

CAPÍTULO 5

ELECCIÓN ÓPTIMA DE UN DEPÓSITO DE AGUA

5.1.- INTRODUCCIÓN

Iniciamos la segunda parte de la tesina, que consiste en dar la posibilidad a una persona sin conocimientos ingenieriles a que pueda escoger aquel depósito que más se adecue a sus necesidades particulares.

El punto de partida es la necesidad de construir un depósito, que en general, lleva implícito un dato básico: su volumen. Conocido este, lo siguiente que nos planteamos es como será el depósito más económico que tenga aquel volumen. O también, cómo será el depósito que ocupe menos espacio, o incluso una combinación de ambas.

Es evidente que tenemos muchas opciones para conseguir un depósito con un volumen dado. Podemos emplear un depósito rectangular de hormigón armado, cilíndrico de hormigón armado, cilíndrico de hormigón pretensado, cilíndrico de hormigón

pretensado y proyectado, y también prefabricado con forma rectangular o cilíndrica. Y no solo esto, una vez elegida la tipología, nos faltará conocer sus dimensiones geométricas óptimas.

Por tanto, para dar solución al problema que planteamos se hace necesario estudiar una población lo más amplia posible de depósitos e ir acotando para cada volumen concreto aquella tipología que resulte más competitiva con los actuales precios del mercado.

Para conocer las dimensiones geométricas y el armado de todos los depósitos de la muestra empleada, se han seguido los criterios establecidos en los anteriores capítulos referentes al cálculo de depósitos. En cuanto al precio de las diferentes unidades de obra se ha consultado a empresas constructoras de ámbito regional y estatal, a fin de establecer unos precios de mercado lo más acordes con la realidad.

En la muestra se han calculado y valorado un total de 672 depósitos diferentes, de los cuales, la mitad, o sea, 336 se han analizado con cubierta, y los otros 336 sin cubierta. Se ha buscado un amplio espectro de volúmenes, desde 100 hasta 50.000 m³, y con alturas de agua muy habituales comprendidas entre los 2,0 y 8,0 m. La muestra de depósitos se ha repartido de la siguiente manera:

- Depósito de volumen 100 m³:

42 depósitos analizados: 7 rectangulares de hormigón armado con alturas de agua de $H_w = 2,0; 3,0; 4,0; 5,0; 6,0; 7,0$ y $8,0$ m; 7 cilíndricos de hormigón armado con alturas de agua de $H_w = 2,0; 3,0; 4,0; 5,0; 6,0; 7,0$ y $8,0$ m; y finalmente 7 cilíndricos de hormigón pretensado con alturas de agua de $H_w = 2,0; 3,0; 4,0; 5,0; 6,0; 7,0$ y $8,0$ m. Que lógicamente se duplican por el hecho de que el depósito puede tener cubierta o no tenerla.

- Depósito de volumen 200 m³:

42 depósitos analizados: con el mismo reparto de tipologías y alturas de agua.

- Depósito de volumen 300 m³:

42 depósitos analizados: con el mismo reparto de tipologías y alturas de agua.

- Depósito de volumen 400 m³:
42 depósitos analizados: con el mismo reparto de tipologías y alturas de agua.

- Depósito de volumen 500 m³:
42 depósitos analizados: con el mismo reparto de tipologías y alturas de agua.

- Depósito de volumen 750 m³:
42 depósitos analizados: con el mismo reparto de tipologías y alturas de agua.

- Depósito de volumen 1.000 m³:
42 depósitos analizados: con el mismo reparto de tipologías y alturas de agua.

- Depósito de volumen 2.500 m³:
42 depósitos analizados: con el mismo reparto de tipologías y alturas de agua.

- Depósito de volumen 5.000 m³:
42 depósitos analizados: con el mismo reparto de tipologías y alturas de agua.

- Depósito de volumen 7.500 m³:
42 depósitos analizados: con el mismo reparto de tipologías y alturas de agua.

- Depósito de volumen 10.000 m³:
42 depósitos analizados: con el mismo reparto de tipologías y alturas de agua.

- Depósito de volumen 15.000 m³:
42 depósitos analizados: con el mismo reparto de tipologías y alturas de agua.

- Depósito de volumen 20.000 m³:
42 depósitos analizados: con el mismo reparto de tipologías y alturas de agua.

- Depósito de volumen 25.000 m³:
42 depósitos analizados: con el mismo reparto de tipologías y alturas de agua.

- Depósito de volumen 35.000 m³:
42 depósitos analizados: con el mismo reparto de tipologías y alturas de agua.

- Depósito de volumen 50.000 m³:
42 depósitos analizados: con el mismo reparto de tipologías y alturas de agua.

En la presente tesina no se han valorado los depósitos pretensados con hormigón proyectado, puesto que se trata de una tecnología empleada por unas empresas muy concretas, con un precio que puede presentar oscilaciones en función de condicionantes de mercado de las propias empresas; y porqué entendemos que una vez conocidas las dimensiones óptimas podremos consultar el precio del depósito proyectado y compararlo con las demás ofertas disponibles. En cualquier caso, hemos podido comprobar que el precio de los depósitos pretensados con hormigón moldeado y con la unión articulada flexible (que es tal como lo hemos planteado en la tesina) tiene un precio muy similar a los mismos depósitos resueltos con hormigón proyectado.

Tampoco se han valorado los depósitos prefabricados por dos motivos, en primer lugar y al igual que en el caso anterior, por tratarse de elementos cuyo precio presenta oscilaciones en función de los condicionantes de mercado de las propias empresas de prefabricados. Y en segundo lugar, por entender que una vez conocidas las dimensiones óptimas del depósito será cuando debamos consultar el precio del mismo depósito prefabricado y compararlo con las diferentes ofertas disponibles de otros constructores.

5.2.- PRECIOS DE MERCADO ADOPTADOS

Después de consultar con diferentes empresas constructoras de ámbito regional y estatal, se han podido establecer unos precios de mercado para las diferentes unidades de obra relacionadas con la construcción de depósitos muy ajustados a la realidad. Conviene tener en cuenta que son precios correspondientes al año 2005.

