5)] = 0,07 \text{ mm} > 0,05
 \end{aligned}$$

No se cumple la limitación de abertura de fisura, sin embargo hay que considerar que en el punto de máximo axil, también va a contribuir el refuerzo longitudinal con lo cual $\sigma_{s,d}$ será en realidad más pequeña. Esto es si consideramos la aportación del refuerzo longitudinal a lo largo de $0,3 \cdot H \approx 70 \text{ cm}$ (ver figura 5.7) por lo descrito en la obtención del refuerzo,

$$\begin{aligned}
 \sigma_{s,d} &= \frac{N_k(N/70\text{cm})}{A_{s,malla}(mm^2/70\text{cm}) + A_{s,electro}(mm^2/70\text{cm}) + A_\phi(mm^2)} \\
 &= \frac{66528 \cdot \frac{7}{10}}{(180 + 131) \cdot \frac{7}{10} + 113} = 141 \text{ MPa}
 \end{aligned}$$

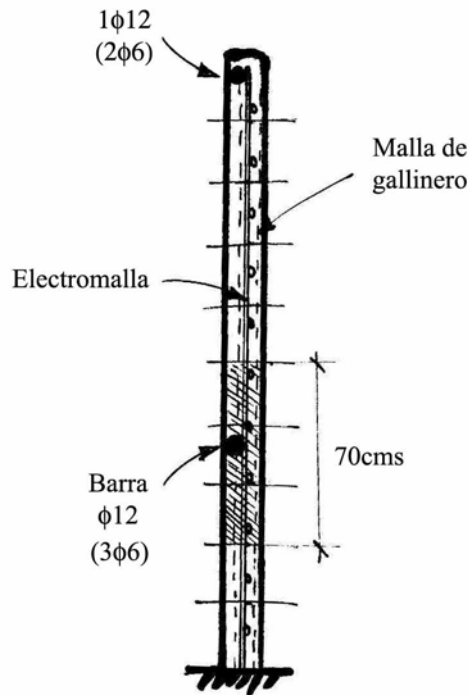


Fig.5.7.- Armadura en una sección transversal de pared.

$$\begin{aligned} \omega_{m\acute{a}x} &= \frac{20}{E_r} \cdot [175 + 3,69 \cdot (\sigma_{s,d} - 345 \cdot S_{rL})] \\ &= \frac{20}{2,1 \cdot 10^5} \cdot [175 + 3,69 \cdot (141 - 34,5)] = 0,05mm \end{aligned}$$

Se cumple la limitación de la abertura de fisura para el caso de estructuras de ferrocemento para el almacenamiento de agua.

5.4.2.- Análisis de la solera

En el caso de un depósito grande como es el caso, la solera más adecuada, que mejor responde en esfuerzos como ya se ha concluido en el anejo 3, es una solera en la cual se tiene por un lado una losa central o disco rodeada por un anillo de cimentación que proporciona un empotramiento en la base de la pared.

Para el refuerzo de la losa va a ser suficiente una malla electrosoldada ya que prácticamente no va a trabajar, las cargas se van a transmitir directamente al terreno.

El espesor de la losa será de unos 10-15cm y su mezcla puede ser más gruesa que la del mortero de las paredes, se puede emplear hormigón 1:2:4 (cemento:grava:arena en volumen).

5.4.3.- Solución adoptada

La solución adoptada está integrada por una solera definida por una losa circular de unos 10-15cm de espesor y un diámetro de 8,7m. Las paredes están rígidamente empotradas en la base en un anillo de cimentación de 30x30cm en el cual queda embebida la electromalla procedente de las paredes. Las paredes tienen una altura de 2,4m y 7cm de espesor. Es frecuente que por las dimensiones de estos depósitos ($\phi > 5m$) tal como apunta Watt [3] no dispongan de cubierta como se muestra en la figura 5.8. Sin embargo, en el caso de hacerla, una solución sería la de ejecutar un pilar en el centro del depósito para partir la luz y como cubierta un elemento laminar troncocónico parecido al del apartado 5.2 pero con espesor mayor (unos 4 o 5cm).

En cuanto a los puntos de entrada y salida de agua se va a pasar el tubo del agua por debajo del anillo de cimentación sobresaliendo en el interior del depósito unos 10cm por encima del nivel del suelo. En lo alto de la pared se va a hacer el rebosadero.

En lo que refiere al refuerzo de acero, además de las mallas de gallinero y la electromalla, también se van a disponer dos barras $\phi 12$, a un metro de altura aproximadamente y en lo alto de la pared.

