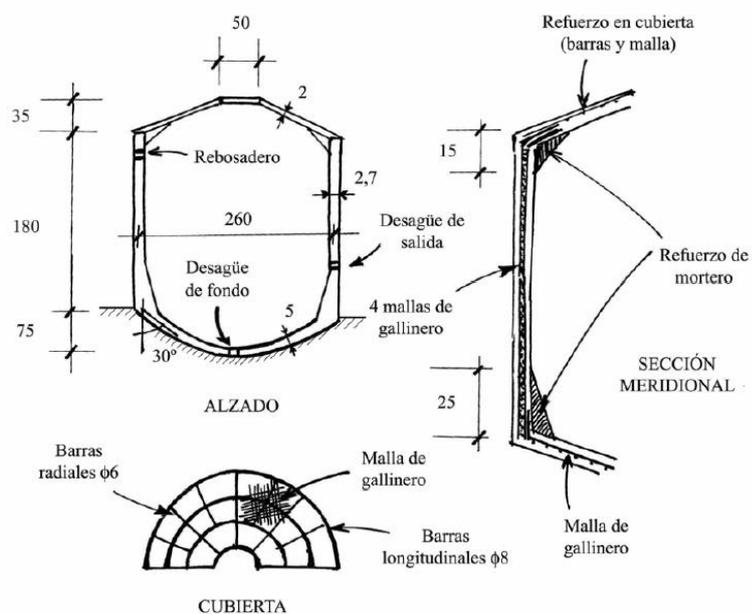


# Diseño de tanques cilíndricos de ferrocemento para construir en comunidades rurales de países en desarrollo

J. Masó  
C. Molins  
A. Aguado



# Decision Support System for Risk Assessment and Management of Floods

E. Oñate<sup>1</sup>  
J. Piazzese<sup>1</sup>  
J. Dolz<sup>2</sup>  
M. Gómez<sup>2</sup>  
E. Blade<sup>2</sup>

<sup>1</sup> International Center for Numerical Methods in Engineering (CIMNE)  
Gran Capitán, s/n, Campus Norte UPC, 08034 Barcelona, Spain  
{Oñate, Piazzese} [@cimne.upc.es](mailto:@cimne.upc.es)  
<http://www.cimne.upc.es>

<sup>2</sup> Department of Hydraulics, Universitat Politècnica de Catalunya (UPC)  
Gran Capitán, s/n, Campus Norte UPC, 08034 Barcelona, Spain  
{j.dolz, manuel.gomez} [@upc.es](mailto:@upc.es)  
<http://www.upc.es>

Monograph CIMNE N<sup>o</sup>-92, May 2005

INTERNACIONAL CENTER FOR NUMERICAL METHODS IN ENGINEERING  
Edificio C1, Campus Norte UPC  
Gran Capitán s/n  
08034 Barcelona, Spain  
[www.cimne.upc.es](http://www.cimne.upc.es)

First edition: May 2005

**Decision Support System for Risk Assessment and Management of Floods**

Monograph CIMNE M92

© The authors

ISBN: 84-95999-75-7

Depósito legal: B-.....

## RESUMEN

En este documento se presenta un estudio sobre el diseño y la construcción de depósitos de ferrocemento para países en vías de desarrollo. Se le da un especial énfasis al hecho de que los depósitos que se plantean están pensados para países en vías de desarrollo, porque la tecnología empleada así como los materiales tendrá una calidad notablemente inferior a la que se podría esperar de países desarrollados. Asimismo, la participación de los usuarios (a través de la supervisión de un técnico) en la construcción del depósito hace que se tienda a simplificar lo máximo posible el montaje de la estructura así como la cantidad de cálculos necesarios.

En primer lugar se introduce el concepto de ferrocemento, se analizan sus propiedades, se describen sus componentes (tipo de refuerzo, proporciones de mezcla,...), se detallan algunos elementos empleados para su ejecución (encofrado, herramientas, equipo necesario,...) y se hace un breve repaso, a continuación, a las aplicaciones que hasta la fecha se le han dado al ferrocemento como material de construcción. También se incluyen los resultados correspondientes a unos ensayos realizados en un estudio sobre el diseño de tanques para países en vías de desarrollo (llevados a cabo en otra universidad) y obtenidos a través de Internet.

A continuación se plantea una formulación específica para el dimensionamiento de la pared del depósito y se acompaña con algunos ejemplos de aplicación práctica en base a la formulación planteada que recogen capacidades bien diferenciadas: 10, 50 y 150m<sup>3</sup>. De este modo se recogen los diseños tipo para un depósito pequeño, mediano y grande (considerando el ámbito en el que nos encontramos y el rango en el que se mueven este tipo de estructuras). En éstos se resuelve el diseño de la solera a través de un exhaustivo análisis por Elementos Finitos de diversos modelos de solera, considerando como forma básica el casquete esférico y variando a partir de aquí la curvatura de éste así como la unión con la base de la pared. Al final de cada ejemplo propuesto se muestra un croquis detallado de la estructura, el refuerzo y las cotas correspondientes.

Se incluye también un capítulo con ejemplos reales sobre depósitos de ferrocemento (concretamente se comentan la construcción de un depósito de 10m<sup>3</sup>, uno de 150m<sup>3</sup>, un depósito enterrado y el montaje de una cubierta para un tanque de ferrocemento) fruto del trabajo de investigación bibliográfica llevado a cabo a lo largo del estudio y que se ha creído conveniente incluir por su alto interés técnico. Los ejemplos además se acompañan de los detalles y mediciones de las obras.

En una segunda parte, se generalizan los resultados para un rango de depósitos acotado entre un cierto valor de alturas y radios del depósito. El rango adoptado es bastante amplio, variando el radio desde 50cm hasta 10m, mientras que las alturas consideradas van de 1m hasta 3m. Se abarca, de esta manera cualquier posibilidad de dimensionamiento, por muy remota que sea. El criterio adoptado a la hora de acotar el rango de los resultados ha sido el de proporcionar alturas razonables para facilitar la construcción y diámetros no mayores de los que parece ser que este material llega a resultar más viable que otro como por ejemplo el hormigón (aunque este tema es discutible). Estos resultados se han resumido a modo de tablas organizadas según las variables estudiadas sean variables de dimensionamiento (capacidad, espesores, cuantías de armadura, flecha de solera) o de cuantificación de materiales (peso de acero, volumen de arena, peso de cemento), dando lugar en total a 12 tablas, cuyo método de empleo se describe en el propio capítulo. Además para tener una idea comparativa de los resultados ofrecidos por las tablas se analizan diversos ejemplos comparando las cantidades propuestos por diversos autores y los obtenidos a partir del empleo de las tablas. Cabe destacar que estas tablas no pretenden ser un método estricto, sino más bien orientativo (en fase experimental), en el que se recomienda al menos la presencia de un técnico para valorar los resultados y apreciar los detalles necesarios que lógicamente no se incluyen en las tablas como herramientas, elementos de atado, encofrado, personal necesario, etc.

## ABSTRACT

In this document, the design and the construction procedures of ferrocement water tanks for developing countries is studied. This study is concerned especially in the fact that these tanks are to be built in these countries. Those countries have not the technology and the quality of materials that can be found in the developed ones. At the same time, the construction can be carried out by the same users of tanks (only with the supervision of a single technician). For that reason the study is focused to simplify the needed the design effort and the assembly work of the structure.

Firstly, the concept of ferrocement is introduced and discussed. That involves, consequently, the analysis of its properties and components (aspects like type of reinforcement and the mix ratio), some elements used in the execution of the tanks (formwork, tools, needed equipment...). Then the general uses of the ferrocement as a construction material are reviewed with some examples. In this chapter it is also included the results of tests about the study on the Design of Rainwater Storage Tanks for use in Developing Countries.

After the general view of the actual state-of-the-art, a new method for sizing the thickness of tank wall is developed. This method is tested in several practical examples. In such examples, the tank is analyzed with the Finite Element Method in order to obtain his optimal shape of its base slab. The basis of the geometrical shape of the tank base is a spherical cap with a variable curvature radius depending in the contact angle between the base and the wall of the tank.

It is also included a chapter with several examples with tanks made with ferrocement. There are four detailed examples. A ten cubic meters ( $10 \text{ m}^3$ ) tank , a hundred and a half cubic meters ( $150 \text{ m}^3$ ), a partially bellow ground water tank of ten cubic meters ( $10 \text{ m}^3$ ) and the building of the a ferrocement tank roof. These examples are the result of an exhaustive bibliographical research that has been found very interesting for its didactical characteristics.

Finally the results are ranged in different tables in order to establish the geometrical and technical characteristics using the limits of height and radius of the tank. The main criteria to limit the tank results for tanks has been the fact of achieving reasonable heights for an easier construction. In another hand the diameters of the tanks have been set in a strict rank where this material seems to be much better than concrete for our purposes. In order to obtain a usable guide to build the ferrocement tanks have been made twelve tables with the construction variables as a thesis of the study. These tables have been checked with the measurements of real constructed tanks.

This document is a good tool to guide the technicians in developing countries through the sizing process to design water tanks in their communities. It doesn't pretend to be a strict rule for their design but a useful guide in this field. It is also recommended that a technician have a supervision on the results given by the tables before constructing a tank with them, and see the details that they obviously don't give like tools, formwork, elements for tying the reinforcement,...

## ÍNDICE

### **Capítulo 1. INTRODUCCIÓN**

1.1.- INTRODUCCIÓN	1
1.2.- RAZÓN DE SER	2
1.3.- OBJETIVOS	3
1.4.- MÉTODO SEGUIDO	3

### **Capítulo 2. ESTADO DEL CONOCIMIENTO**

2.1.- DEFINICIÓN DE FERROCEMENTO	5
2.2.- ANTECEDENTES	6
2.3.- CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES Y ELEMENTOS EMPLEADOS	9
2.3.1.- Mortero	9
2.3.2.- Armadura de refuerzo	17
2.3.3.- Otros	18
2.4.- ESTRUCTURAS DE FERROCEMENTO. APLICACIONES	22
2.4.1.- Barcos	22
2.4.2.- Silos	23
2.4.3.- Tanques	24
2.4.4.- Viviendas	24
2.4.5.- Otras aplicaciones	27
2.5.- ENSAYOS DE LABORATORIO	28
2.5.1.- Resistencia a tracción	29
2.5.2.- Retracción libre	32
2.5.3.- Retracción impedida	35
2.5.4.- Conclusiones	41
2.5.5.- Recomendaciones	42

### **Capítulo 3. BASES DE CÁLCULO**

3.1.- ANÁLISIS ESTRUCTURAL	43
3.2.- ANÁLISIS DE LA PARED	45
3.2.1.- Obtención del refuerzo. Formulación	45
3.2.2.- Obtención del refuerzo. Solución del sistema	55
3.2.3.- Recubrimiento. Espesor de pared	58
3.2.4.- Comprobaciones a fisuración	58
3.3.- ANÁLISIS DE LA SOLERA	66
3.3.1.- Tipo de análisis	66

3.3.2.- Modelo de análisis	66
3.3.3.- Condiciones de contorno. Acciones	68
3.3.4.- Mallado y cálculo del modelo	68
3.4.- VALORES DE CÁLCULO DE LOS MATERIALES	69

#### **Capítulo 4. EJECUCIÓN DE TANQUES DE FERROCEMENTO**

4.1.- INTRODUCCIÓN	70
4.2.- EJECUCIÓN DE UN TANQUE DE FERROCEMENTO. CASO GENERAL	70
4.2.1.- Delimitación del lugar y ejecución de la base	71
4.2.2.- Ejecución del refuerzo de las paredes	72
4.2.3.- Acabado del tanque: extendido de las paredes y cubierta	75
4.3.- EJEMPLO 1: TANQUE PEQUEÑO DE 10m <sup>3</sup> DE CAPACIDAD	79
4.3.1.- Encofrado o molde	79
4.3.2.- Materiales y herramientas	79
4.3.3.- Proceso constructivo	80
4.4.- EJEMPLO 2: TANQUE DE 150m <sup>3</sup> DE CAPACIDAD	83
4.4.1.- Diseño	83
4.4.2.- Materiales y herramientas	83
4.4.3.- Encofrado	83
4.4.4.- Proceso constructivo	84
4.5.- EJEMPLO 3: TANQUE DE FERROCEMENTO ENTERRADO	88
4.5.1.- Materiales y herramientas	89
4.5.2.- Proceso constructivo	90
4.6.- EJEMPLO 4: CUBIERTA DE UN TANQUE DE FERROCEMENTO	95
4.6.1.- Materiales y herramientas	95
4.6.2.- Proceso constructivo	95

#### **Capítulo 5. APLICACIÓN DE LOS PARÁMETROS**

5.1.- INTRODUCCIÓN	103
5.2.- DIMENSIONAMIENTO DE UN TANQUE DE 10m <sup>3</sup>	104
5.2.1.- Análisis de la pared	104
5.2.2.- Análisis de la solera	108
5.2.4.- Solución adoptada	109
5.3.- DIMENSIONAMIENTO DE UN TANQUE DE 50m <sup>3</sup>	110
5.3.1.- Análisis de la pared	110
5.3.2.- Análisis de la solera	114
5.3.3.- Solución adoptada	115
5.4.- DIMENSIONAMIENTO DE UN TANQUE DE 150m <sup>3</sup>	116
5.4.1.- Análisis de la pared	116
5.4.2.- Análisis de la solera	122
5.4.3.- Solución adoptada	123

**Capítulo 6. RESULTADOS**

6.1.- INTRODUCCIÓN	124
6.2.- TABLAS	124
6.2.1.- Tablas para el dimensionamiento	124
6.2.2.- Tablas para la cuantificación de materiales	133
6.3.- ACLARACIONES SOBRE EL MÉTODO	139
6.4.- COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS	139
6.4.1.- Mediciones	139
6.4.2.- Gráficos	141
6.4.3.- Análisis de los resultados	142

**Capítulo 7. CONCLUSIONES**

7.1.- CONCLUSIONES GENERALES	143
7.2.- CONCLUSIONES ESPECÍFICAS	143
7.3.- RECOMENDACIONES	144
7.4.- FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	145

<b>REFERENCIAS</b>	146
--------------------	-----

**Anejo 1. RESULTADOS DEL ENSAYO DE RETRACCIÓN LIBRE**

A1.1.- RESULTADOS PARA LA MUESTRA DE MORTERO SIN ARMAR	
A1.2.- RESULTADOS PARA LA MUESTRA DE MORTERO ARMADO CON MALLA DE GALLINERO	
A1.3.- RESULTADOS PARA LA MUESTRA DE MORTERO ARMADO CON MALLA CUADRADA	

**Anejo 2. CÁLCULO DE DEPÓSITOS CILÍNDRICOS CIRCULARES SEGÚN LA TEORÍA DE LÁMINAS**

A2.1.- INTRODUCCIÓN	
A2.2.- DESARROLLO DEL CÁLCULO	
A2.2.1.- Depósitos de espesor de pared constante	
A2.2.2.- Solución del problema para el caso de un depósito empotrado en el fondo	
A2.2.3.- Solución del problema para el caso de un depósito articulado en el fondo	

***Anejo 3. CÁLCULO DE DEPÓSITOS CILÍNDRICOS CIRCULARES  
POR EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS***

A3.1.- INTRODUCCIÓN

A3.2.- MODELO DE ANÁLISIS

A3.3.- RESULTADOS

A3.3.1.- Tablas

A3.3.2.- Gráficos

A3.4.- VALORACIÓN DE LOS RESULTADOS

A3.5.- CONCLUSIONES

## CAPÍTULO 1

### INTRODUCCIÓN

#### 1.1.- INTRODUCCIÓN

La ejecución de depósitos de bajo coste en países en vías de desarrollo es una práctica que dichos países llevan a cabo habitualmente. Para ello, el ferrocemento es un material especialmente interesante para tanques cilíndricos ya que combina una mano de obra poco cualificada y materiales de bajo coste.