A los precios de ejecución material se les incrementará un 13% en concepto de gastos generales y un 6% en concepto de beneficio industrial; quedando por tanto, el precio de ejecución por contrata (anterior al IVA).

- 1.- Excavación de tierras de consistencia floja o de tránsito: $2,0 \cdot 1,19 = 2,38 \text{ €/m}^3$
- 2.- Relleno localizado de tierras procedentes de excavación. Extendidas y compactadas: $3,8 \cdot 1,19 = 4,52 \text{ €/m}^3$
- 3.- Suministro y vertido de grava limpia de río o zahorra artificial drenante. Extendida y compactada: $17,25 \cdot 1,19 = 20,53 \text{ €/m}^3$
- 4.- Impermeabilización de trasdós de muro con pintura brea-epoxi: $3,51 \cdot 1,19 = 4,18 \text{ €/m}^2$
- 5.- Suministro y colocación de membrana drenante de polietileno en trasdós de muro con fijación mecánica: $9,03 \cdot 1,19 = 10,75 \text{ €/m}^2$
- 6.- Suministro y vertido de hormigón de limpieza tipo HM-15: $50,0 \cdot 1,19 = 59,50 \text{ €/m}^3$
- 7.- Suministro y vertido de hormigón para armar del tipo HA-30: $70,0 \cdot 1,19 = 83,30 \text{ €/m}^3$
- 8.- Suministro y vertido de hormigón para estructuras pretensadas del tipo HP-35: $80,0 \cdot 1,19 = 95,20 \text{ €/m}^3$
- 9.- Suministro y vertido de hormigón proyectado para estructuras pretensadas del tipo HP-35 con espesores de entre 18 y 22 cm.: $380,0 \cdot 1,19 = 452,00 \text{ €/m}^3$
- 10.- Suministro y colocación de encofrado visto en paramentos planos: $30,0 \cdot 1,19 = 35,70 \text{ €/m}^2$
- 11.- Suministro y colocación de encofrado trepante visto en paramentos planos de altura

superior a los 6,5 m: $50,0 \cdot 1,19 = 59,50 \text{ €/m}^2$

12.- Suministro y colocación de encofrado visto en paramentos curvos: $50,0 \cdot 1,19 = 59,50 \text{ €/m}^2$

13.- Suministro y colocación de encofrado trepante visto en paramentos curvos de altura superior a los 6,5 m: $65,0 \cdot 1,19 = 77,35 \text{ €/m}^2$

14.- Suministro y colocación de cimbra: $9,5 \cdot 1,19 = 11,30 \text{ €/m}^3$

15.- Suministro y colocación de armaduras pasivas en barras corrugadas: $0,9 \cdot 1,19 = 1,07 \text{ €/kg}$

16.- Suministro y colocación de armaduras activas para pretensado en el caso de tener un contrafuerte. Incluye las cabezas de anclaje, las operaciones de tesado, los andamios para el gato, la grúa, los dos operarios y las diferentes ayudas necesarias: $4,54 \cdot 1,19 = 5,40 \text{ €/kg}$

17.- Suministro y colocación de armaduras activas para pretensado en el caso de tener dos contrafuertes. Incluye las cabezas de anclaje, las operaciones de tesado, los andamios para el gato, la grúa, los dos operarios y las diferentes ayudas necesarias: $4,96 \cdot 1,19 = 5,90 \text{ €/kg}$

18.- Suministro y colocación de armaduras activas para pretensado en el caso de tener tres contrafuertes. Incluye las cabezas de anclaje, las operaciones de tesado, los andamios para el gato, la grúa, los dos operarios y las diferentes ayudas necesarias: $5,38 \cdot 1,19 = 6,40 \text{ €/kg}$

19.- Suministro y colocación de armaduras activas para pretensado en el caso de tener cuatro contrafuertes. Incluye las cabezas de anclaje, las operaciones de tesado, los andamios para el gato, la grúa, los dos operarios y las diferentes ayudas necesarias: $5,80 \cdot 1,19 = 6,90 \text{ €/kg}$

20.- Junta de estanqueidad e hidroexpansiva a disponer en los arranques de muros:
 $24,80 \cdot 1,19 = 29,50 \text{ €/ml}$

21.- Junta de dilatación provista de junta de estanqueidad: $18,07 \cdot 1,19 = 21,50 \text{ €/ml}$

22.- Suministro y colocación de neopreno zunchado para soporte de muro o cubierta:
 $27,31 \cdot 1,19 = 32,50 \text{ €/dm}^3$

5.3.- ANÁLISIS DE PAREDES Y SOLERA EN LA MUESTRA DE DEPÓSITOS

5.3.1.- Depósitos rectangulares de hormigón armado

Todos los depósitos rectangulares que se han estudiado en la muestra están planteados con dos celdas. Ello es una buena práctica que se aconseja para poder seguir dando servicio en caso de tener que reparar o limpiar una de ellas. Se ha intentado buscar una geometría lo más cuadrada posible, como garantía de tener el mínimo perímetro a igualdad de superficie, de ahí que una misma celda tenga una dimensión aproximadamente doble a la otra.

El espesor mínimo de pared adoptado por razones constructivas es de 30 cm. Un espesor menor impediría el paso de la bomba de hormigonado. Se ha considerado que el depósito se encuentra enterrado hasta la mitad de la pared. Y el resguardo adoptado en todos los casos es de 50 cm.

En cuanto a la fisuración se ha supuesto que el líquido contenido por el depósito no es químicamente agresivo y que no se encuentra excesivamente solicitado por factores ambientales extremos, con lo que hemos adoptado una abertura máxima de fisura de $w_{\text{máx}} = 0,2 \text{ mm}$, tanto en la cara exterior como en la interior.

Para el cálculo de la pared se han hecho las siguientes consideraciones, que entendemos son suficientemente generalistas:

- Peso específico del agua: $\gamma_w = 10 \text{ KN/m}^3$.
- Peso específico de las tierras del relleno: $\gamma_t = 19 \text{ KN/m}^3$.
- Angulo de rozamiento interno de las tierras del relleno: $\varphi = 27,5^\circ$
- Sobrecarga sobre el relleno: $q = 4,0 \text{ KN/m}^2$.
- Tensión admisible sobre el terreno de cimentación: $\sigma_{adm} = 2,0 \text{ kp/cm}^2$.
- Coeficiente de rozamiento hormigón-suelo: $\mu = 0,577$.
- También se considera el axil que transmite la reacción de la cubierta al muro.

Con todo ello se han calculado los momentos flectores de eje horizontal y eje vertical, así como el máximo esfuerzo cortante haciendo uso de las tablas de Bares (1970). También se ha buscado el valor de la tracción que genera el empuje de agua, y por supuesto, se ha impuesto una abertura de fisura inferior al máximo admisible de 0,2 mm. Todo combinado y con los coeficientes de seguridad establecidos en el segundo capítulo de la tesina, pudiendo encontrar las dimensiones geométricas y armaduras necesarias de la pared.

Para los depósitos de pequeño tamaño se considera una única solera por razones funcionales y económicas. Mientras que para los de mayor tamaño, se dispone una zapata en el muro perimetral, y una solera de 20 cm. de espesor en la parte central, ya mucho menos solicitada. El conjunto del muro perimetral con su zapata debe verificar la estabilidad al deslizamiento y al vuelco con los coeficientes que marca Jiménez Salas et al (1981) de 1,50 y 2,0 respectivamente. Para soportar la cubierta también serán necesarios pilares y zapatas interiores.

Una vez establecida la geometría y armaduras de cada depósito se deben ubicar con todas las unidades constructivas que lo componen y buscar su precio final. Hemos considerado los siguientes capítulos:

- Movimiento de tierras, drenaje y preparación del terreno.
- Pilares y zapatas interiores.

- Zapatas de los muros perimetrales.
- Solera interior del depósito.
- Alzados de los muros perimetrales.
- Vigas principales de cubierta.
- Cubierta del depósito.

Dada la repercusión que supone para el depósito el disponer de cubierta, especialmente en los de gran superficie, se han separado dos situaciones: los depósitos que tienen cubierta y aquellos que no la tienen.

En el Anejo de Cálculo adjuntamos el cálculo de todos los depósitos rectangulares de la muestra, así como la cubicación y coste de los mismos. Se trata de un total de 224 depósitos rectangulares analizados, con un volumen comprendido entre 100 y 50.000 m³, y una altura de agua entre 2,0 y 8,0 m.

5.3.2.- Depósitos cilíndricos de hormigón armado

Los depósitos cilíndricos planteados no se han dividido en dos celdas como sucedía en el caso rectangular, por ser una práctica muy poco habitual en la tipología cilíndrica. El espesor mínimo de pared adoptado por razones constructivas también es de 30 cm. Se ha considerado que el depósito se encuentra enterrado hasta la mitad de la pared. Y el resguardo adoptado en todos los casos es de 50 cm.

En cuanto a la fisuración también se ha supuesto que el líquido contenido por el depósito no es químicamente agresivo y que no se encuentra excesivamente solicitado por factores ambientales extremos, con lo que hemos adoptado una abertura máxima de fisura de $w_{\text{máx}} = 0,2$ mm, tanto en la cara exterior como en la interior.

Para el cálculo de la pared solo se han considerado los esfuerzos debidos a la carga hidrostática, puesto que los valores del empuje de tierras que hemos obtenido es muy reducido, y en general, quedan por debajo la armadura mínima. Se han hecho las siguientes consideraciones, que entendemos son suficientemente habituales:

- Peso específico del agua: $\gamma_w = 10 \text{ KN/m}^3$.
- Tensión admisible sobre el terreno de cimentación: $\sigma_{adm} = 2,0 \text{ kp/cm}^2$.
- Coeficiente de rozamiento hormigón-suelo: $\mu = 0,577$.
- También se considera el axil que transmite la reacción de la cubierta al muro.

Para poder resolver el depósito cilíndrico ha sido necesario encontrar las cuatro constantes de integración C_1 , C_2 , C_3 y C_4 que permiten hallar el campo de desplazamientos y esfuerzos en una lámina cilíndrica como la planteada. La simplificación que puede hacerse en muchos casos de considerar nulas las dos primeras constantes, aquí no ha sido posible contemplarla, pues son muchos los depósitos analizados con geometrías poco convencionales, que no cumplen los requisitos para poder realizar aquella simplificación.

Una vez resuelto el sistema lineal de cuatro ecuaciones con cuatro incógnitas, ya es inmediato conocer el valor del momento flector y esfuerzo cortante en el arranque, así como el esfuerzo axil de tracción. Que combinado con el cálculo de la abertura de fisuras nos permite dimensionar la pared del depósito siguiendo lo establecido en el segundo capítulo de la tesina.

En toda la muestra de depósitos cilíndricos armados se ha dispuesto una zapata en el muro perimetral, y una solera de 20 cm. de espesor en la parte central. El conjunto del muro perimetral con su zapata debe verificar la estabilidad al deslizamiento y al vuelco en las mismas condiciones que hemos enunciado para el caso rectangular.

Una vez establecida la geometría y armaduras de cada depósito se deben cubicar con todas las unidades constructivas que lo componen y buscar su precio final. Hemos considerado los siguientes capítulos:

- Movimiento de tierras, drenaje y preparación del terreno.
- Pilares y zapatas interiores.
- Zapatas de los muros perimetrales.
- Solera interior del depósito.
- Alzados de los muros perimetrales.

- Vigas principales de cubierta.
- Cubierta del depósito.

También se han separado dos situaciones: los depósitos que tienen cubierta y aquellos que no la tienen.