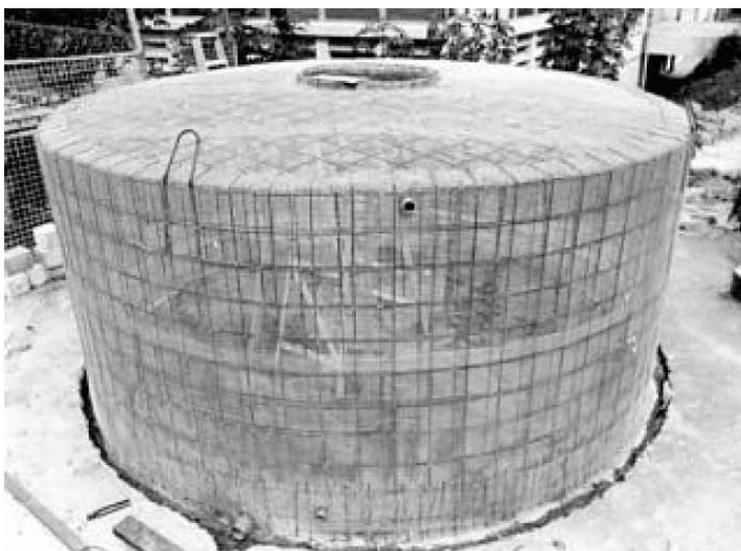


Fig.1.1.- Tanque de ferrocemento para el almacenamiento de agua de lluvia.

Cabe señalar que, aunque este estudio tiene por título *Diseño de tanques cilíndricos de ferrocemento para mejorar el abastecimiento de agua en comunidades rurales en países en vías de desarrollo*, en realidad no se circunscribe sólo a tanques de ferrocemento, en el sentido estricto, sino que también abarca un material que debería denominarse “mortero armado o reforzado”. La principal diferencia está en que en el ferrocemento hay una gran densidad de malla de alambre, ya sea tejido o soldado que tiene que

tener un mínimo de volumen de refuerzo por unidad de volumen del material. En muchos casos estos valores mínimos no se cumplen por simple viabilidad en la ejecución. No obstante las características que adquiere el material al ser reforzado con malla de alambre son más próximas a las del ferrocemento que a las del hormigón armado debido a la gran dispersión del acero en el mortero.

Los tanques de mortero reforzado con alambre se utilizan y se han utilizado en el pasado en diversas partes del mundo para obtener agua para uso doméstico, almacenamiento, regadío o uso industrial.

Se hacen empastando con las manos el mortero o pasta de cemento a una malla de refuerzo de alambre para formar unos tanques cilíndricos de pared delgada, con un espesor que puede variar desde 2 hasta 8-10cm, dependiendo del tamaño del tanque. El refuerzo normalmente consiste en mallas de alambre atadas entorno de un encofrado cilíndrico, o bien entorno a un esqueleto de refuerzo constituido por una malla electrosoldada/electromalla o barras de refuerzo más resistentes. El refuerzo normalmente consiste en mallas de alambre atadas entorno de un encofrado cilíndrico, o bien entorno a un esqueleto de refuerzo constituido por una malla electrosoldada o electromalla o barras de refuerzo más resistentes. Los alambres distribuyen las cargas a través del mortero evitando así la concentración y generación de planos de debilidad que provocaría una rotura temprana por la existencia de zonas sin reforzar.

Habitualmente, y a lo largo de este estudio, se habla concretamente de *malla de gallinero* en lugar de la más general *malla de alambre*, Eso es porque en este tipo de estructuras es muy habitual emplear esta malla hexagonal tan característica, debido sobretodo a que es mucho más barata y fácil de obtener que la cantidad equivalente de otro tipo de malla de alambre. Es además, mucho más fácil de atar y manipular.

## 1.2.- RAZÓN DE SER

Este método constructivo para depósitos es particularmente adecuado para utilizar en comunidades rurales con pocos ingresos por las siguientes razones:

- Materiales habitualmente disponibles. Las materias primas básicas como agua, arena, cemento y alambre de refuerzo están disponibles en la mayoría de regiones.
- Pocos conocimientos necesarios. Los conocimientos prácticos necesarios para utilizar los materiales son habitualmente conocidos por las comunidades y trabajadores no entrenados pueden trabajar satisfactoriamente bajo la supervisión de sólo unos pocos días.
- Participación de los propios usuarios. Los usuarios del tanque pueden ayudar en la obtención de arena para el mortero y en hacer la mayor parte del trabajo de construcción.
- Equipo necesario básico. Las técnicas de construcción son simples y no requieren el uso de maquinaria cara y sofisticada ni el suministro de energía. Las filtraciones resultantes de un trabajo mal hecho u otros daños pueden ser simplemente reparadas, y el mantenimiento necesario después de la construcción es mínimo.

- Coste compartido del encofrado. El encofrado necesario empleado durante la construcción puede ser hecho a base de materiales locales como madera o adobe, o bien prefabricado con materiales más resistentes de forma que se pueda llevar de un sitio a otro para ejecutar diversos tanques a la vez.

El mortero armado con alambre se utiliza con los más diversos propósitos, pero su particular ventaja para los depósitos está en su resistencia a la corrosión y bajo coste en relación a otro tipo de material. El acero corrugado galvanizado ha sido ampliamente utilizado en el pasado para el almacenamiento de agua pero, sin embargo resulta caro, se corroe y falla en 5-10 años hasta en condiciones de buen mantenimiento. En cambio, la vida útil de un depósito hecho a base de mortero armado puede llegar a los 50 años de uso in-interrumpido.

Las delgadas paredes del tanque permiten la deformación bajo carga y ayudan a prevenir la concentración de tensiones que podría causar el fallo del tanque. La densidad del refuerzo de alambre distribuye las tensiones a través de la pared de mortero aumentando su capacidad para soportar el empuje y la flexión sin romper. Esta flexibilidad no es posible en el hormigón reforzado con barras de acero por los mayores espesores involucrados.

Los tanques de mortero armado con alambres han sido utilizados a lo largo de mucho años y se pueden ejecutar con confianza con capacidades de hasta  $150\text{m}^3$ , aunque excepcionalmente se ha llegado a ejecutar con éxito tanques de más de  $450\text{m}^3$ .

### 1.3.- OBJETIVOS

Dentro de lo que es el alcance del estudio, el primer objetivo es el de definir una formulación específica para el dimensionamiento de la pared del depósito y contrastar los resultados para determinar la validez de dicha formulación.

Otro de los objetivos perseguidos es el de obtener la forma de la solera más adecuada para un depósito dado, caracterizando para ello la solera según un serie de parámetros en base a los cuales se determinará la solución óptima.

Conjuntar ambos sistemas para pared y solera, definiendo así un método de dimensionamiento claro y coherente, aplicable a depósitos de ferrocemento según las condiciones indicadas y que resulte válido en el rango de dimensiones en el cual se prevé su utilización práctica.

Sistematizar todo el proceso recogiendo todos los resultados en forma de tabla y posibilitando así el dimensionamiento de un depósito “a medida” sin necesidad de conocimientos técnicos por parte del usuario.

### 1.4.- METODO SEGUIDO

En la primera parte del trabajo se ha llevado a cabo una labor de investigación bibliográfica, posteriormente se procedió a su selección y estudio, y en base a éstos se

procedió a elaborar un estudio del conocimiento, dándole un especial énfasis al hecho de que los depósitos planteados están pensados para países en vías de desarrollo, y como consecuencia esto repercutirá en las características de los materiales así como en la tecnología empleada.

El siguiente paso ha sido el desarrollo de una formulación específica válida para el dimensionamiento de la pared, con el suficiente rigor como para englobar a cualquier tipo de depósito que se quiera.

A continuación se procede a analizar por el Método de los Elementos Finitos la forma para la solera más adecuada para un depósito dado, en función de las dimensiones de éste: considerándola como casquete esférico se ha parametrizado la solera en función del ángulo definido por la unión pared-solera en la base de la pared y con respecto a la vertical variando este ángulo entre  $0^\circ$  (solera semiesférica) y  $90^\circ$  (solera plana), contemplando también el caso de pared empotrada. El proceso se ha llevado a cabo para 3 modelos de depósitos que contemplan situaciones bien diferenciadas: depósito pequeño ( $10\text{m}^3$ ), mediano ( $50\text{m}^3$ ) y depósito grande ( $150\text{m}^3$ ).

Finalmente, con los resultados obtenidos ya de la determinación del diseño de la solera se ha procedido a analizar de forma integral 3 depósitos con condiciones parecidas a las analizadas anteriormente calculando para cada uno según la formulación planteada para la pared el refuerzo necesario. Para cada uno, en base a las características del refuerzo y de la solera se ha propuesto una solución integral.

Comprobada la validez y coherencia en el funcionamiento del método se ha procedido al montaje de las tablas de dimensionamiento, basadas en el método propuesto.

## CAPÍTULO 2

### ESTADO DEL CONOCIMIENTO

#### 2.1.- DEFINICIÓN DE FERROCEMENTO

El ferrocemento es una forma de hormigón reforzado que difiere del hormigón armado o pretensado convencional, por la forma y organización de los elementos de refuerzo. Consiste en una serie de mallas muy juntas o barras de muy pequeño diámetro (ver figura 2.1)

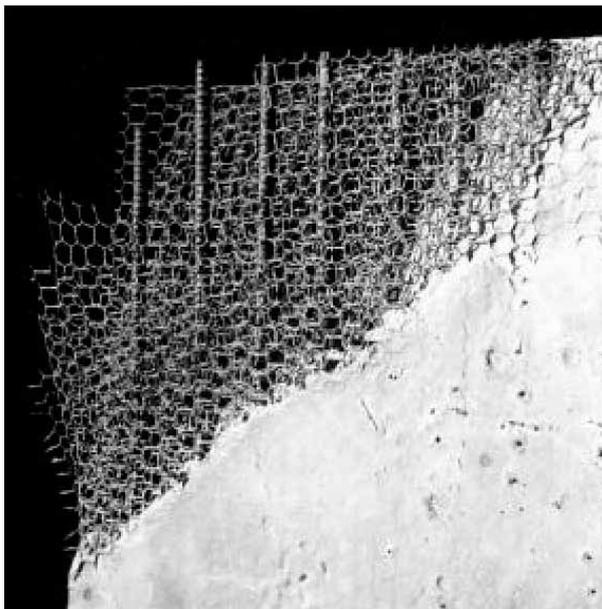


Fig.2.1.- Típica sección de ferrocemento (ACI Comité 549, 1997).

completamente envueltas en la matriz de mortero, generando un material compuesto cuyo comportamiento es distinto al del hormigón armado convencional en resistencia, deformación y aplicaciones (ACI Comité 549, 1997). Se puede ejecutar en paneles delgados, habitualmente de menos de 25mm de espesor, con un fino recubrimiento por encima de la capa más externa de refuerzo. A diferencia del hormigón armado convencional, al refuerzo del ferrocemento se le puede dar la forma deseada y el mortero puede extenderse directamente “in situ” sin tener que utilizar encofrado.

El término ferrocemento implica la combinación de un refuerzo ferroso, habitualmente acero, envuelto en una

matriz de mortero. Sin embargo, algunas de las propiedades del ferrocemento se pueden lograr sin necesidad de utilizar como refuerzo mallas de acero o barras. Por ejemplo, la construcción de cabañas a base de barro seco y juncos se puede considerar un precursor del ferrocemento. El uso de mallas no metálicas está siendo estudiado en la actualidad por diversas universidades, dentro de estas mallas se encuentran las mallas resistentes a los álcalis de fibra de vidrio, las mallas fabricadas de materiales orgánicos tales como propilenos o bien materiales naturales como por ejemplo el bambú.

El Comité 549 del ACI (American Concrete Institute) adoptó la siguiente definición de ferrocemento: *“El ferrocemento es un tipo de hormigón armado que se construye en secciones de pared delgada habitualmente utilizado con mortero de cemento hidráulico reforzado con capas muy juntas de malla de alambre continuas y de diámetro relativamente pequeño. La malla puede ser de acero u otro material que resulte adecuado (ACI Comité 549, 1997).”*

## 2.2.- ANTECEDENTES

El conocido uso de limos, yeso y mortero de cemento natural se remonta hacia el tercer milenio A.C., aplicaciones anteriores estuvieron generalmente limitadas a unir bloques de rocas y no fue hasta la época de los romanos que se hizo ampliamente uso del mortero como material estructural.

En todas las civilizaciones tempranas, el hormigón fue visto como un material que sólo podía ser usado efectivamente en compresión. El concepto de introducir un refuerzo dentro de la masa de hormigón armado, se le ocurrió casi simultáneamente a tres personas. Joseph Monier (1823-1906), un jardinero francés que introdujo unas barras de acero en unas macetas de tamaño considerable, en 1849. El siguiente fue un inglés, Wilkinson, quien fabricó vigas de hormigón armado para edificios colocando en la cara de tracción cuerdas viejas de minería. Finalmente, J.L.Lambot (1814-1885) hizo un bote de hormigón (figura 2.2) en el cual el refuerzo era en forma de mallas de alambre entrelazadas con barras delgadas. En los Estados Unidos, por el mismo período, aproximadamente, Thaddeus Hyatt (1816-1901) llevó a cabo pruebas intensivas sobre losas de hormigón armado con lo que contribuyó ampliamente a racionalizar la teoría del hormigón armado (ACI Comité 549, 1997).

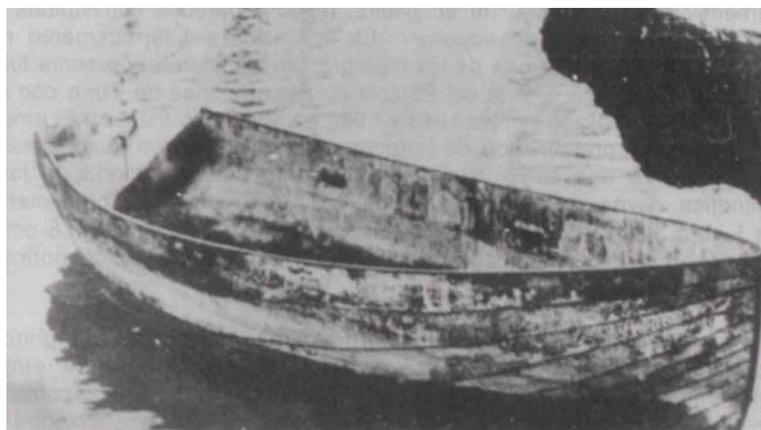


Fig.2.2.- Bote de ferrocemento construido por Lambot (Wainshtok, 1998).

Es, sin embargo, el trabajo de Lambot el de mayor interés para nosotros, ya que fue una de las primeras aplicaciones del hormigón armado, y a su vez, fue una forma de ferrocemento. Éste fue el nacimiento del hormigón armado, pero su desarrollo difirió del concepto de Lambot: esto se explica debido a que la tecnología de la época le era muy difícil desarrollar un sistema de producción que le permitiera fabricar miles de mallas, en cambio, no sucedía lo mismo con las largas barras de hierro que fueron utilizadas para fabricar lo que ahora conocemos comúnmente como hormigón armado; y el concepto de ferrocemento fue olvidado por casi 100 años.

El ferrocemento reapareció brevemente para la construcción de botes durante la Primera Guerra Mundial, cuando la escasez de placas de acero forzó la búsqueda de nuevos materiales para la construcción de los mismos.

Al inicio de la década de los 40, el ingeniero-arquitecto Pier Luigi Nervi (1881-1960) resucitó el concepto original de ferrocemento, al observar que, reforzando el hormigón con mallas de alambre producía un material compuesto con características relativamente parecidas a las de un material homogéneo y capaz de resistir al impacto. Losas delgadas armadas de esta manera probaron ser flexibles, elásticas y excepcionalmente resistentes. Después de la Segunda Guerra Mundial, Nervi demostró la utilidad del ferrocemento para la fabricación de botes, construyendo una embarcación de 165 toneladas con un espesor de casco de 36mm. Dentro de las aplicaciones que Nervi dio al ferrocemento también se encuentran un pequeño almacén (1947), el techo de la piscina de la Academia Naval en Italia, con un domo de 15m de diámetro, una fábrica de tejidos en Roma y el famoso Hall del Palacio de Exposiciones de Turín, con una cubierta de 95m de luz (ACI Comité 549, 1997) que se muestra en la figura 2.3.