En el Anejo de Cálculo adjuntamos el cálculo de todos los depósitos cilíndricos de hormigón armado de la muestra, así como la cubicación y coste de los mismos. Se trata de un total de 224 depósitos cilíndricos analizados, con un volumen comprendido entre 100 y 50.000 m³, y una altura de agua entre 2,0 y 8,0 m.

5.3.3.- Depósitos cilíndricos pretensados con hormigón moldeado.

El espesor mínimo de pared adoptado por razones constructivas en toda la muestra de depósitos cilíndricos de hormigón pretensado ha sido de 30 cm. Ello es así porque un espesor menor no permite el paso de la bomba de hormigonado. A fin de mantener la coherencia con las tipologías anteriores, también se ha considerado que el depósito se encuentra enterrado hasta la mitad de la pared y con un resguardo de 50 cm.

En cuanto a la fisuración también se ha supuesto que el líquido contenido por el depósito no es químicamente agresivo y que no se encuentra excesivamente solicitado por factores ambientales extremos, con lo que hemos adoptado una abertura máxima de fisura de $w_{m\acute{a}x} = 0,2$ mm, tanto en la cara exterior como en la interior.

Para el cálculo de la pared se ha buscado la Función Hidrostática de Pretensado (FHP) y también la Función Uniforme de Pretensado (FUP), adoptando una tensión de compresión circunferencial adicional mínima de $\sigma_{res} = 1,0$ N/mm². Se han valorado las pérdidas de pretensado suponiendo que los cordones son del tipo lubricado.

Para todos los depósitos de la muestra se ha hecho el cálculo en el caso de tener uno, dos, tres o cuatro contrafuertes, escogiendo para cada caso la solución más económica. También se ha valorado manera diferente la armadura activa en función del número de

contrafuertes, ya que de ello depende directamente el número de cabezas de anclaje y operaciones de tesado.

En toda la muestra de depósitos cilíndricos pretensados se ha supuesto que la unión pared-solera es del tipo articulada flexible. Por tanto, los esfuerzos en el arranque serán casi despreciables y hemos podido disponer una solera de tan solo 20 cm. de espesor. A excepción lógicamente de las zapatas de los pilares interiores que soportan la cubierta que tendrán un canto mayor por cuestiones de punzonamiento.

Una vez establecida la geometría y armaduras de cada depósito se deben cubicar con todas las unidades constructivas que lo componen y buscar su precio final. Hemos considerado los siguientes capítulos:

- Movimiento de tierras, drenaje y preparación del terreno.
- Pilares y zapatas interiores.
- Solera del depósito.
- Alzados de los muros perimetrales.
- Vigas principales de cubierta.
- Cubierta del depósito.

También se han separado dos situaciones: los depósitos que tienen cubierta y aquellos que no la tienen.

En el Anejo de Cálculo adjuntamos el cálculo de todos los depósitos cilíndricos de hormigón pretensado de la muestra, así como la cubicación y coste de los mismos. Se trata de un total de 224 depósitos cilíndricos analizados, con un volumen comprendido entre 100 y 50.000 m³, y una altura de agua entre 2,0 y 8,0 m.

5.3.4.- Depósitos cilíndricos pretensados con hormigón proyectado

Una posible alternativa para resolver un depósito cilíndrico pretensado es emplear hormigón proyectado, en lugar del hormigón moldeado contemplado en nuestra muestra

de depósitos.

En este caso, no existen limitaciones constructivas al espesor de pared, y en general se emplean espesores comprendidos entre los 18 y 22 cm. También es habitual disponer una unión monolítica entre la pared y la solera

Ahora bien, en la presente tesina no se han valorado los depósitos pretensados con hormigón proyectado, puesto que se trata de una tecnología empleada por unas empresas muy concretas, con un precio que puede presentar oscilaciones en función de condicionantes de mercado de las propias empresas; y porqué entendemos que una vez conocidas las dimensiones óptimas podremos consultar el precio del depósito proyectado y compararlo con las demás ofertas disponibles.

Por otra parte, queremos destacar la similitud de precio existente entre el depósito pretensado de hormigón moldeado planteado con unión articulada flexible, y otro depósito de la misma capacidad pero resuelto con hormigón proyectado y unión monolítica. Veámoslo:

i) Depósito cilíndrico pretensado con hormigón moldeado (coste de 1 m²):

- Hormigón de pretensado HP-35: $0,30 \text{ m}^3 \cdot 95,20 \text{ €/m}^3 = 28,6 \text{ €}$
- Armaduras pasivas, barras corrugadas: $44 \text{ kg/m}^3 \cdot 0,30 \text{ m}^3 \cdot 1,07 \text{ €/kg} = 14,1 \text{ €}$
- Encofrado curvo visto: $2,0 \text{ m}^2 \cdot 59,50 \text{ €/m}^2 = 119,0 \text{ €}$

Total: 162 €

ii) Depósito cilíndrico pretensado con hormigón proyectado (coste de 1 m²):

- Hormigón proyectado HP-35: $0,20 \text{ m}^3 \cdot 452,0 \text{ €/m}^3 = 90,4 \text{ €}$
- Armaduras pasivas, barras corrugadas: $85 \text{ kg/m}^3 \cdot 0,20 \text{ m}^3 \cdot 1,07 \text{ €/kg} = 18,2 \text{ €}$
- Encofrado curvo visto: $1,0 \text{ m}^2 \cdot 59,50 \text{ €/m}^2 = 59,5 \text{ €}$

Total: 168 €

Vemos que suponiendo una armadura activa análoga en los dos casos, obtenemos un precio francamente similar.

5.3.5.- Depósitos prefabricados

Tampoco se han valorado los depósitos prefabricados por dos motivos, en primer lugar y al igual que en el caso anterior, por tratarse de elementos cuyo precio presenta oscilaciones en función de los condicionantes de mercado de las propias empresas de prefabricados. Y en segundo lugar, por entender que una vez conocidas las dimensiones óptimas del depósito será cuando debamos consultar el precio del depósito prefabricado y compararlo con las diferentes ofertas disponibles de otros constructores.