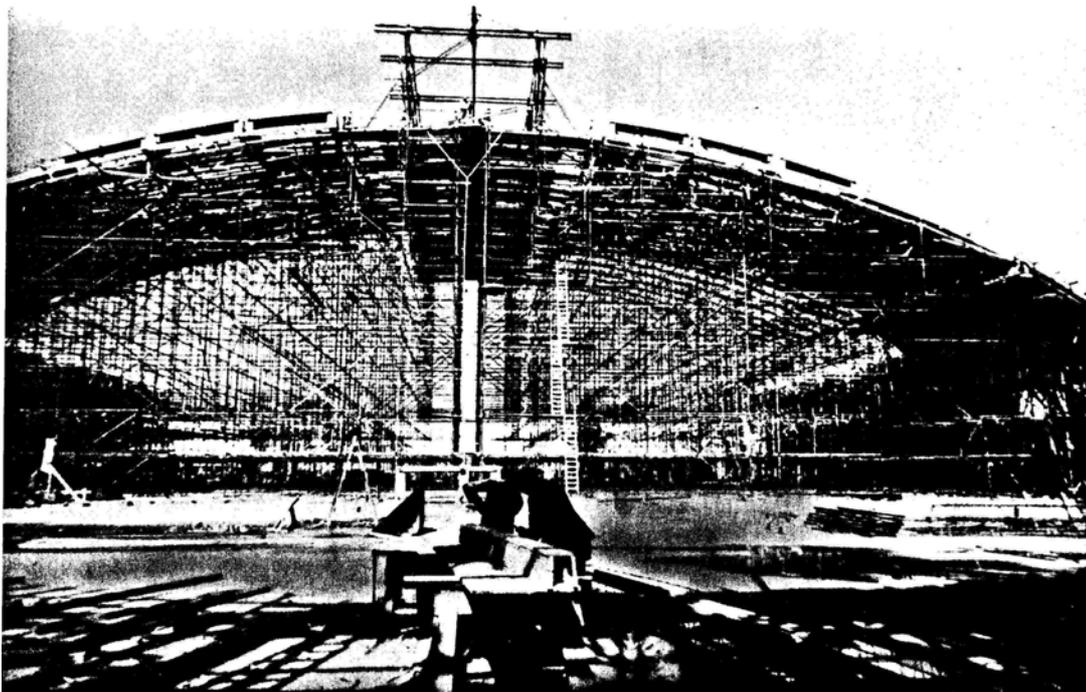


Fig.2.3.- Palacio de Exposiciones de Turín, obra de P.L.Nervi (Nervi, 1955).

A pesar de las atractivas propiedades del ferrocemento, y el interés creado por los trabajos de Nervi, el uso de este material no se extendió mucho más allá de la construcción de botes; sin embargo, la disponibilidad universal de los elementos necesarios, mallas de acero y hormigón, crearon gran interés en los países en vías de desarrollo debido a sus aplicaciones potenciales.

A principios de los 70 el interés de los investigadores y la comunidad científica volvió la cara hacia este material en el cual encontraron un fértil campo para la investigación. Un gran número de artículos comenzaron a aparecer en la literatura y las especulaciones acerca del uso del ferrocemento como material estructural comenzaron a crecer. Un importante desarrollo fue la fundación del “Internacional Ferrocement Information Center” (IFIC) en el Asian Institute of Technology, en Bangkok en 1976. Este organismo ha mantenido desde entonces una gran producción de trabajos y artículos sobre el tema. Este centro elabora una de las pocas publicaciones sistemáticas que sobre ferrocemento se editan a nivel mundial hasta el presente, el “*Journal of Ferrocement*”. El 1974 se organiza en el ACI el comité 549 con la misión de estudiar y reportar las propiedades ingenieriles, métodos constructivos y aplicaciones prácticas del ferrocemento (ACI Comité 549, 1997).

Hasta la fecha el mayor número de aplicaciones que se ha hecho del ferrocemento han sido en la construcción de pequeñas embarcaciones. Sin embargo, en las dos últimas décadas el número de aplicaciones terrestres ha aumentado considerablemente, sobretodo en la construcción de silos, tanques de almacenamiento de agua potable, techos, cubiertas de puentes pequeños, formas arquitectónicas y casas unifamiliares.

Con respecto a la investigación se tiene un gran número de publicaciones en cuanto a propiedades de tracción influencia de los materiales en estas propiedades, es decir, la influencia de los áridos, cemento, tipo de malla, número de mallas, aditivos, etc; por otra parte existen propiedades que ya han sido tratadas pero aún requieren de una importante atención, como son resistencia al impacto, fatiga, corrosión, resistencia bajo condiciones multiaxiales de carga, resistencia al cortante y resistencia al fuego principalmente.

Para finalizar parecen existir otras tres necesidades generales para que el ferrocemento sea aceptado universalmente como material de construcción, estas son:

- 1.- El desarrollo de métodos simplificados de análisis y diseño.
- 2.- El desarrollo de un reglamento o guía de proyecto.
- 3.- El desarrollo de procedimientos de construcción eficientes y económicos.

## 2.3.- CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES Y ELEMENTOS EMPLEADOS

Los principales componentes del ferrocemento son la matriz de mortero, la armadura de refuerzo, los aditivos y una capa protectora contra la corrosión (los dos últimos son opcionales).

En el apartado que sigue se ha procedido a hacer una descripción cualitativa de los elementos y sus características que conforman tanto la mezcla de mortero como el refuerzo de acero.

### 2.3.1.- Mortero

La matriz de mortero utilizada en ferrocemento está compuesta de cemento hidratado y material inerte de relleno (árido).

#### Cemento, arena y agua

El *cemento* empleado para el mortero debería ser de tipo ordinario portland y en ocasiones va mezclado con alguna puzolana. Este debe almacenarse en un ambiente seco, mientras no se utilice.

El principal requisito para la *arena* es que no presente materia orgánica ni impurezas químicas que podrían debilitar el mortero. La mayoría de las arenas limpias son adecuadas, si se tiene alguna duda de su calidad es recomendable lavarlas con agua limpia. Es interesante pero, que tenga una buena gradación con una razonable proporción de todos los tamaños de grano, sin exceso de finos ni partículas gruesas. Para tener una idea de la composición Wainshtok (1998) propone

Tamices		% Pasa	
Nº.	Abertura (mm)	Paneles y otros	Barcos
3/8	9,50	100	100
4	4,75	95-100	100
8	2,38	80-100	100
16	1,16	50-85	70-1
30	0,60	25-60	45-7
50	0,30	25-30	25-45
100	0,15	2-10	5-15

Tabla 2.1.- Especificaciones granulométricas de áridos finos para ferrocemento.

La arena al menos, debe de atravesar el tamiz nº8.

El *agua* debe ser fresca y libre de productos químicos disueltos o materia orgánica en suspensión. Un agua limpia es esencial para un mortero durable y resistente. En cualquier

caso, no se debe utilizar nunca agua salada. Tanto Wainshtok (1998) como Watt (1986) tratan respectivamente este tema en sus trabajos.

### La mezcla de mortero

Como todos los cementos hidráulicos, las propiedades físicas y la microestructura del mortero resultante dependen de la composición química del cemento, la naturaleza de la arena, la relación agua/cemento y las condiciones de curado. Ya que la matriz representa aproximadamente el 95% del volumen del ferrocemento, sus propiedades tienen gran influencia en las propiedades finales del producto. Existen numerosas referencias que describen con detalle el efecto en las propiedades y microestructura de diferentes proporciones en la mezcla de la matriz, entre ellas *The Chemistry of Cement and Concrete* (Lea, 1981).

El uso de cemento portland en ferrocemento consigue un compuesto en el cual la matriz se puede considerar que tiene una cierta resistencia a tracción, ya que parece ser que la acción entre la matriz y el refuerzo es más pronunciada en ferrocemento que en el hormigón armado convencional.

En los textos de Wainshtok (1998), Watt (1986) y Skinner et al, los autores citan las características que debe tener la mezcla de mortero que se describen a continuación.

El mortero debe ser preparado en las proporciones correctas de cemento, arena y agua. Debe ser bien mezclado y suficientemente trabajable para poder ser extendido con las manos al encofrado atravesando las mallas de refuerzo y formar una capa densa y compacta.

Es necesario además un proceso de curado (a continuación se explicará el funcionamiento del curado) para garantizar la máxima resistencia y durabilidad posibles.

En todas estas propiedades que se persiguen intervienen unos parámetros que controlan la calidad final del mortero y que conviene tener en cuenta.

- La relación *arena/cemento* (en volumen): aumentando la proporción de cemento en el mortero aumentará la resistencia y la trabajabilidad, pero puede aumentar también la fisuración por retracción hasta el punto de no lograr este incremento de resistencia. Además, el aumento de cemento también supone un aumento del coste como recuerda Watt (1986).
- La relación *agua/cemento* (en peso): una mezcla de mortero con poca agua tendrá más resistencia que una mezcla con mucha agua y con la misma proporción de arena/cemento mientras esté bien compactada. De todas formas, una mezcla seca es menos trabajable en el encofrado para lograr una buena compactación, más propensa a formar burbujas de aire ocluido y no presenta tan buena adherencia a la malla de refuerzo. En cambio, una mezcla “acuosa” es mucho más fácil de extender con la mano, pero el mortero resultante será más permeable, tendrá más retracción y menos resistencia y durabilidad. Existe pues, un compromiso entre resistencia y trabajabilidad.

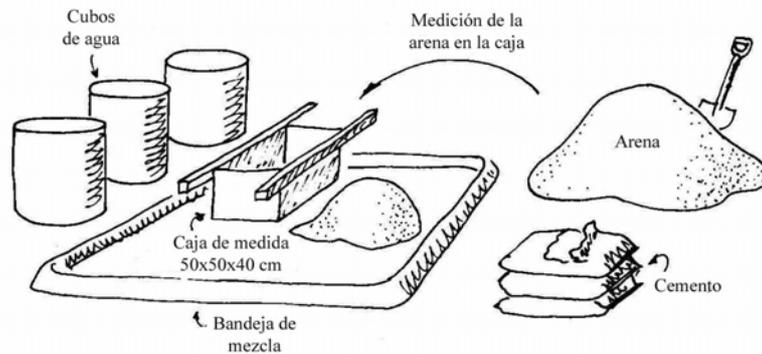


Fig. 2.4.- Mezcla del mortero con las manos.

En relación a estas dos proporciones, la literatura aconseja tomar una relación de agua/cemento 0,6:1 y una proporción de arena/cemento **3:1** (ver figura 2.4). Sin embargo, se ha constatado con los resultados de los ensayos expuestos en el apartado 2.5 que la retracción experimentada en una mezcla con 0,6:1 de agua/cemento es excesivamente alta. Así, se ha creído conveniente reducir la proporción a **0,5:1** siempre y cuando sea posible.

A pesar de todo, la decisión última se dejará a criterio del responsable de la obra, quien ha de constatar si realmente se consigue una mezcla homogénea y con trabajabilidad suficiente para mezclarla a mano sin que aparezcan grúmulos.

### Retracción

El fenómeno de la retracción está relacionado con pérdidas de agua que constituye la mezcla, estas variaciones ocasionan un cambio de volumen del mortero (se contrae). También se puede producir un incremento de la cantidad de agua si las condiciones son las adecuadas, entonces se producirá un incremento de volumen (Watt, 1986). Esta situación es, sin embargo, poco habitual.

En el fenómeno de la retracción intervienen diversos factores como:

- **Humedad relativa y temperatura.** Para ambientes secos y/o calurosos la retracción experimentada es mayor. Éste es precisamente el principio de funcionamiento del *curado*, que no es otro que un proceso en el que se favorece la hidratación del mortero a través del control de la temperatura y la humedad (se intenta mantener próxima a la saturación) para prevenir la retracción. En la figura 2.5 se puede apreciar como influencia la humedad relativa en la retracción.

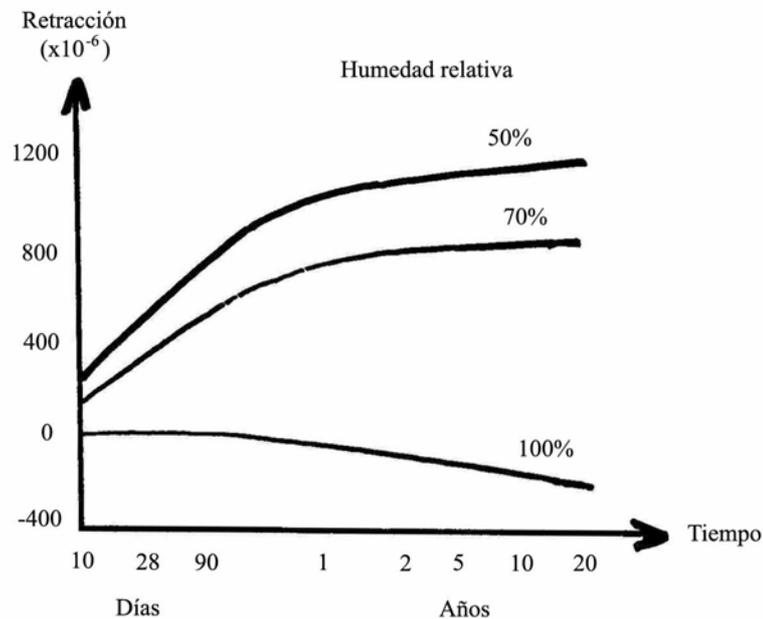


Fig.2.5.- Relación entre retracción y humedad. Efecto del curado (Turner, 2000).

- **Relación arena/cemento.** Aumentando la proporción de cemento en la mezcla, aumenta también la posibilidad de fisuración por retracción. Además, cabe decir que en general como señala Watt (1986), cuando más gruesa es la arena menor es la retracción. Es decir, cuando más fina es la mezcla mayor es la retracción.
- **Relación agua/cemento.** Por la propia definición de retracción, cuando más agua presente la mezcla más considerable será el efecto de la retracción. Dada una proporción de arena/cemento fija, valores elevados de la relación agua/cemento implicarán valores elevados de retracción. Teniendo en cuenta además, la figura 2.9 y suponiendo la pérdida de agua proporcional a la permeabilidad entonces se puede asegurar que esta dependencia no es lineal sino que cuando más alta es la relación agua/cemento, más aumenta la retracción. Así, en el caso que se plantea, con una relación a/c de 0,5 la retracción será más alta que en una mezcla “seca” (a/c~0,4).
- **Hidratación y curado.** El *curado* es un proceso en el cual se favorece la hidratación del mortero a través del control de la temperatura y la humedad (próxima a la saturación) con tal de prevenir la retracción. El curado es además, un proceso muy importante tanto para aumentar la resistencia como para asegurar una mayor impermeabilidad. En la figura 2.5 se puede apreciar el efecto del curado (HR≈100) a los 28 días en la retracción respecto de una muestra sin curar; la diferencia es de casi el doble en el caso de una muestra con una HR del 50%.
- **Relación volumen/superficie expuesta.** Tal como se ha comentado, la retracción es un fenómeno de pérdida/intercambio de agua con el exterior. Es pues, directamente

proporcional a la superficie del elemento en contacto con el exterior. Elementos como las paredes de un depósito de ferrocemento donde la relación de superficie expuesta comparada con el volumen de mortero es elevada, son especialmente susceptibles de ser afectados por el fenómeno de la retracción. En la figura 2.6 se puede observar que cuando más pequeño es el espesor del elemento, más aumenta la retracción.

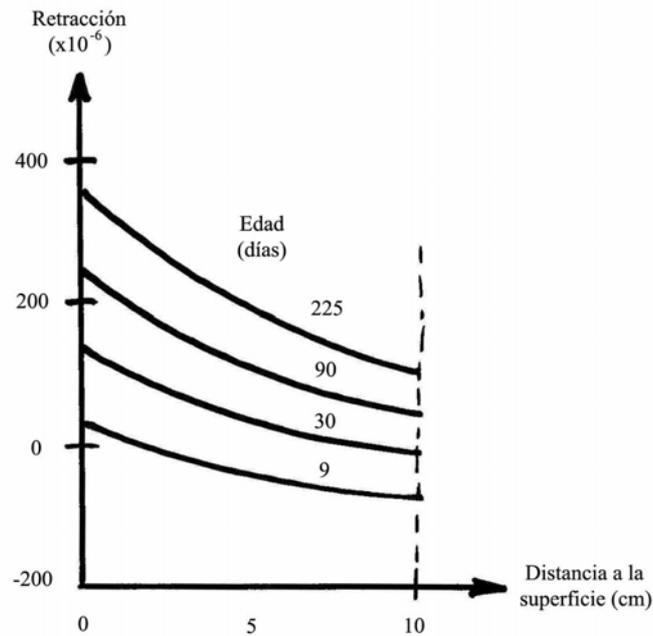


Fig.2.6.- Efecto del espesor en la retracción.

Hay una serie de medidas que se pueden tomar para reducir la posibilidad de aparición de fisuras debidas a la retracción:

- Es bueno que la estructura se construya en una zona sombreada.
- La estructura debería ejecutarse en el momento más fresco del día, preferiblemente por la mañana.
- La aplicación del mortero debe de hacerse de la forma más continua posible, evitando disponer mortero fresco sobre mortero seco, para no generar tensiones entre capas. Idealmente la ejecución hay que hacerse de abajo a arriba, completando círculos completos antes de subir hacia arriba.
- Finalmente, la más importante: la aplicación de un buen curado a la estructura antes que ésta entre en servicio.

Existe otro efecto producido por la retracción que puede perjudicar la estructura: en el caso que las deformaciones debidas a la retracción estén impedidas se pueden experimentar tensiones de tracción internas a la estructura. Si estas tracciones llegan a superar en algún

punto la resistencia a tracción del material se puede producir fisuración y hasta colapsar la estructura.

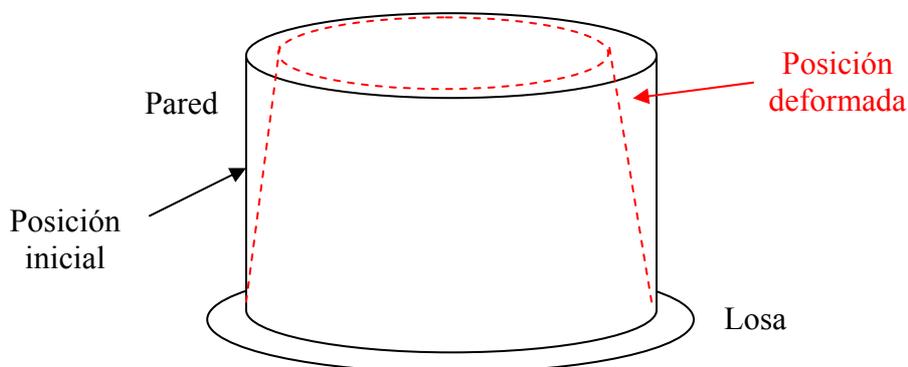


Fig.2.7.- Efecto de la retracción sobre la pared del tanque.

En el caso de un depósito, la base de la estructura se ejecuta antes que las paredes. A parte, la deformación por retracción en la losa de base es muy diferente de la de las paredes (ver figura 2.7). Por consiguiente, la base de la pared no se puede deformar, impedida por la losa y se generan tensiones en el contacto pared-losa.

En el apartado 2.5 se ha analizado el efecto de la retracción (deducido de los ensayos) en una mezcla con unas proporciones de 0,6:1 (peso) y 3:1 (volumen) por lo que a relaciones agua/cemento y arena/cemento refiere respectivamente a través de la campaña de ensayos realizada sobre muestras tanto de mortero libre como reforzado con distintos tipos de malla. Para la mezcla que se plantea para los depósitos de este estudio con una relación agua/cemento de 0,5:1 (más baja) cabe esperar pues, que la retracción sea menor que la experimentada en los ensayos.

### Resistencia mecánica

Se sabe que la resistencia mecánica del mortero depende fundamentalmente de la relación agua/cemento, la proporción arena/cemento y de las propiedades de la arena: granulometría, forma, resistencia, etc.

La gran influencia de la relación agua/cemento se debe al hecho de que determina la porosidad de la pasta de cemento endurecido: a menor porosidad mayor resistencia de la pasta y por consiguiente, del mortero. En el caso de una relación agua/cemento de 0,4 la *resistencia a compresión* a los 28 días en probetas de 4x4x16cm curadas en ambiente húmedo será según Wainshtok (1998) no menor a 32MPa, mientras que para condiciones de menos humedad, con una relación agua/cemento de 0,5 y arena de granos angulosos se puede llegar a los 25MPa.

En los ensayos (Turner, 2000) recogidos en el apartado 2.5 se ha determinado la *resistencia a tracción* de unas probetas de mortero con unas características similares del que se utilizará para los tanques de El Salvador: en los ensayos el mortero tenía una relación agua/cemento más alta (0,6:1 en lugar de 0,5:1) mientras que la relación arena/cemento es la

misma (3:1); así la resistencia a tracción no debe diferir mucho de la que cabe esperar para el mortero de El Salvador. La campaña de ensayos corresponde a un estudio hecho por el Departamento de Ingeniería de la Universidad de Warwick (Turner, 2000) y que se incluyen al final del capítulo. La resistencia a tracción media a los 28 días obtenida en los ensayos ha sido de  $f_{ct,m}=1,60\text{MPa}$ . Éste es el valor que se puede esperar en condiciones de ejecución bastante malas, pues de hecho, los ensayos han intentado tener en cuenta las condiciones que acostumbran a darse en situaciones de pocos medios técnicos y personal poco calificado: la mezcla se ha hecho a mano, el tiempo de curado de 7 días y durante los experimentos las muestras estuvieron en un ambiente con un 40% de humedad y una temperatura de 25°C. Para situaciones ambientales de más humedad y/o menos calor la resistencia que cabe esperar será mayor.

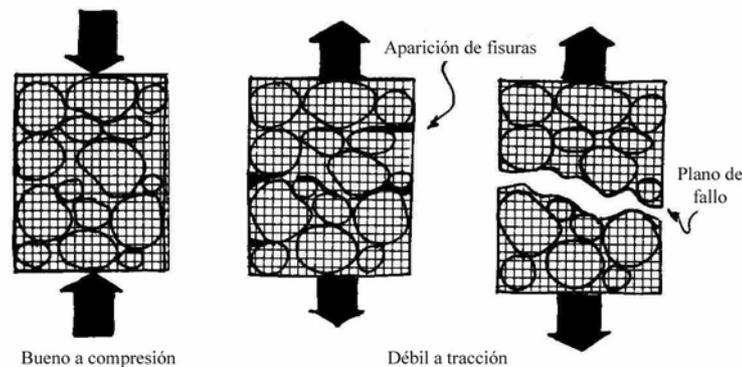


Fig.2.8.- Mortero sometido a carga.

### Módulo de deformación longitudinal

El mortero presenta un módulo de elasticidad generalmente inferior al del hormigón de la misma resistencia, como bien comenta Wainshtok (1998). Esto puede justificarse por la presencia en el mortero d'una mayor cantidad de pasta y menor de áridos, que en hormigones usuales.

En el caso del mortero, a falta de otras indicaciones especialmente elaboradas, se puede tomar como referencia la recomendación de la norma rusa para ferrocemento (1998) que permite estimar un módulo de deformación del mortero igual a **0,80·(módulo determinado para un hormigón de la misma resistencia)**.

### Permeabilidad

La permeabilidad depende fundamentalmente, como señalan Wainshtok (1998) y Turner (2000), de la porosidad de la pasta de mortero, ya que la porosidad de los granos de los agregados es extremadamente baja. De hecho, está directamente relacionada con la relación agua/cemento como se puede apreciar en la figura 2.9.

En nuestro caso, una proporción elevada de agua/cemento puede presentar una mayor permeabilidad un vez endurecida la pasta. Además, hay que tener en cuenta que el espesor de pared adoptado es considerablemente pequeño. Así pues, habrá que asegurar la impermeabilidad añadiendo un *aditivo impermeabilizante*.

Aún así, se comprobará la filtración experimentada aproximadamente por un tanque de 2cm de espesor de las características que se indican abajo, en la figura 2.10.

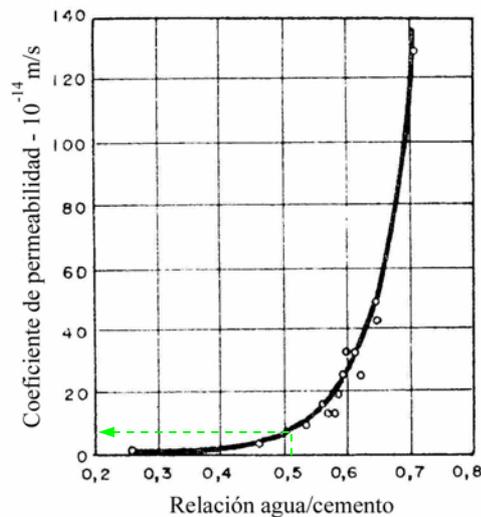


Fig.2.9.- Permeabilidad del mortero vs. relación agua/cemento.

Considerando que la proporción agua/cemento es de 0,5 el *coeficiente de permeabilidad* (K) corresponde aproximadamente a 10<sup>-13</sup> m/s. Por lo tanto, considerando un espesor de 2cm de pared, podemos estimar el valor medio de agua total filtrada:

$$Q = q \cdot S = (-K \cdot \nabla h) \cdot S = \left( K \cdot \frac{H/2}{e} \right) \cdot S = \left( 10^{-13} \cdot \frac{0,9}{0,02} \right) \cdot \pi \cdot 2,6 \cdot 1,8 = 7 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3/\text{s} \equiv 2\text{l/año}$$

Donde para estimar la filtración se ha considerado el nivel piezométrico a la altura de la mitad del tanque H/2 (ver figura 2.10).

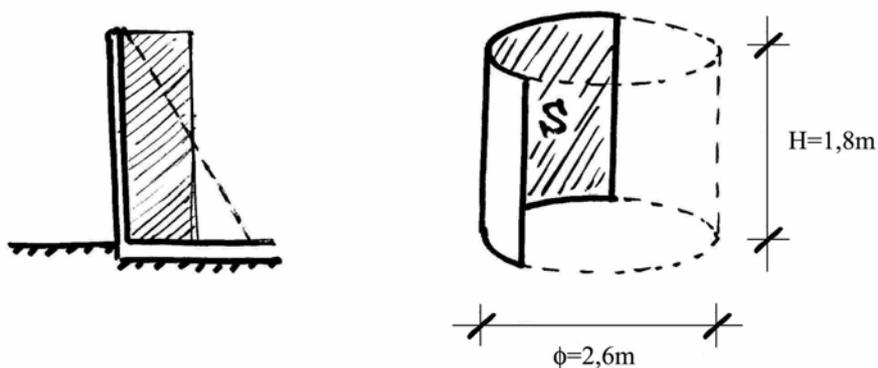


Fig.2.10.- Cálculo de la filtración en el tanque.

Se confirma pues, que la cantidad de agua filtrada en el más desfavorable de los casos es insignificante.

La permeabilidad de la pasta es también función de la hidratación. Según señala Neville (1963) a medida que avanza la hidratación la permeabilidad de la pasta disminuye. Así, es muy interesante garantizar una buena hidratación del mortero. Ésta es otra de las razones de peso que hace del curado uno de los procesos más importantes en la ejecución del ferrocemento.

### 2.3.2.- Armadura de refuerzo

La función del refuerzo en el ferrocemento es, en primera instancia, conformar la estructura y soportar el mortero que aún no ha fraguado como se describe Wainshtok (1998). Posteriormente, ha de absorber los esfuerzos de tracción que el mortero por sí sólo no sería capaz de soportar y contribuir a distribuir y reducir el número y tamaño de las fisuras.

Hay muchos tipos de refuerzos de acero, los más habituales son las telas de malla, que se distribuyen uniformemente en la masa de mortero y que, como principal característica han de ser manipulables y flexibles para adaptarse a las más diversas formas (ver figura 2.11).

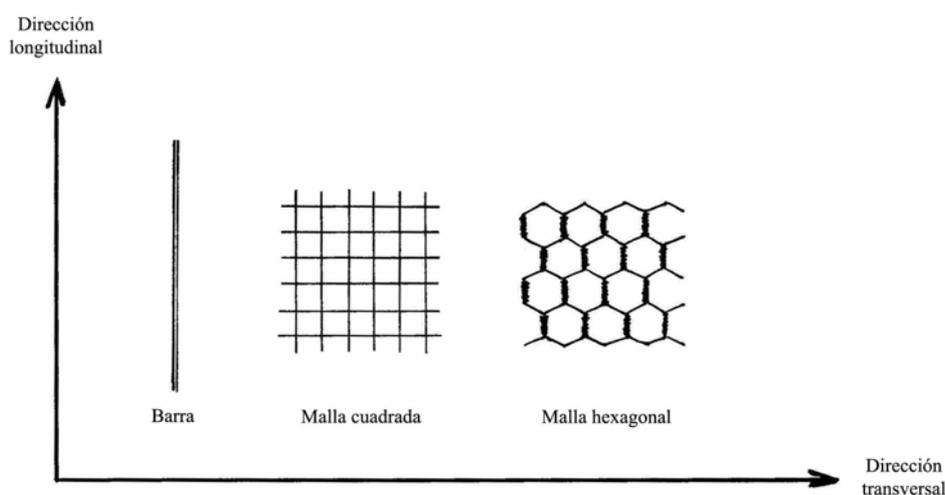


Fig.2.11.- Tipos de refuerzo según su forma y su disposición.

Watt (1986) recomienda utilizar acero galvanizado para evitar la oxidación durante el almacenamiento. En ningún caso se utilizará pintura de aluminio ya que el aluminio podría reaccionar con el cemento y dar lugar a una muy mala adherencia entre acero y mortero.

#### Tela de malla hexagonal (malla de gallinero)

La tela de malla hexagonal (figura 2.12), más conocida como malla de gallinero, es la más barata y fácil de manipular. Es además la que presenta una mayor disponibilidad. Está

formada por el doblamiento de alambres de entre 0,5 i 1,5mm de diámetro, con una separación de entre 12,5 i 25mm.

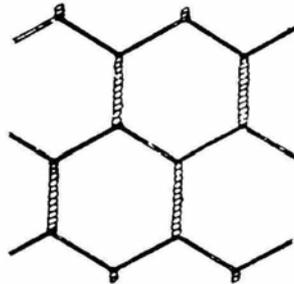


Fig.2.12.- Malla retorcida (de gallinero).

### Electromallas (mallas electrosoldadas) y barras

Es el refuerzo utilizado generalmente para el denominado acero de esqueleto, que conforma el reticulado sobre el que se colocan las mallas de alambre. Está formado por barras de diámetro de entre 3 y 10mm, la separación entre barras puede llegar hasta 30cm. Su función se considera básicamente rigidizadora. No obstante, si se disponen más juntas i con diámetros pequeños también pueden actuar conjuntamente con las mallas como refuerzo.

### **2.3.3.- Otros**

#### Aditivos:

Además de los numerosos aditivos comúnmente empleados en la producción de hormigón armado convencional, el ferrocemento puede requerir la adición de algún aditivo que reduzca la reacción entre el mortero y el refuerzo galvanizado. El trióxido de cromo ha demostrado ser útil al respecto y las cantidades a utilizar dependen de la relación agua/cemento empleada y es aproximadamente 300 partes por millón por peso del mortero. No es necesario tomar especiales precauciones cuando el refuerzo es de un material no galvanizado (Hansen, 1971).

#### Encofrado

El encofrado es necesario para soportar las paredes, mientras que el mortero es extendido por la pared del tanque. Un buen encofrado es caro pero se puede recuperar y durar años, utilizándolo para otros tanques.

De hecho, existen tres alternativas a la hora de solucionar el tema del encofrado para extender el mortero en la pared:

- La primera, en el caso que el tanque disponga de un *esqueleto de refuerzo* mediante una electromalla que le confiera una rigidez suficiente entonces se puede utilizar un

material flexible pero al mismo tiempo con rigidez laminar que tiene la única función de generar una superficie de fondo para poder extender el mortero desde fuera. Para ello puede resultar suficiente el empleo de láminas de cartón (ver figura 2.13).



Fig.2.13.- Encofrado empleado en un tanque ejecutado en El Salvador.

- En el caso que el tanque no disponga de electromalla, se puede utilizar un encofrado recuperable a base de *planchas de acero galvanizado* como se muestra en la figura 2.14. Éstas pueden ser corrugadas o no, y tienen la ventaja de su bajo coste, ligereza y durabilidad contrastadas.