5.4.- ANÁLISIS DE LOS PILARES Y ZAPATAS INTERIORES EN LA MUESTRA DE DEPÓSITOS

5.4.1.- Pilares interiores

Los pilares son los encargados de soportar la cubierta transmitiendo sus cargas a las zapatas interiores, que conviene independizar del resto de la solera del depósito. En los depósitos rectangulares se disponen alineados en filas separadas 5,0 m. y con una separación entre ellos de unos 10,0 m. Ello significa que las vigas principales de cubierta tendrán una luz de 10,0 m. y las placas de cubrición de 5,0 m. En el caso cilíndrico se disponen en alineaciones circulares y con separaciones análogas al caso anterior.

Se propone usar unos pilares cuadrados de 0,45 m. de lado en todos los casos, armados con 8 ϕ 12 y cercos ϕ 8c/20 cm. Ello equivale a tener una cuantía de 55 kg/m^3 ; valor que lógicamente emplearemos en la cubicación de los diferentes depósitos de la muestra.

5.4.2.- Zapatas interiores

En cuanto a las zapatas interiores, se han dimensionado para que con la carga axial que le transmite la cubierta por medio del pilar, así como la carga de agua con el depósito lleno, transmitan una tensión al terreno de cimentación inferior a la tensión admisible que hemos establecido en $\sigma_{adm} = 2,0 \text{ kp/cm}^2$.

Adjuntamos en el Anejo de Cálculo la justificación del dimensionamiento de las zapatas interiores, con su cubicación de hormigón, armaduras y encofrado.

Por su parte, la solera interior es un elemento estructural muy poco solicitado, para el que hemos adoptado un espesor constante de 20 cm. La armadura mínima a disponer en sus dos caras es de malla $\emptyset 10c/15 \times 15 \text{ cm}$, lo que supone una cuantía de 91 kg/m^3 .

5.5.- ANÁLISIS DE LA CUBIERTA EN LA MUESTRA DE DEPÓSITOS

5.5.1.- Placas de cubierta

Las placas de cubierta pueden construirse en un taller de prefabricación y transportarse posteriormente a la obra. Son las responsables últimas del cubrimiento del depósito. Su luz de cálculo es de 5,0 m, y apoyan sobre las propias paredes del depósito y sobre las vigas principales. Su espesor es de 15 cm.

Han sido calculadas para soportar su propio peso, una capa de grava de 10 cm, así como una sobrecarga de uso de 100 kp/m^2 . En el Anejo de Cálculo adjuntamos toda la justificación de la que se desprende la siguiente cubicación:

- Hormigón para armar HA-30: $0,15 \text{ m}^3/\text{m}^2$

- Armaduras pasivas en barras corrugadas: $18,60 \text{ kg/m}^2$
- Encofrado plano visto (laterales placa): $0,36 \text{ m}^2/\text{m}^2$

5.5.2.- Vigas principales de cubierta

Las vigas principales de cubierta apoyan sobre las paredes perimetrales del depósito y en los pilares interiores. Sobre ellas descansan las placas. Su luz de cálculo es de 10,00 m. Proponemos que sean unas vigas de sección rectangular de 45 cm. de anchura y 70 cm. de canto.

En el Anejo de Cálculo adjuntamos toda la justificación de la que se desprende la siguiente cubicación:

- Hormigón para armar HA-30: $0,32 \text{ m}^3/\text{ml}$
- Armaduras pasivas en barras corrugadas: 53 kg/ml
- Encofrado plano visto (laterales y fondo viga): $1,85 \text{ m}^2/\text{ml}$
- Cimbra: $0,55 \cdot H \text{ m}^3/\text{ml}$

5.6.- RESUMEN DE LA MUESTRA DE DEPÓSITOS ANALIZADOS

A continuación exponemos el resumen de toda la muestra de depósitos analizados. Para cada volumen de depósito (100, 200, 300, 400, 500, 750, 1.000, 2.500, 5.000, 7.500, 10.000, 15.000, 20.000, 25.000, 35.000 y 50.000 m^3) se expone, al final de este apartado y en unas hojas de cálculo, el coste total de cada depósito para:

- 14 tipologías de depósito rectangular de hormigón armado: 7 para el caso con cubierta y otras 7 para el caso sin cubierta.
- 14 tipologías de depósito cilíndrico de hormigón armado: 7 para el caso con

cubierta y otras 7 para el caso sin cubierta.

- 14 tipologías de depósito cilíndrico de hormigón pretensado: 7 para el caso con cubierta y otras 7 para el caso sin cubierta.

Por tanto, estamos mostrando el análisis de un total de 672 depósitos. Cualquier lector sin conocimientos ingenieriles podrá encontrar el tipo de depósito que más se adecue a sus necesidades concretas. Podrá conocer de manera rápida y sencilla la mejor tipología constructiva, su coste y la superficie ocupada por el mismo.

De entre ellas hacemos un resumen de las tipologías más económicas para cada volumen:

i) Depósito de volumen 100 m³ con cubierta:

El depósito de menor coste para la capacidad de 100 m³ con cubierta es claramente el rectangular con 3,0 m. de altura de agua (2 celdas de 5,50x3,0 m); y también, aunque en menor medida, los cilíndricos de hormigón armado de 2,0 y 3,0 m. de altura de agua (R=4,0 y 3,30 m. respectivamente). Sería impensable plantearse para este caso tipologías de hormigón pretensado.

ii) Depósito de volumen 100 m³ sin cubierta:

El depósito de menor coste para la capacidad de 100 m³ sin cubierta es claramente el cilíndrico de hormigón armado con 2,0 m. de altura de agua (R=4,0 m); y también, aunque en menor medida, los rectangulares de 2,0 y 3,0 m. de altura de agua (2 celdas de 7,50x3,50 y 5,50x3,0 m. respectivamente). Tampoco nos podemos plantear para este caso tipologías de hormigón pretensado.