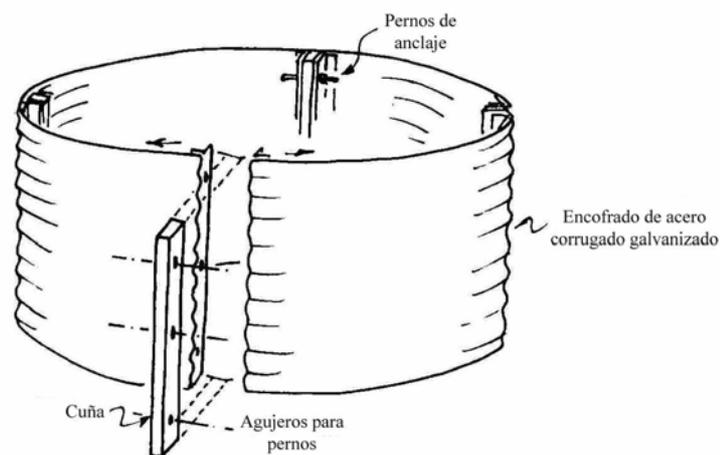


Fig.2.14.- Encofrado con láminas de acero corrugado.

- Existe otra alternativa, consistente en utilizar materiales fáciles de obtener a nivel local como tablones de madera, pared de ladrillos o adobe (mezcla de barro y paja). En este último es habitual una vez endurecido el mortero romperlo y retirarlo del interior del tanque.

En el capítulo 4 se va a describir más detalladamente las diferentes alternativas de ejecución de tanques de ferrocemento.

### Herramientas

El mortero debe ser mezclado bien con las manos. Es bastante laborioso y si no se mezcla completamente dará lugar a un mortero grumoso, difícil de extender en las paredes. Las planchas empleadas para el extendido (figuras 2.15a, 2.15b, 2.15c) son más sencillas de utilizar si son de acero que de madera. La superficie de cada capa de mortero ha de ser raspada un poco una vez endurecida con un rascador (figura 2.15g) para proporcionarle una rugosidad en la que se pegue la siguiente capa.



Fig.2.15.- Algunas de las herramientas utilizadas para la ejecución de un tanque.



Fig.2.16.- Palanca, picos, pala, azada y otras herramientas necesarias.

Simon B. Watt (1986) plantea el equipo necesario para un programa de construcción de tanques de estas características. Aún así hay que remarcar que, siempre que sea posible, es interesante utilizar las herramientas locales disponibles.

Número	Descripción	Figura
4	Plancha de acero para extender la pasta.	2.15a
4	Panel de mano metálico de 30x30cm para usar con la plancha.	2.15b
4	Tabla para empastar de 75x75cm.	2.15c
2	Cepillo para limpiar las planchas del encofrado.	2.15i
2	Pincel.	2.15f
1	Rascador para el mortero	2.15g
1	Sierra para cortar hierro y alambre.	2.15d
1	Sierra para cortar madera.	-
1 juego	Destornillador/llaves para manipular tornillos.	-
1	Palanca de aproximadamente 1 metro.	2.16
1	Tenaza para cortar/manipular los alambres.	2.15h
1	Martillo cincel para poder cortar el mortero endurecido.	2.15e
1	Caja de mezcla para el mortero de 50x50x40cm. aprox.	2.4
1	Tamiz con una abertura máxima de 5mm. para la arena.	-
4	Palas para excavar y también para la mezcla de mortero.	2.16
1	Cinta métrica de hasta 50m.	-
1	Cuerda	-
1	Hacha para cortar la madera.	-
2	Picos para excavar.	-
1	Llave para retesar los alambres.	4.4
1 juego	Secciones laminares de encofrado (cartón / acero)	2.13 / 2.14
1	Carretilla para transportar el mortero.	-
1 juego	Cubos contenedores de agua.	2.4
1	Cubierta de plástico o tejido de saco para el curado del mortero.	-

Tabla 2.2.- Lista de herramientas y equipamiento.

## 2.4.- ESTRUCTURAS DE FERROCEMENTO. APLICACIONES

A pesar de la evidencia que el ferrocemento era un material bueno y económico para la construcción, no empezó a tener una cierta aceptación hasta la década de los 60, en la que hubo una expansión por todo el mundo en la utilización de este material.

En la década de los 70, el ferrocemento empezó a erigirse como un material muy útil para aplicaciones rurales en países en vías de desarrollo. Éste no requería grandes plantas ni maquinaria y, con un mínimo de tecnología, los conocimientos básicos se podían adquirir fácilmente. En áreas urbanas, la aplicación potencial del ferrocemento tenía que ser vista desde otra perspectiva. En este caso, la aportación del ferrocemento podía ser la de no tener que hacer frente a la extrema escasez y alto coste de mano de obra cualificada.

Desde que el ferrocemento ha logrado ofrecer un alto ratio *resistencia a tracción-peso* y un mejor comportamiento frente a rotura, resulta especialmente adecuado para estructuras de pared delgada como barcos o estructuras para el almacenamiento de agua. A continuación se van a describir brevemente las posibles aplicaciones del ferrocemento y los resultados obtenidos en experiencias anteriores.

### 2.4.1.- Barcos

Prácticamente en todos los países del mundo se han construido barcos de ferrocemento. De entre ellos destaca China, donde se han introducido a gran escala. Hagenbach (1972) da algunas ideas de la extensa serie de barcos de ferrocemento que se han construido.

La construcción de barcos de ferrocemento ha sido desde hace tiempo atractivo para muchos países en desarrollo industrial porque:

- Las materias primas básicas están disponibles en la mayoría de países.
- Se pueden fabricar con cualquier forma y diseño.
- Duran más que con la mayoría de maderas y resultan más económicos que importar el acero.
- Los conocimientos para la construcción en ferrocemento se pueden adquirir fácilmente.
- La construcción en ferrocemento requiere menos recursos económicos y más de mano de obra.
- Excepto en diseños sofisticados y sometidos a altas tensiones un único supervisor entrenado puede cumplir los requisitos para el control de calidad utilizando mano de obra prácticamente sin conocimientos.

El ferrocemento es un material relativamente pesado comparado con la madera y los plásticos reforzados con fibras. La mayoría de los barcos de madera de menos de 10m de eslora se construyen mediante placas de unos 25mm. Para tener el mismo peso de casco, el ferrocemento debería tener sólo 8mm de espesor, pero a pesar de haberse construido barcos pequeños con este espesor, su resistencia al impacto no es suficiente como para utilizarlos en la pesca o el transporte. Por el momento, el ferrocemento se ha mostrado como más adecuado para barcos de más de 10m de eslora. Hasta con este tamaño, los barcos de ferrocemento son

aún más pesados que los de madera, pero se trata simplemente de un ligero inconveniente, a velocidades moderadas (entre 6,5 y 10 nudos) como bien describe Greenius (1975).



Fig.2.17.- Barco en exposición construido de ferrocemento en La Habana, Cuba (Wainshtok, 1998).

Los barcos construidos en China parecen combinar todas las características favorables del ferrocemento. La mayoría han sido construidos con una longitud de 15 metros y una capacidad de carga de 10 toneladas. Son construidos en fábricas a gran escala utilizando técnicas de construcción en masa tal como la prefabricación de las partes y la utilización de marcos que dan la forma al barco y que finalmente quedan formando parte integral de la estructura del mismo.

Se concluye que el ferrocemento puede ser utilizado muy satisfactoriamente para la construcción de botes, sin embargo, se han ido presentando algunos problemas:

- La *aplicación y penetración del mortero* parecen ser el mayor problema en la construcción de botes de ferrocemento. En ocasiones han aparecido daños en el casco que revelaron corrosión importante del acero debido a presencia de coque.
- La *falta de resistencia al impacto y al punzonamiento* parecen ser la causa más común de daño en las embarcaciones de ferrocemento. Su reparación no es complicada, pero la frecuencia con que se tienen que hacer ha reducido el entusiasmo de los pescadores por este tipo de botes.

### 2.4.2.- Silos

En la mayoría de las granjas y pequeñas poblaciones de los países subdesarrollados no existen adecuadas instalaciones para almacenar grano. Por ejemplo, se sabe que en Tailandia más del 25% del arroz se pierde debido a los pájaros, roedores, hongos e insectos principalmente. Los silos de ferrocemento para más de 30 toneladas de grano parecen ser una buena solución económica en estos países: además de que el ferrocemento es impermeable, con una fabricación adecuada se puede lograr que sea hermético.

La Corporación de Investigación Científica Aplicada de Tailandia (Applied Scientific Research Corporation of Thailand) ha desarrollado una familia de silos económicos y además herméticos con capacidad para más de 10 toneladas para almacenar granos, otro tipo de alimentos, fertilizantes, cemento, pesticidas o agua potable. La base de los silos es curvada y está formada por dos capas de ferrocemento, en medio de estas capas va una capa de asfalto (Smith, 1971). Estos silos son de forma cónica (figura 2.18).

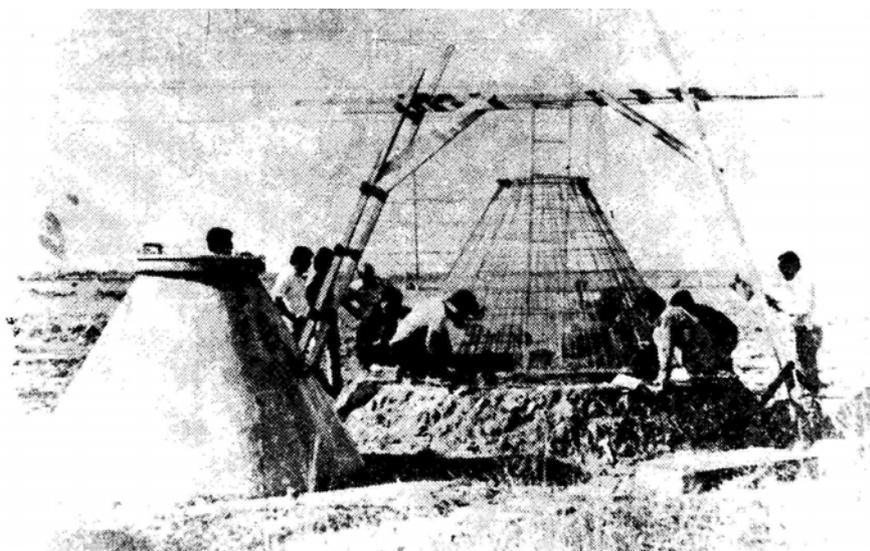


Fig.2.18.- Silos de ferrocemento para granos (Wainshtok,1998).

En Etiopía el método tradicional de almacenamiento es mediante hoyos en la tierra. Se ha encontrado que cuando estos hoyos son forrados con ferrocemento y tapados con una tapa hermética se puede lograr una excelente cámara de almacenaje.

En la India han sido desarrollados, analizados y aprobados barriles de poca capacidad (poco más de tres toneladas). Las unidades son de forma cilíndrica de 1,20m de diámetro y 1m de alto. Los barriles fueron puestos en carga en el laboratorio con trigo para establecer la eficiencia del ferrocemento para transmitir las cargas por las paredes, también fueron probados en el campo para juzgar su efectividad contra los insectos. El coste estimado de los barriles de ferrocemento demostró ser menor que los de acero, hormigón armado o aluminio (ACI Comité 549, 1997).

### 2.4.3.- Tanques

La misma importancia que en los países subdesarrollados tiene el almacenamiento de grano lo tiene el almacenar agua potable, por esto, en este tipo de países han sido exploradas las posibilidades del ferrocemento para la construcción de tanques, aunque también en países desarrollados, los tanques de ferrocemento son una alternativa atractiva para el almacenamiento de agua potable. En Nueva Zelanda, se construyen en fábricas pequeños tanques de aproximadamente  $19\text{m}^3$  (Wellington, 1968).

En el Science Museum of Virginia (Richmond) se utilizaron tanques de ferrocemento con una capacidad de  $605\text{m}^3$  para el almacenamiento de agua calentada por energía solar. Se llevó a cabo un estudio de factibilidad para determinar si había alguna ventaja al utilizar ferrocemento en vez de acero o fibra de vidrio para la construcción de dichos tanques en el cual se concluyó:

- El ferrocemento es económicamente factible para la construcción de tanques de agua para almacenar energía proveniente de un sistema solar.
- La versatilidad de forma, la no presencia de corrosión, la posibilidad de almacenar agua caliente, la relativamente poca necesidad de mantenimiento y la forma de falla dúctil son importantes ventajas del ferrocemento sobre otros materiales comúnmente utilizados para el almacenamiento de líquidos a baja y media presión (345kPa).
- Los tanques de ferrocemento requieren menos energía para su ejecución que los de acero.

Esta cuestión se va a analizar con más detalle en el capítulo 4.

### 2.4.4.- Viviendas

En algunos países subdesarrollados existe la necesidad de un material económico para la construcción de techos en viviendas unifamiliares, ya que es posible la construcción de paredes y pisos con materiales locales, sin embargo, los intentos hechos en el pasado por encontrar un material local para techos que sea económico, durable y resistente al fuego, insectos, tormentas y terremotos no han sido muy exitosos. Como resultado de esto muchos países subdesarrollados se ven en la necesidad de importar láminas de acero galvanizado o láminas de asbesto-cemento, estos dos materiales pueden llegar a costar hasta el 60% del coste total de la vivienda (National Academy of Science, 1973).

El ferrocemento parece ser una alternativa económica para este propósito. Las ventajas descritas anteriormente para la construcción de botes son también aplicables en la construcción de techos, ya que puede ser fabricado bajo alguno de los sistemas de producción en masa como es el de placas prefabricadas (figura 2.19), que representa un proceso más apropiado para la demanda concentrada de las áreas urbanas o también puede ser fabricado in situ en pequeñas poblaciones.

La construcción de techos en cientos de casas en las zonas más pobres de México ha demostrado la eficiencia del ferrocemento para auto-construcción, ya que el grado de pericia requerido no es muy alto (Castro, 1977). En la mayoría de los techos se utilizó una forma de domo con una luz de 3 a 6m, esta forma se logró mediante la utilización de redondos que iban sujetos a los muros. La construcción de estos techos no requirió de ningún equipo mecánico.

En Italia se han construido techos con luces mayores, por ejemplo, techos con luces superiores a los 17m y con un espesor de 30mm para el resguardo de animales (Barberio, 1975).

El Building Research Institute, State Engineering Corporation, Colombo, Sri Lanka ha estado desarrollando y probando láminas de ferrocemento corrugadas, estas láminas son desarrolladas pensando en sustituirlas por las láminas de asbesto-cemento que son ampliamente usadas como material de construcción en ese país. De los estudios se desprende que las láminas de ferrocemento son menos caras, requieren de menor inversión de capital y menor intercambio con el extranjero. Estas láminas son de tal forma diseñadas que su peso, dimensiones y capacidad de carga son similares a las de asbesto-cemento y además se ha observado que las de ferrocemento tienen mayor ductilidad (Naaman et al, 1976). Por lo tanto, ya que el suministro de fibras de asbesto es limitado y además son cancerígenas, el ferrocemento puede ser un apropiado reemplazo.



Fig.2.19.- Techo con losas prefabricadas de ferrocemento (ACI Comité 549, 1997).

Nótese que ya que las tensiones producidas por la carga muerta son críticas en el diseño de techos, el uso de placas de pared delgada de ferrocemento debería ser más utilizado en la construcción de techos.

### 2.4.5.- Otras aplicaciones

Además de las aplicaciones brevemente mencionadas, están siendo estudiados muchos otros usos del ferrocemento como material estructural por todo el mundo.

Entre ellos se encuentran: sunscreens (figura 2.20) y paneles sándwich para grandes edificios, piscinas, tableros pequeños para puentes, patanas, cabañas flotantes, canales de riego, esculturas de grandes dimensiones, elementos del mobiliario urbano, como fuentes ornamentales, parques infantiles e incluso recintos de ferrocemento para el centrifugado de suelos (figura 2.21).

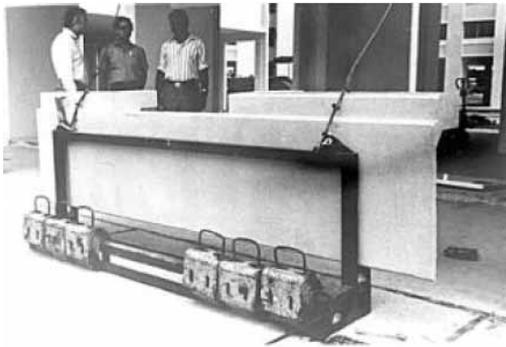


Fig.2.20.- Sunscreens de ferrocemento (ACI Comité 549, 1997).

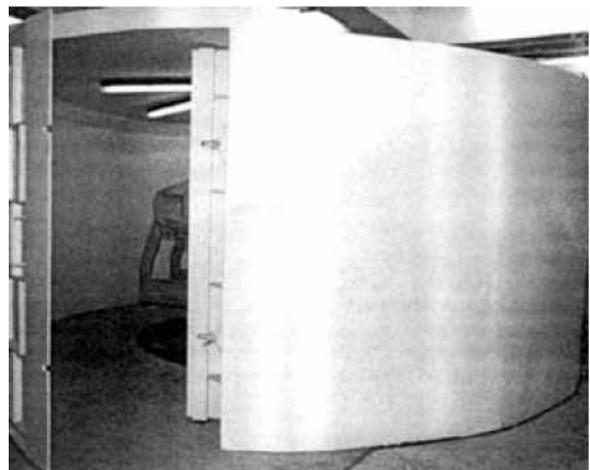


Fig.2.21.- Recinto de ferrocemento para el centrifugado de suelos (ACI Comité 549, 1997).

## 2.5.- ENSAYOS DE LABORATORIO

Se ha creído conveniente añadir en este capítulo el seguimiento, análisis y valoración de los resultados correspondientes a unos ensayos de laboratorio orientados a *determinar el efecto de la retracción en tanques de ferrocemento* que, si bien se trata de un fenómeno muy particular dentro de lo que corresponde al alcance de este estudio, también es verdad que la información que estos ensayos aportan es muy valiosa, teniendo en cuenta la escasez de literatura específica relacionada con el tema.

El compendio de estos resultados está basado en el informe elaborado por Stephen Turner (2000) a cargo del Departamento de Ingeniería de la Universidad de Warwick.

### Los ensayos

En una primera fase, el estudio se centra en la determinación de la **resistencia a tracción** a los 28 días correspondiente a: probetas de mortero sin armar, probetas armadas con malla de gallinero y probetas armadas con malla cuadrada.

Cabe decir que, esto nos proporciona una estimación de la resistencia a tracción del mortero con el cual se ejecutará el tanque, pues por las proporciones de la mezcla las propiedades mecánicas esperables son similares. De hecho, se trata de valores habituales cuando se sabe que las condiciones de ejecución serán malas, a mano y a través de personal no cualificado, tal como suele suceder en este tipo de depósitos.

Por desgracia, en el caso de malla de gallinero la resistencia a tracción obtenida no es extrapolable para determinar la resistencia de la pared del depósito, ya que éste dispone de diversas mallas y, aparte de que el fenómeno no es lineal, no se contempla (si se da el caso) la presencia de electromalla.

En una segunda fase, se ha estudiado la **retracción libre**, es decir, la deformación experimentada por las anteriores probetas sometidas a unas condiciones que intenten simular el ambiente en el que se va a ejecutar el tanque, sin estar sometidas a ningún tipo de coacción. Los resultados de este experimento usados en combinación con los del anterior permitirán obtener el tiempo teórico que tardarán en aparecer las primeras fisuras, dato especialmente interesante para tener una idea de la magnitud de la contribución de la malla en la reducción del efecto de la retracción sobre la estructura, así como también el tiempo mínimo necesario de aplicación del curado para evitar la aparición de fisuras en el depósito.

Finalmente en la tercera parte del experimento, se ha estudiado la **retracción impedida**, fenómeno que tiene especial relevancia a nivel de la unión pared-losa (tal como ya se ha analizado en el apartado 2.3.1) debido a las tensiones que se generan por la diferencia de deformaciones experimentadas por la losa y la pared. Así lo que se ha intentado en este caso es simular el efecto de la fisuración que se produce en la pared del tanque debido a la restricción de movimiento por la unión pared-losa que se produce en los modelos reales, a través de unas muestras.

Este último experimento es interesante desde el punto de vista de ver el desarrollo de las fisuras a lo largo de la pared en una aproximación mucho más afinada respecto de los anteriores experimentos en la que será la geometría del depósito.

### Mezcla, curado y almacenamiento

Todos los ensayos se han llevado a cabo en mezclas con una proporción arena/cemento de 3:1 y una relación agua/cemento de 0,6:1.

Asimismo, para el proceso de curado, se han cubierto las muestras mojándolas diariamente durante un periodo de 7 días.

Finalmente, los experimentos se han llevado a cabo en unas condiciones de 25°C y un 40% de humedad relativa.

### **2.5.1.- Resistencia a tracción**

Todo el análisis estructural del depósito se ha basado en la teoría de láminas, suponiendo que el esfuerzo se produce a lo largo de la fibra media del material. Eso hace que para determinar la resistencia a tracción solo resulte válido el ensayo a tracción directa, que es el que se ha utilizado.

### Equipo y muestras

El equipo empleado para el ensayo es el que se muestra en la figura y que consiste en una placa cuadrada a la que va a parar una barra  $\text{Ø}10$  enroscada justo en medio, a través de la cual se transmitirá la carga a la muestra. Por la otra cara se enroscan cuatro barras  $\text{Ø}6$  a las que quedará fijada la muestra de mortero armado (ver figura 2.22).

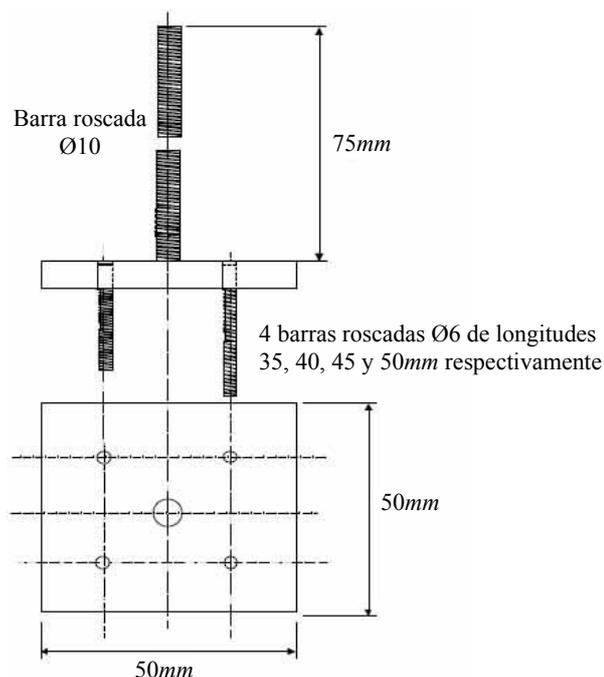


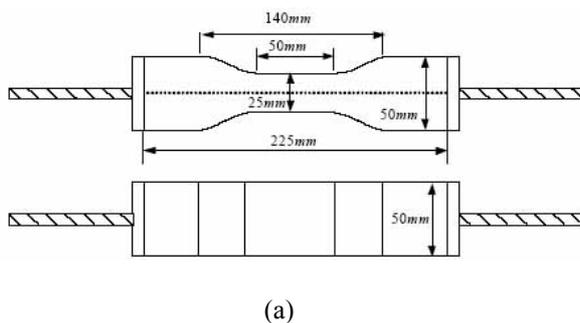
Fig.2.22.- Placa de anclaje de la muestra.

Con tal de evitar la creación de un punto débil de la muestra al extremo de las barras Ø6, las longitudes de estas varían de 35 a 50mm.



Fig.2.23.- Molde empleado para la elaboración de las probetas.

La geometría de las muestras no es completamente rectangular, sino que se ha generado a través de dos cuñas de madera un cuello con tal de asimilar al máximo el comportamiento de la muestra al de la pared del depósito. En la figura 2.24(a) se puede ver dos secciones de la muestra, en la sección superior se puede ver el punto por donde pasa la malla (marcado por una línea de puntos) justo en la fibra media y atravesando el cuello.



(a)

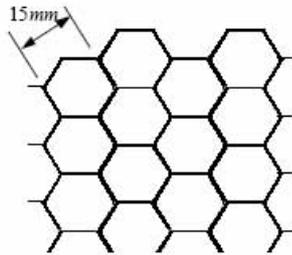


(b)

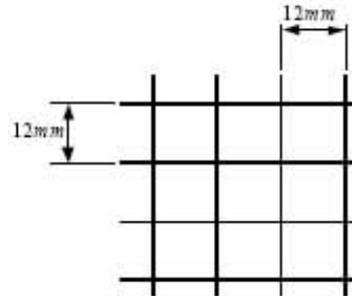
Fig. 2.24.- Geometría de las muestras ensayadas.

Como ya se ha adelantado anteriormente, los materiales ensayados han sido: mortero sin refuerzo, mortero reforzado con una malla de gallinero y mortero reforzado con una malla cuadrada. Las dimensiones de las mallas (ambas de acero galvanizado) son:

Malla de gallinero ( $\varnothing=0.5mm, s=15mm$ )



Malla cuadrada ( $\varnothing=1mm, s=12mm$ )



Resultados

Al cabo de 28 días, las muestras han sido ensayadas en la máquina. Los resultados sólo muestran cargas de rotura, no se tienen datos sobre las deformaciones experimentadas, bien porque la baja cuantía de acero ha provocado una rotura súbita de las probetas casi sin deformación bien porque no se ha estimado necesaria la medida de la deformación. Ello hubiera resultado interesante para obtener directamente del ensayo, la curva tensión-deformación del material así como el módulo de deformación (E).

Se hizo entrar en carga la muestra a una velocidad de  $0,07mm/min$  hasta la rotura de esta. El ensayo se llevó a cabo en 4 probetas de cada tipo, obteniéndose los siguientes resultados:

Mortero sin refuerzo			Mortero con malla de gallinero		
	Carga (kN)	Tensión (MPa)		Carga (kN)	Tensión (MPa)
Muestra 1	2,68	2,14	Muestra 1	2,78	2,22
Muestra 2	2,44	1,95	Muestra 2	1,55	1,24
Muestra 3	1,13	0,90	Muestra 3	2,65	2,12
Muestra 4	1,67	1,34	Muestra 4	2,53	2,02
<b>Media</b>	<b>1,98</b>	<b>1,58</b>	<b>Media</b>	<b>2,38</b>	<b>1,90</b>
<b>(COV)</b>	<b>(0,36)</b>	<b>(0,29)</b>	<b>(COV)</b>	<b>(0,24)</b>	<b>(0,19)</b>

Mortero reforzado con malla cuadrada		
	Carga (kN)	Tensión (MPa)
Muestra 1	3,27	2,62
Muestra 2	2,34	1,87
Muestra 3	2,32	1,86
Muestra 4	3,54	2,83
<b>Media</b>	<b>2,87</b>	<b>2,29</b>
<b>(COV)</b>	<b>(0,22)</b>	<b>(0,18)</b>

Nota:

$$COV_x = \frac{\sigma_x}{\bar{X}}$$

coeficiente de variación

Tabla 2.3.- Resumen de resultados obtenidos en el ensayo de resistencia a tracción.

Tal como se podía prever, las probetas más reforzadas, con mayor cuantía, resisten más. Se ve también como se consigue una menor variación en los resultados obtenidos con una mayor cuantía de acero. Así, en elementos a tracción la malla actúa de dos formas: por un lado, da una mayor resistencia, y por el otro restringe el crecimiento de las fisuras, es decir, actúa como obstáculo para la propagación de éstas.

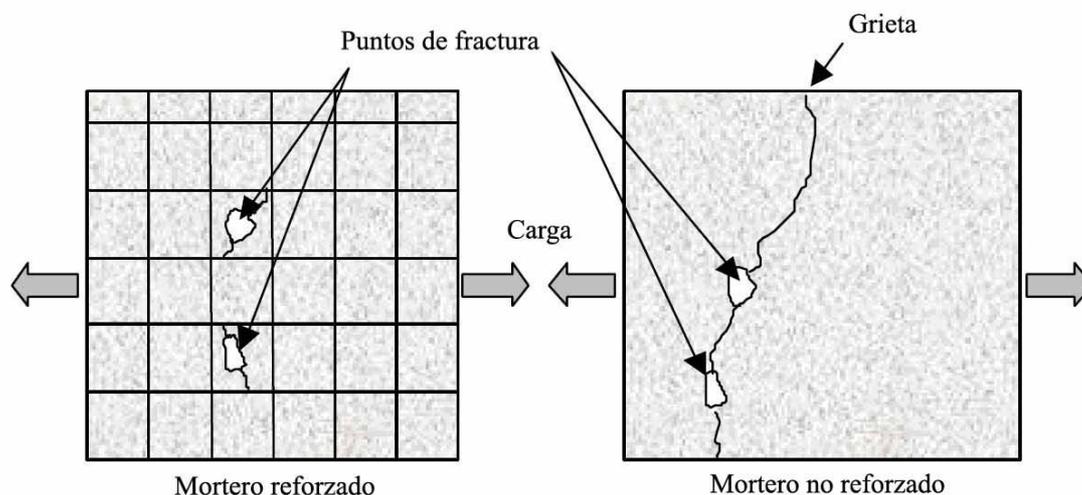


Fig.2.25.- Propagación de una fisura en el mortero.

En la figura 2.25 se puede ver lo que decíamos antes: en el caso de mortero sin armar, la fisura no encuentra ningún impedimento para su propagación, mientras que la presencia de una malla en el mortero armado se interpone en desarrollo de la fisura a lo largo del elemento.

### 2.5.2.- Retracción libre

El ensayo de retracción libre sirve para determinar la proporción en que el material se contrae en caso de estar libre de cualquier coacción. Ésta es especialmente interesante si se utilizan los resultados del ensayo en combinación con los del anterior ya que permitirán obtener el tiempo (teórico) de aparición de fisuras.

#### Equipo y muestras

Así pues los materiales ensayados han sido también mortero sin refuerzo, mortero con malla de gallinero y mortero con malla cuadrada. Las probetas ensayadas en este caso son de sección cuadrada de  $50 \times 50 \text{ mm}$  i  $225 \text{ mm}$  de longitud, como se puede ver en la figura siguiente.

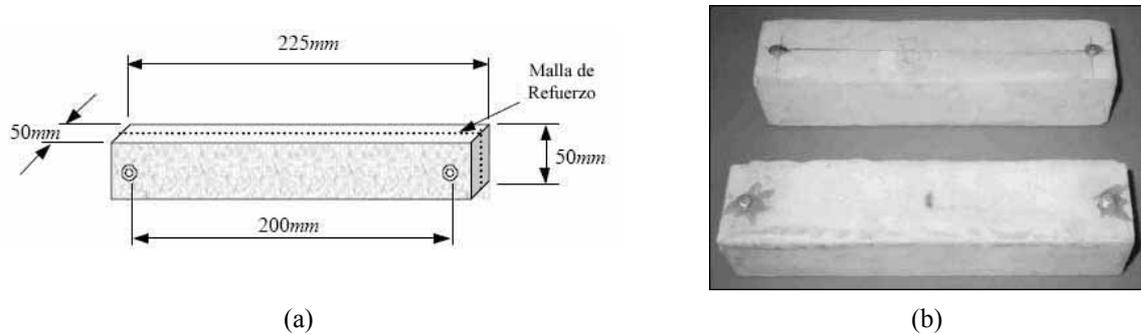


Fig.2.26.- Dimensiones y foto de una probeta del ensayo de retracción libre.

Diariamente se han ido midiendo las deformaciones experimentadas por las probetas por efecto de la retracción durante un periodo de 28 días. Para este objetivo se ha empleado un extensómetro mecánico como el que se muestra en la figura 2.27, que ha efectuado las medidas en 200mm reales de probeta, como se indica en la figura 2.26(a).