iii) Depósito de volumen 200 m³ con cubierta:

Para los depósitos de menor coste correspondientes a la capacidad de 200 m³ con cubierta tenemos un amplio abanico de opciones muy competitivas: rectangulares de 2,0 y 3,0 m. de altura de agua (2 celdas de 10,0x5,0 y 8,50x4,0 m. respectivamente); y

cilíndricos de hormigón armado de 3,0 y 4,0 m. de altura de agua ($R=4,70$ y $4,0$ m. respectivamente). El caso pretensado no es aplicable en este caso.

iv) Depósito de volumen 200 m^3 sin cubierta:

El depósito de menor coste correspondiente a la capacidad de 200 m^3 sin cubierta es el rectangular de 2,0 m. de altura de agua (2 celdas de $10,0 \times 5,0$ m). También los cilíndricos de hormigón armado de 2,0 y 3,0 m. de altura de agua ($R=5,70$ y $4,70$ m. respectivamente). El caso pretensado no es aplicable en este caso.

v) Depósito de volumen 300 m^3 con cubierta:

El depósito de menor coste correspondiente a la capacidad de 300 m^3 con cubierta es el rectangular de 3,0 m. de altura de agua (2 celdas de $10,0 \times 5,0$ m). También los cilíndricos de hormigón armado de 3,0 y 4,0 m. de altura de agua ($R=5,70$ y $5,0$ m. respectivamente). El caso pretensado no es aplicable en este caso.

vi) Depósito de volumen 300 m^3 sin cubierta:

Los depósitos de menor coste correspondientes a la capacidad de 300 m^3 sin cubierta son los cilíndricos de hormigón armado de 2,0 y 3,0 m. de altura de agua ($R=7,0$ y $5,70$ m. respectivamente). También son competitivos, aunque un poco menos, los rectangulares de 2,0 y 3,0 m. de altura de agua (2 celdas de $15,0 \times 5,0$ y $10,0 \times 5,0$ m. respectivamente). El caso pretensado no es aplicable en este caso.

vii) Depósito de volumen 400 m^3 con cubierta:

El depósito más claramente competitivo desde el punto de vista económico para la capacidad de 400 m^3 con cubierta es el cilíndrico de hormigón armado con 4,0 m. de altura de agua ($R=5,70$ m); también, aunque menos el de 5,0 m. de altura de agua ($R=5,10$ m). En este caso, la tipología rectangular es más cara que la cilíndrica, y el caso pretensado mucho más.

viii) *Depósito de volumen 400 m³ sin cubierta:*

El depósito más claramente competitivo des del punto de vista económico para la capacidad de 400 m³ sin cubierta es el cilíndrico de hormigón armado con 2,0 m. de altura de agua (R=8,0 m). Cualquier otra solución queda economicamente más alejada.

ix) *Depósito de volumen 500 m³ con cubierta:*

El depósito más claramente competitivo des del punto de vista económico para la capacidad de 500 m³ con cubierta es el cilíndrico de hormigón armado con 5,0 m. de altura de agua (R=5,70 m), también, aunque menos el de 6,0 m. de altura de agua (R=5,20 m). En este caso, la tipología rectangular es bastante más cara que la cilíndrica, y el caso pretensado mucho más.

x) *Depósito de volumen 500 m³ sin cubierta:*

Los dos depósitos más claramente competitivos des del punto de vista económico para la capacidad de 500 m³ sin cubierta son los cilíndricos de hormigón armado con 2,0 y 3,0 m. de altura de agua (R=9,0 y 7,50 m. respectivamente). Cualquier otra solución queda económicamente más alejada.

xi) *Depósito de volumen 750 m³ con cubierta:*

Los depósitos más claramente competitivos des del punto de vista económico para la capacidad de 750 m³ con cubierta son los cilíndricos de hormigón armado con 3,0, 4,0 y 5,0 m. de altura de agua (R=9,0, 8,0 y 7,0 m. respectivamente). En este caso, las tipologías rectangular y pretensada son soluciones más caras.

xii) *Depósito de volumen 750 m³ sin cubierta:*

El depósito más claramente competitivo des del punto de vista económico para la capacidad de 750 m³ sin cubierta es el cilíndrico de hormigón armado con 3,0 m. de altura de agua (R=9,0 m). En este caso, las tipologías rectangular y pretensada también

son soluciones más caras.

xiii) Depósito de volumen 1.000 m³ con cubierta:

Los depósitos más claramente competitivos desde el punto de vista económico para la capacidad de 1.000 m³ con cubierta son los cilíndricos de hormigón armado con 4,0 y 5,0 m. de altura de agua (R=9,0 y 8,0 m. respectivamente). En este caso, las tipologías rectangular y pretensada son soluciones más caras, si bien se aprecia un acercamiento de los depósitos pretensados a precios más razonables.

xiv) Depósito de volumen 1.000 m³ sin cubierta:

Los depósitos más claramente competitivos desde el punto de vista económico para la capacidad de 1.000 m³ sin cubierta son los cilíndricos de hormigón armado con 3,0 y 4,0 m. de altura de agua (R=10,50 y 9,0 m. respectivamente). En este caso, las tipologías rectangular y pretensada son soluciones más caras.

xv) Depósito de volumen 2.500 m³ con cubierta:

Los depósitos más claramente competitivos desde el punto de vista económico para la capacidad de 2.500 m³ con cubierta son los cilíndricos de hormigón armado con 4,0 y 5,0 m. de altura de agua (R=14,50 y 13,0 m. respectivamente). La tipología rectangular es una solución claramente más cara. Por contra, ya nos encontramos por primera vez, que el depósito cilíndrico de hormigón pretensado de 8,0 m. de columna de agua (R=10,0 m) puede competir con los dos cilíndricos anteriores.

xvi) Depósito de volumen 2.500 m³ sin cubierta:

Los depósitos más claramente competitivos desde el punto de vista económico para la capacidad de 2.500 m³ sin cubierta son los cilíndricos de hormigón armado con 3,0, 4,0 y 5,0 m. de altura de agua (R=16,50, 14,50 y 13,0 m. respectivamente). En este caso, las tipologías rectangular y pretensada son soluciones más caras.

xvii) Depósito de volumen 5.000 m³ con cubierta:

Los mejores depósitos desde el punto de vista económico para la capacidad de 5.000 m³ con cubierta son los cilíndricos de hormigón armado con 4,0 y 5,0 m. de altura de agua (R=20,0 y 18,0 m. respectivamente). Pero incluso se presentan como mejores soluciones los depósitos cilíndricos de hormigón pretensado con 7,0 y 8,0 m. de columna de agua (R=15,50 y 14,50 m. respectivamente). La tipología rectangular es una solución totalmente inasumible.

xviii) Depósito de volumen 5.000 m³ sin cubierta:

El depósito más claramente competitivo desde el punto de vista económico para la capacidad de 5.000 m³ sin cubierta es el cilíndrico de hormigón armado con 4,0 m. de altura de agua (R=20,0 m). En este caso, las tipologías rectangular y pretensada son soluciones más caras.

ix) Depósito de volumen 7.500 m³ con cubierta:

Para los depósitos con cubierta de capacidad 7.500 m³ solo tenemos dos posibilidades en cuanto al coste, la solución cilíndrica de hormigón armado con 6,0 m. de altura de agua (R=20,0 m), y las soluciones cilíndricas pretensadas con 6,0 y 7,0 m. de altura de agua (R=20,0 y 18,50 m. respectivamente). La tipología rectangular es una solución totalmente inasumible.

xx) Depósito de volumen 7.500 m³ sin cubierta:

Los depósitos más claramente competitivos desde el punto de vista económico para la capacidad de 7.500 m³ sin cubierta son los cilíndricos de hormigón armado con 4,0 y 5,0 m. de altura de agua (R=24,50 y 22,0 m. respectivamente). En este caso, las tipologías rectangular y pretensada son soluciones más caras.

xxi) Depósito de volumen 10.000 m³ con cubierta:

Para los depósitos con cubierta de capacidad 10.000 m³ la solución claramente más competitiva es la solución cilíndrica pretensada de 8,0 m. de altura de agua (R=20,0 m). También, pero en menor medida, la solución cilíndrica de hormigón armado con 5,0 m. de altura de agua (R=25,50 m). La tipología rectangular es una solución totalmente inasumible.

xxii) Depósito de volumen 10.000 m³ sin cubierta:

Los depósitos más claramente competitivos desde el punto de vista económico para la capacidad de 10.000 m³ sin cubierta son los cilíndricos de hormigón armado con 4,0 y 5,0 m. de altura de agua (R=28,50 y 25,50 m. respectivamente). Ya nos encontramos por primera vez que la tipología pretensada en los depósitos sin cubierta empieza a ser competitiva. Así, también nos podríamos plantear usar depósitos cilíndricos pretensados de 4,0 y 5,0 m. de altura de agua (R=28,50 y 25,50 m. respectivamente).

xxiii) Depósito de volumen 15.000 m³ con cubierta:

El depósito más claramente competitivo desde el punto de vista económico para la capacidad de 15.000 m³ con cubierta es el cilíndrico de hormigón pretensado con 8,0 m. de altura de agua (R=24,50 m). En este caso, las tipologías rectangular y cilíndrica de hormigón armado son soluciones más caras.

xxiv) Depósito de volumen 15.000 m³ sin cubierta:

Los depósitos más claramente competitivos desde el punto de vista económico para la capacidad de 15.000 m³ sin cubierta son los cilíndricos de hormigón armado con 4,0 y 5,0 m. de altura de agua (R=35,0 y 31,0 m. respectivamente). También nos podemos plantear usar depósitos cilíndricos pretensados de 5,0 y 6,0 m. de altura de agua (R=31,0 y 28,50 m. respectivamente).

xxv) Depósito de volumen 20.000 m³ con cubierta:

Los dos depósitos más claramente competitivos desde el punto de vista económico para la capacidad de 20.000 m³ con cubierta son los cilíndricos de hormigón pretensado con 7,0 y 8,0 m. de altura de agua (R=30,50 y 28,50 m. respectivamente). En este caso, las tipologías rectangular y cilíndrica de hormigón armado son soluciones más caras.

xxvi) Depósito de volumen 20.000 m³ sin cubierta:

Los depósitos más claramente competitivos desde el punto de vista económico para la capacidad de 20.000 m³ sin cubierta son el cilíndrico de hormigón armado con 4,0 m. de altura de agua (R=40,0 m), y el cilíndrico pretensado con 6,0 m. de altura de agua (R=33,0 m).

xxvii) Depósito de volumen 25.000 m³ con cubierta:

Los dos depósitos más claramente competitivos desde el punto de vista económico para la capacidad de 25.000 m³ con cubierta son los cilíndricos de hormigón pretensado con 7,0 y 8,0 m. de altura de agua (R=34,0 y 32,0 m. respectivamente). En este caso, las tipologías rectangular y cilíndrica de hormigón armado son soluciones más caras.

xxviii) Depósito de volumen 25.000 m³ sin cubierta:

Los depósitos más claramente competitivos desde el punto de vista económico para la capacidad de 25.000 m³ sin cubierta son los cilíndricos de hormigón pretensado de 5,0 y 6,0 m. de altura de agua (R=40,0 y 36,50 m. respectivamente); y también, en menor medida, los cilíndricos de hormigón armado de 4,0 y 5,0 m. de altura de agua (R=45,0 y 40,0 m. respectivamente).

xxix) Depósito de volumen 35.000 m³ con cubierta:

Los dos depósitos más claramente competitivos desde el punto de vista económico para la capacidad de 35.000 m³ con cubierta son los cilíndricos de hormigón pretensado con