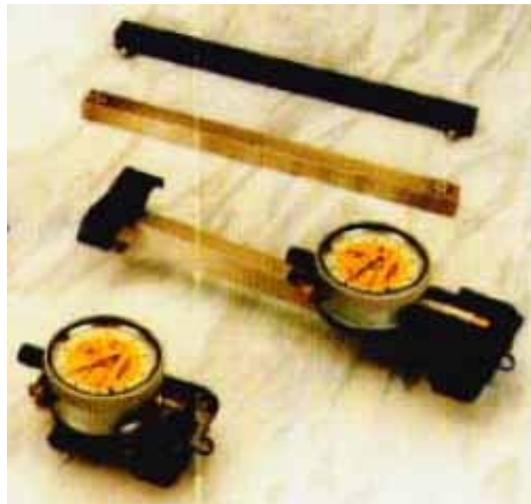


Fig.2.27.- Extensómetro empleado para la lectura de las deformaciones de la probeta.

## Resultados

En la figura siguiente en la que se representan los resultados obtenidos en el ensayo se puede apreciar un hinchamiento inicial, debido al efecto del curado al que se han sometido las muestras. El total de mediciones obtenidas en el ensayo se incluyen en el Anejo 1. El informe no especifica su duración exacta, pero se puede apreciar claramente un cambio en el comportamiento entre el 5° y el 7° día, a partir del que las probetas comienzan a retraer.

Así pues, como se ha podido comprobar, el mortero bajo condiciones húmedas se hincha, mientras que en ambientes secos se retrae.

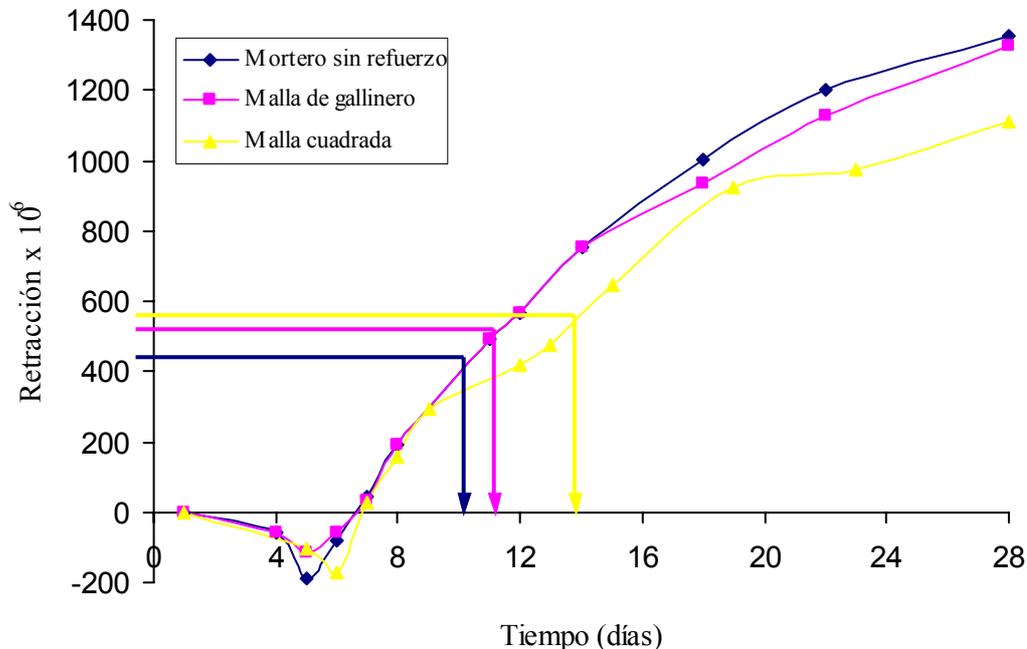


Fig.2.28.- Resultados del ensayo de retracción libre.

Se puede ver también como la curva sigue la misma tendencia de la figura 2.5, aunque en este caso la retracción es mayor, debido a la elevada proporción de agua/cemento (0,6:1). Eso corrobora lo que se comentará en el apartado 2.3.1: los tanques de ferrocemento ejecutados bajo estas condiciones en países en vías de desarrollo son muy susceptibles de sufrir retracción porque tienen una proporción de agua/cemento importante, así como una relación área de pared/volumen muy elevada a parte de un ambiente caluroso y a menudo seco.

A pesar de todo hay un aspecto que hay que remarcar: los resultados muestran un ligero efecto de la malla cuadrada sobre la retracción y un efecto casi imperceptible de la malla de gallinero, no obstante hay que destacar que el hecho de haber ensayado una probeta con una única malla reduce bastante la representatividad de los resultados de cara a los depósitos que se plantean en este estudio. Existe un efecto sinérgico, de conjunto que aparece por el hecho de agrupar diversas mallas en un espesor reducido, ésta es precisamente la idea del ferrocemento, no es lo mismo el efecto producido al colocar cuatro mallas juntas que el efecto de una sola malla multiplicado por cuatro.

Si ahora utilizamos los resultados de este ensayo en combinación con los del anterior podemos obtener, tal como ya se ha descrito al comienzo de este apartado un tiempo teórico  $T_u$  a partir del cual la muestra va a empezar a romper.

	$A_s$ (mm <sup>2</sup> /ml)	$V_f$ (%)	$\sigma_u$ (MPa)	$E_{fc}$ (GPa)	$\epsilon_u = \sigma_u / E_{fc}$	$T_u$ (días)
Mortero cemento	0	0	1,58	3,50	$4,5 \cdot 10^{-4}$	10
Malla de gallinero	13,09	0,05	1,90	3,61	$5,3 \cdot 10^{-4}$	11
Malla cuadrada	65,45	0,26	2,29	4,05	$5,7 \cdot 10^{-4}$	14

Tabla 2.4.- Deformaciones de rotura y tiempos de retracción asociados.

Donde

- $V_f$  Fracción de volumen del refuerzo. Se define más adelante, en la expresión (3.11) del capítulo 3.
- $E_{fc}$  Módulo de deformación de la muestra dado por  $E_{fc} = E_b + E_a \cdot V_f$  según Wainstok (1998), siendo  $E_b$  módulo del mortero 3,5GPa y  $E_a$  el del acero, 210GPa.
- $\sigma_u$  Resistencia a tracción de la muestra (obtenida del ensayo de tracción, en el apartado anterior).
- $T_u$  Tiempo teórico de rotura de la muestra (obtenida de la figura 2.28).

Cabe destacar sin embargo que en realidad esto no significa que las muestras vayan a romper según lo especificado, pues el comportamiento del material no es el de un sólido rígido, sino más bien se comportaría como un término medio entre éste y el de una masa de plastilina que se “amolda” hasta llegar a su estado final. En el caso que exista malla electrosoldada, al retraer el hormigón todavía no ha endurecido del todo, se adapta y no ofrece resistencia a la malla. Se trata más bien de un indicador del tiempo esperable para la aparición de grietas.

### 2.5.3.- Retracción impedida

Este ensayo tiene por objetivo estudiar el desarrollo de grietas debidas a la retracción experimentada por una pared cilíndrica como en el caso de un tanque. De este modo se obtendrán resultados más fiables para comparar con los obtenidos en el apartado anterior.

#### Equipo y muestras

Con tal de simular este fenómeno, se han ensayado unas muestras anulares que reproducen mejor tanto la geometría como el proceso de ejecución de los modelos reales.

Se han estudiado en total cuatro muestras con diferentes tipos de refuerzo cada una: mortero sin refuerzo, mortero con fibras de propileno, mortero reforzado con malla de gallinero y mortero reforzado con malla cuadrada.

Las características de las probetas son las que se ofrecen a continuación en las figuras 2.29 y 2.30.

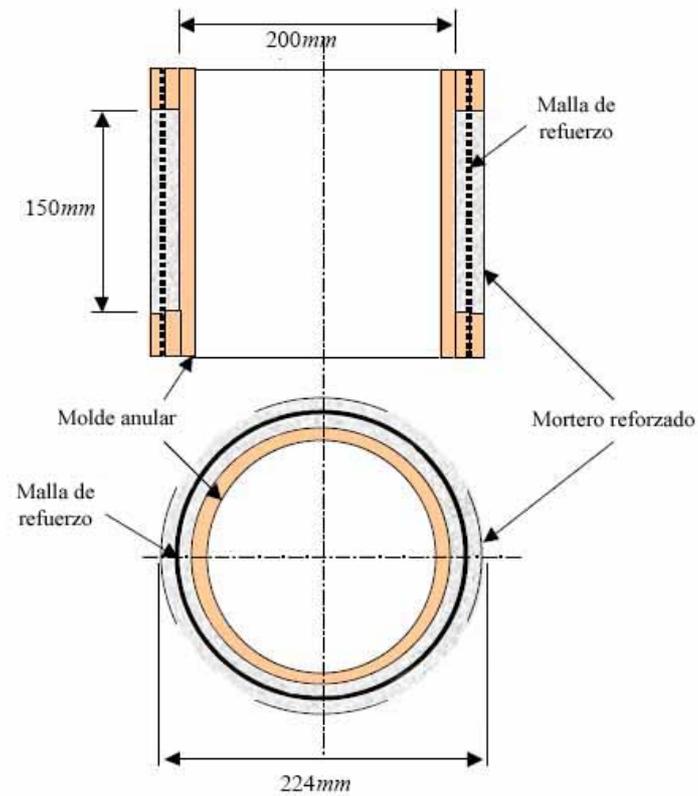


Fig.2.29.- Dimensiones y forma de las probetas anulares.

Igual que con el resto de ensayos, las características de la mezcla, curado y almacenamiento son las descritas al principio de este apartado 2.4.

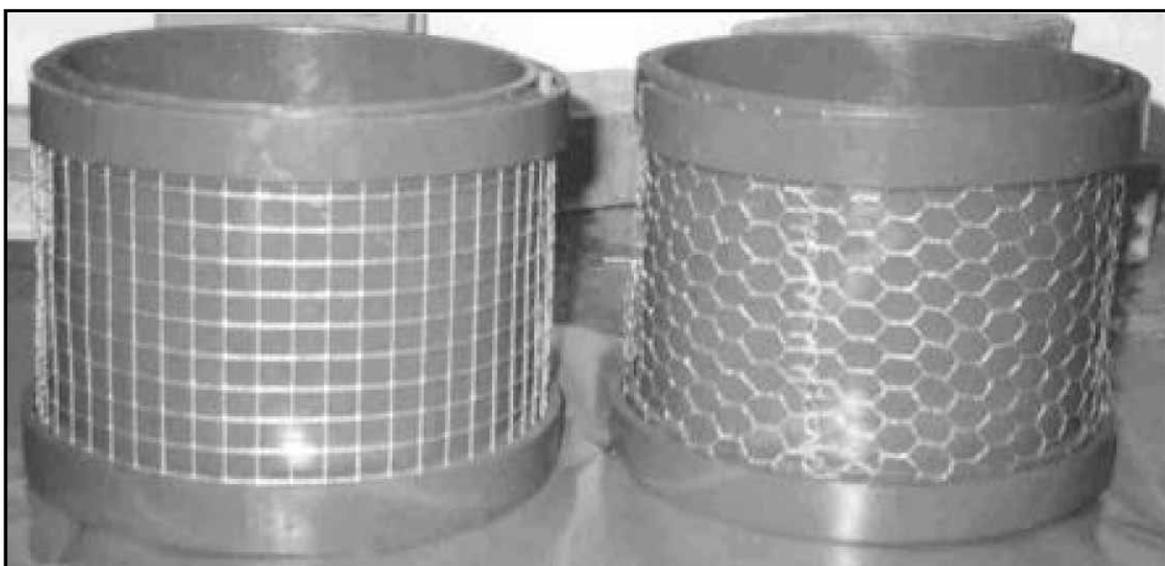


Fig.2.30.- Moldes anulares con las mallas correspondientes antes de aplicar el mortero.

Tal como en los depósitos reales, primeramente se ha dispuesto la malla y después se ha aplicado el mortero. Observamos la colocación de la malla hexagonal: los hexágonos “reposando” sobre la horizontal en la figura 2.30, aunque aquí no trabajan, así es como irán en el modelo real, así logramos que la malla trabaje en sentido circunferencial.

### Resultados

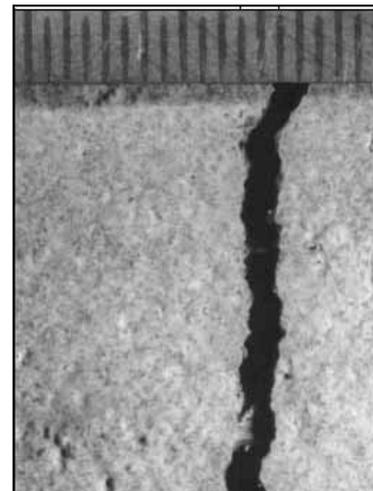
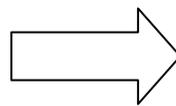
Igual que en el resto de ensayos, el estudio se ha llevado a cabo a lo largo de 28 días desde el emplastecido. En las imágenes que se muestran a continuación, las marcas secundarias correspondientes a los bordes reglados de las probetas son cada  $0,5mm$ .

#### - Mortero sin refuerzo:

La muestra de mortero sin refuerzo (figura 2.31) empezó a presentar signos de rotura al cabo de 5 días. Se produjo una grieta según un crecimiento relativamente lineal, a una proporción de  $0,09mm/día$ ; después de 28 días la grieta era aproximadamente de  $1,75mm$ . Las marcas secundarias del borde reglado están separadas  $0,5mm$ .



Fig.2.31.- Fisura en la muestra de mortero sin refuerzo a los 28 días.



#### - Mortero con fibras de polipropileno:

En este caso dos fisuras verticales se han desarrollado a lo largo de toda la muestra. Las fisuras empezaron a aparecer después de 6 días y se desarrollaron en una proporción relativamente lineal, la más grande a unos  $0,02mm/día$  y la más pequeña a  $0,005mm/día$ .

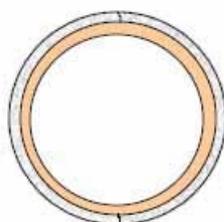


Fig.2.32.- Aparición de fisuras en la probeta.

Después de 28 días la fisura más grande no llegaba a  $0,5mm$  y la más pequeña aproximadamente  $0,1mm$ , como se puede observar en las figuras 2.33(c) y 2.33(b) respectivamente.

Fig.2.33(a).- Fisuración en la probeta de mortero con fibras tras 28 días.

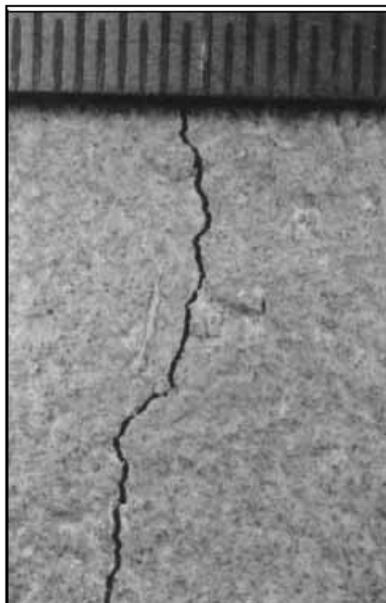
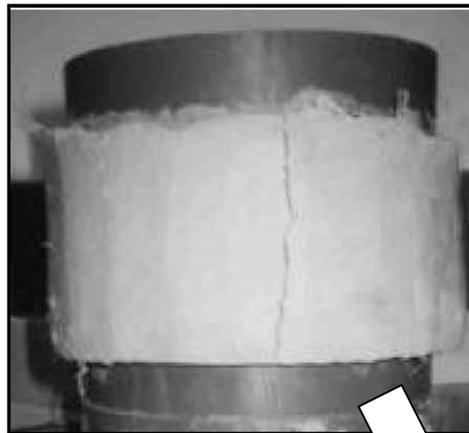


Fig.2.33(b).- Pequeña fisura en la muestra de mortero reforzado con fibras.



Fig.2.33(c).- Fisura grande en la muestra de mortero reforzado con fibras.

En estas fotos no se puede ver claramente, pero las fibras de la mezcla atravesaron los espacios de las fisuras ayudando a mantener la muestra unida y reduciendo por tanto la retracción. Esto se ha ilustrado en la figura 2.34.