7,0 y 8,0 m. de altura de agua (R=40,0 y 37,50 m. respectivamente). En este caso, las tipologías rectangular y cilíndrica de hormigón armado son soluciones más caras.

xxx) Depósito de volumen 35.000 m³ sin cubierta:

El depósito más competitivo des del punto de vista económico para la capacidad de 35.000 m³ sin cubierta son los cilíndricos de hormigón armado de 4,0 y 5,0 m. de altura de agua (R=53,0 y 47,50 m. respectivamente); y también, los cilíndricos de hormigón pretensado de 5,0 y 6,0 m. de altura de agua (R=47,50 y 43,50 m. respectivamente).

xxxi) Depósito de volumen 50.000 m³ con cubierta:

El depósito más claramente competitivo des del punto de vista económico para la capacidad de 50.000 m³ con cubierta es el cilíndrico de hormigón pretensado con 8,0 m. de altura de agua (R=45,0 m). En este caso, las tipologías rectangular y cilíndrica de hormigón armado son soluciones mucho más caras.

xxxii) Depósito de volumen 50.000 m³ sin cubierta:

Los depósitos más claramente competitivos des del punto de vista económico para la capacidad de 50.000 m³ sin cubierta son los cilíndricos de hormigón pretensado de 5,0, 6,0 y 7,0 m. de altura de agua (R=56,50, 52,0 y 48,0 m. respectivamente); y también, los cilíndricos de hormigón armado de 4,0 y 5,0 m. de altura de agua (R=63,50 y 56,50 m. respectivamente).

En cuanto al coste del depósito óptimo por metro cúbico de volumen, pasamos en el caso de depósito con cubierta de 202 a 38 €/m³ para el caso de 100 y 50.000 m³ de capacidad respectivamente. Y para el caso de no tener cubierta, pasamos de 169 a 22 €/m³ para el caso de 100 y 50.000 m³ de capacidad respectivamente.

5.7.- RELACIONES D/H₀ ÓPTIMAS EN DEPÓSITOS CILÍNDRICOS

Ya tuvimos ocasión de comentar en el segundo capítulo de la tesina que Boixereu (1988) encontró las siguientes relaciones D/H₀ que minimizan el coste de un depósito pretensado con hormigón proyectado:

- Para depósitos de V=1.000 m³ el valor óptimo de D/H₀ es de 3,7.
- Para depósitos de V=4.000 m³ el valor óptimo de D/H₀ es de 4,5.
- Para depósitos de V=7.000 m³ el valor óptimo de D/H₀ es de 5,5.

En nuestro caso, aprovechando la enorme muestra de depósitos analizada también hemos podido extraer unas relaciones D/H₀ óptimas, que han resultado ser muy similares tanto en los depósitos cilíndricos de hormigón armado como en los de hormigón pretensado. Se sigue una función monótona en el caso de depósitos con cubierta, con resultados muy similares a los planteados por Boixereu (1988). Cosa que no ocurre así, en el caso de depósitos sin cubierta, dónde los resultados son mucho más confusos e imprevisibles. Resumimos en la tabla 5.1 los valores numéricos obtenidos:

VOLUMEN (m ³):	RELACIÓN D/H ₀ ENCONTRADA:
100	2,20
200	2,00
300	2,50
400	2,85
500	2,28
750	2,80
1.000	3,20
2.500	4,00
5.000	4,43
7.500	5,29
10.000	6,14
15.000	7,57
20.000	8,71
25.000	9,71
35.000	11,43
50.000	13,71

Tabla 5.1.- Valores óptimos de la relación D/H₀ en depósitos cilíndricos con cubierta

5.8.- ESTUDIO DEL NÚMERO DE CONTRAFUERTES ÓPTIMO

También es de un enorme interés conocer cuál es el número de contrafuertes óptimo para un depósito cilíndrico de hormigón pretensado dado. También comentamos en el segundo capítulo de la tesina que Boixereu (1988) sugiere que en depósitos de pequeña capacidad (entre 500 y 8.000 m³) se dispongan dos contrafuertes, y que en depósitos de mayor capacidad, una solución ampliamente aceptada consiste en disponer cuatro contrafuertes.

En nuestro caso, aprovechando la enorme muestra de depósitos analizada, también hemos querido conocer el número óptimo de contrafuertes de un depósito cilíndrico pretensado, con los siguientes resultados:

- Para depósitos de 100 m³: 1 contrafuerte.
- Para depósitos de 200 hasta 1.000 m³ (ambos inclusive): 2 contrafuertes.
- Para depósitos de 2.500 hasta 10.000 m³ (ambos inclusive): 3 contrafuertes.
- Para depósitos de 15.000 hasta 50.000 m³ (ambos inclusive): 4 contrafuertes.

5.9.- ESTUDIO DEL CAMPO DE VALIDEZ PARA LAS FÓRMULAS SIMPLIFICADAS EN DEPÓSITOS CILÍNDRICOS

En el segundo capítulo de la tesina se explicó de manera detallada que para calcular los esfuerzos que solicitan la pared de un depósito cilíndrico tenemos que encontrar, en primer lugar, las constantes de integración C_1 , C_2 , C_3 y C_4 , que dependen de las condiciones de contorno. Ello nos conduce a un sistema lineal de cuatro ecuaciones con cuatro incógnitas.

También se comentó que en algunos casos prácticos se puede simplificar enormemente

la resolución del problema haciendo nulas las constantes C_1 y C_2 . Pero que ello sólo será posible cuando el espesor de la pared sea pequeño en comparación tanto con el radio como con la altura del depósito y podamos considerar la lámina como infinitamente larga.

Ya mencionamos que no hemos encontrado en el estado del conocimiento una acotación clara que nos permita saber en que casos podremos hacer esta simplificación con errores despreciables, y en que casos conviene no hacerla. Es por ello, que con toda la muestra de depósitos analizada estamos en condiciones de solucionar este vacío y poder precisar el campo de validez para la hipótesis anterior, que ha resultado ser la siguiente:

$$0 \leq D/H_0 \leq 6$$