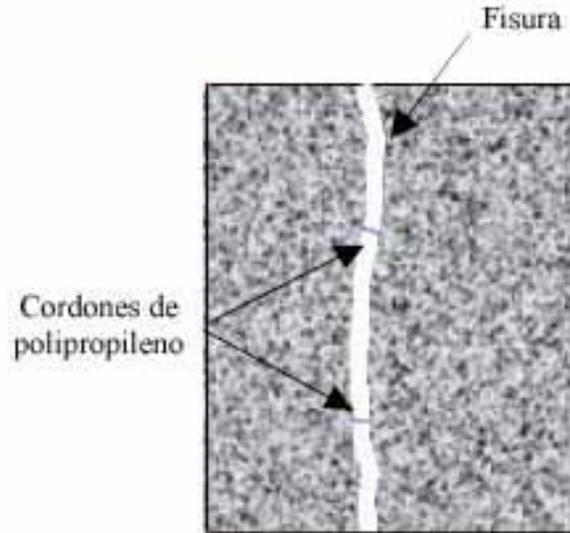


Fig. 2.34.- Fibras de refuerzo.

- Mortero reforzado con malla de gallinero:

En la muestra reforzada con malla de gallinero, las fisuras empezaron a aparecer a los 7 días. El número de fisuras experimentadas ha sido en este caso mayor. La abertura de fisura en cambio ha sido apreciablemente menor, la mayor de ellas se muestra en las figuras 2.35(a) y con más detalle en 2.35(b) con una abertura aproximada de 0,2mm. A diferencia de las apreciadas en las muestras anteriores (figuras 2.31 y 2.33a) no se trata de una única grieta limpia sino que vemos como se divide en dos más pequeñas en la parte superior.

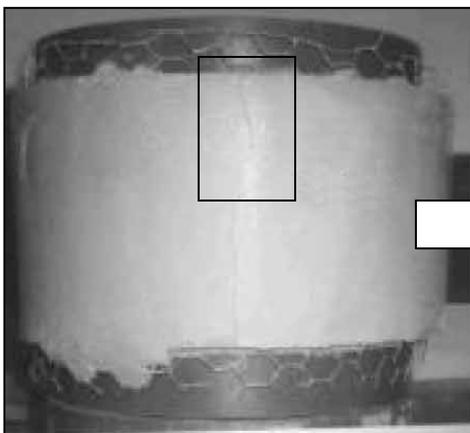


Fig.2.35 (a).- Probeta reforzada con malla de gallinero tras 28 días.

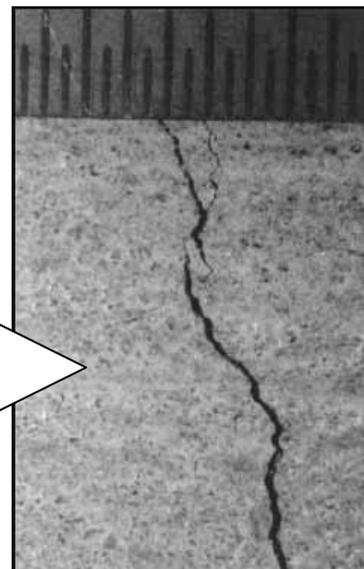


Fig.2.35(b).- Fisura mayor aparecida en la muestra.

- Mortero reforzado con malla cuadrada:

La muestra reforzada con malla cuadrada es la que presenta la mayor cantidad de fisuras. Sin embargo, la mayoría de las que presenta son pequeñas y parten del borde de la probeta, como se indica en la figura 2.36(b). Las fisuras empezaron a aparecer a los 8 días, a una velocidad de crecimiento aproximadamente similar a la de las otras tres probetas. No obstante, con el tiempo la velocidad fue disminuyendo.

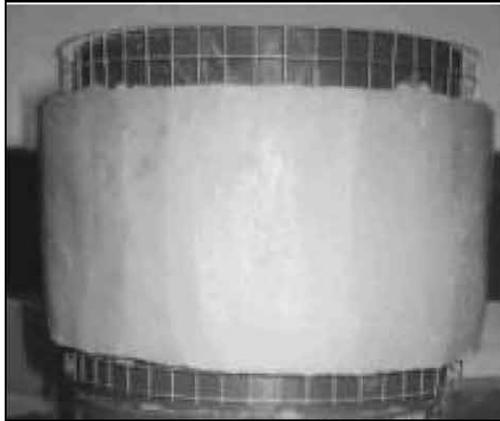


Fig.2.36(a).- Resultado a los 28 días en la probeta de mortero reforzado con malla cuadrada.

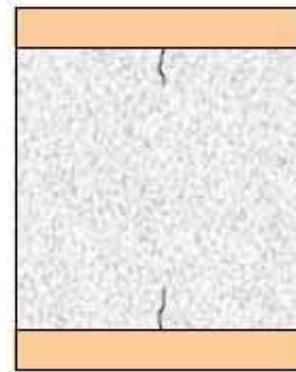


Fig.2.36(b).- Desarrollo de fisuras en la probeta.

De entre las grietas apreciadas, hay una de mayor, que se puede ver en la figura 2.36(c), y luego una serie de grietas muy pequeñas cercanas al borde como las que se muestran en la figura 2.36(d).

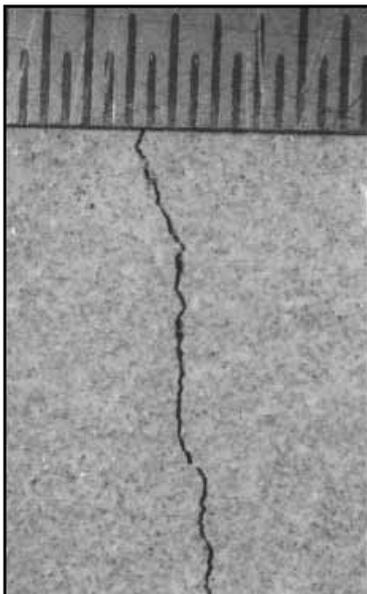
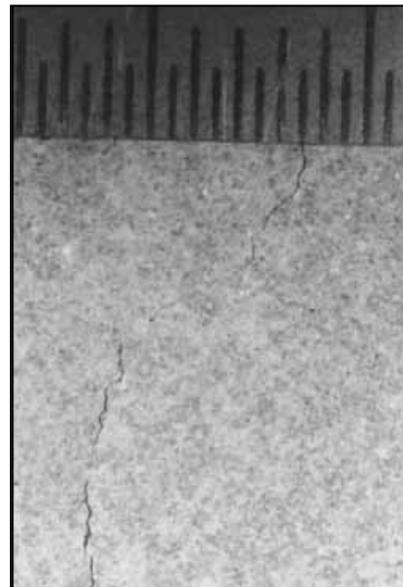


Fig.2.36(c).- Fisura mayor producida en la muestra reforzada con malla cuadrada.



En todos los casos las fisuras empezaron a aparecer en el borde de las probetas propagándose verticalmente hacia al centro debido al contacto rugoso entre el borde de la muestra y el anillo superior del molde anular. Si la fricción en el borde es nula entonces sólo aparecerá una única grieta, en cambio, si el rozamiento es superior a la fuerza necesaria para producir fisuración entonces se producirán más fisuras; esto es lo que ha sucedido en este caso.

#### 2.5.4.- Conclusiones

El ferrocemento, empleado como material para la ejecución de tanques para almacenamiento de agua resulta muy interesante desde el punto de vista de sus propiedades mecánicas, bajo coste y fácil obtención de los materiales componentes así como la posibilidad de ejecución por parte de personal poco cualificado. Sin embargo, las características de estos tanques, de pared delgada, gran superficie en relación con el volumen de material y una relación agua/cemento elevada para facilitar la mezcla y extendido del mortero a mano las hacen unas estructuras muy susceptibles de sufrir retracción, sobretodo en ambientes calurosos.

Se han analizado estas propiedades a partir de esta serie de ensayos en los que se ha podido comprobar precisamente la influencia de las características del refuerzo tanto en la resistencia a tracción del material como en el tamaño de las fisuras:

	Resistencia a tracción (MPa)	Aparición fisuras teórica (días)	Aparición fisuras apreciada (días)	Tamaño fisuras apreciado
Mortero cemento	1,58	10	5	Considerable (1,75mm)
Fibras de polipropileno	-	-	6	Considerable
Malla de gallinero	1,90	11	7	Apreciables
Malla cuadrada	2,29	14	8	Casi imperceptibles

Tabla 2.5.- Cuadro-resumen de los resultados obtenidos de los ensayos.

Se obtiene también de dichos ensayos la conclusión de que de las cuatro muestras, las reforzadas con malla de alambre son las que ofrecen una mejor respuesta. Esto es lógico pues la resistencia del acero (200MPa) es mucho mayor a la que pueden ofrecer las fibras de polipropileno (30-40MPa). Y de entre ellas, la malla cuadrada resultó ser la que mejor responde. En relación a esta última valoración hay que apuntar 3 aspectos:

- Diámetro de alambre: el diámetro de alambre de la malla cuadrada (1mm) es el doble que el de la malla de gallinero (0,5mm) y sin embargo la separación de alambre es menor (12mm frente a los 15mm de la malla de gallinero). Por tanto, en este aspecto es mejor la malla cuadrada que la de gallinero (a igualdad del resto de condiciones) por ofrecer una mayor superficie de contacto con el mortero y por tanto una mejor adherencia.

- Cuantía de armadura ( $A_s$ ): la malla cuadrada tiene  $65,45\text{mm}^2/\text{ml}$  de armadura mientras que la de gallinero sólo  $13,09\text{ mm}^2/\text{ml}$ . Es lógico pues que la muestra con malla cuadrada absorba mejor las tracciones que la que contiene malla de gallinero.
- Distribución de la carga: mientras que en el caso de malla cuadrada la carga se mantiene en su propio plano sin generar distorsiones, en la malla de gallinero no. Así, cuando la malla de gallinero se carga en sentido longitudinal, hay una tendencia a estirarse en el sentido de la carga y a su vez achatarse sobre sí misma. Esto se aprecia claramente en la figura 2.37.

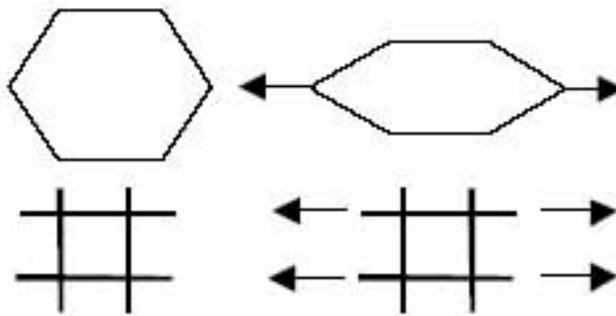


Fig.2.37.- Efecto de la carga de tracción en una malla de alambre.

### 2.5.5.- Recomendaciones

A tenor de lo que se ha dicho, es recomendable pues que en situaciones donde se prevea que la estructura pueda presentar problemas de retracción actuar:

- Aumentando la cantidad de refuerzo.
- Aplicando al tanque un buen curado. Como se ha visto el período en el que empiezan a aparecer fisuras es entre 5 y 8 días. Es pues importante proporcionar al depósito un buen curado durante este período o hasta los 10 días.
- Aumentando el espesor de pared. Como se muestra en la figura 2.6 la retracción disminuye con la distancia a la superficie.

## CAPÍTULO 3

### BASES DE CÁLCULO

#### 3.1.- ANÁLISIS ESTRUCTURAL

La estructura del depósito se puede dividir en tres partes: pared, solera y unión de ambos.

En lo que refiere a la pared o cuerpo del depósito, se trata de una estructura cilíndrica de pequeño espesor (de 2 a 10cm) y una altura variable que dependerá de características como el refuerzo, necesidades, limitaciones del entorno u otros. En general no se sobrepasará los 2,5m y se tenderá a aumentar el radio antes que la altura.

En cuanto a la solera o base del depósito, se trata de una losa circular cuyo espesor será mayor al de la pared sobretodo en la unión para garantizar la no fisuración bajo el esfuerzo de flexión producido por la presión hidrostática.

La unión entre pared y solera es como se puede comprobar en los resultados obtenidos del estudio de la solera (anejo 3) el punto más importante en cuanto al comportamiento del depósito. Es precisamente el carácter de esta unión el que define el tipo de análisis a utilizar para la pared. En función del carácter de la unión tenemos dos posibilidades de análisis:

- **Análisis de la pared considerando una unión en la base no rígida** (fig.3.1). Si las paredes tienen permitido el movimiento en la base todo el empuje hidrostático va a ser resistido por el esfuerzo axial circunferencial en las paredes. En este caso va a ser necesario un sellado impermeable entre paredes y solera para prevenir posibles filtraciones.

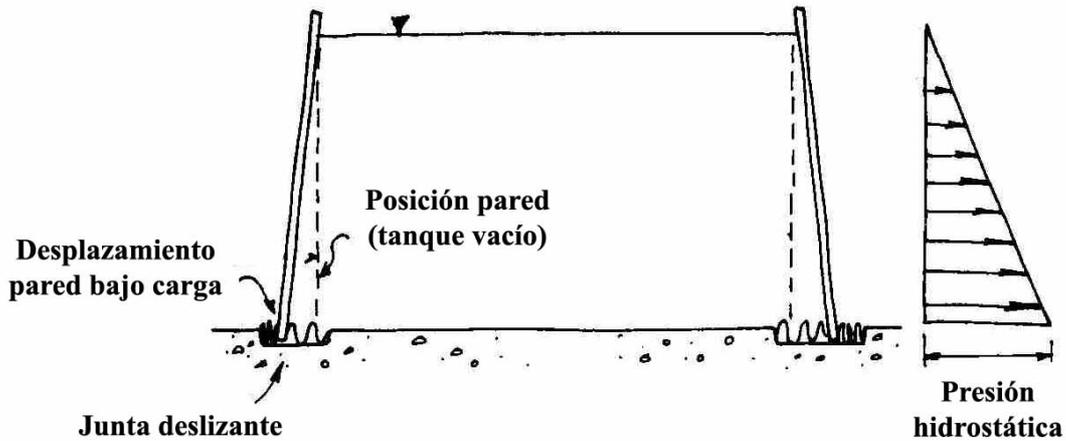


Fig. 3.1.- Pared con unión en la base no rígida.

- **Análisis considerando la unión pared-solera rígida** (fig.3.2). En este caso no existe movimiento relativo posible entre pared y solera. La mayoría de los tanques de ferrocemento, por su relativamente pequeña profundidad y mayor facilidad en la ejecución disponen de una unión continua entre pared y solera. Éste es pues, el tipo de análisis que se ha escogido para el cálculo en este estudio.

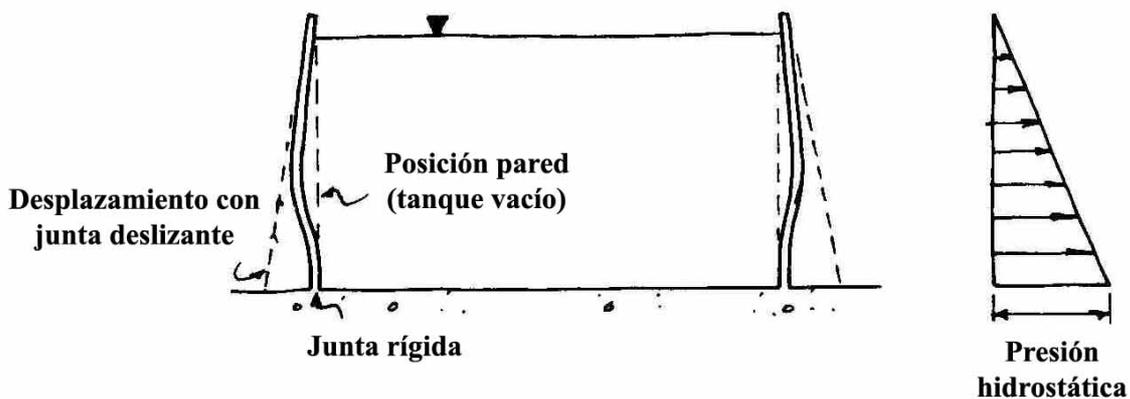


Fig.3.2.- Pared con unión rígida en la base.

De hecho, la unión no va a ser completamente rígida sino más bien semi-rígida, lo cual se traducirá en un cierto giro en la base (ver figura 3.3), proyectando una parte del esfuerzo sobre el refuerzo longitudinal.

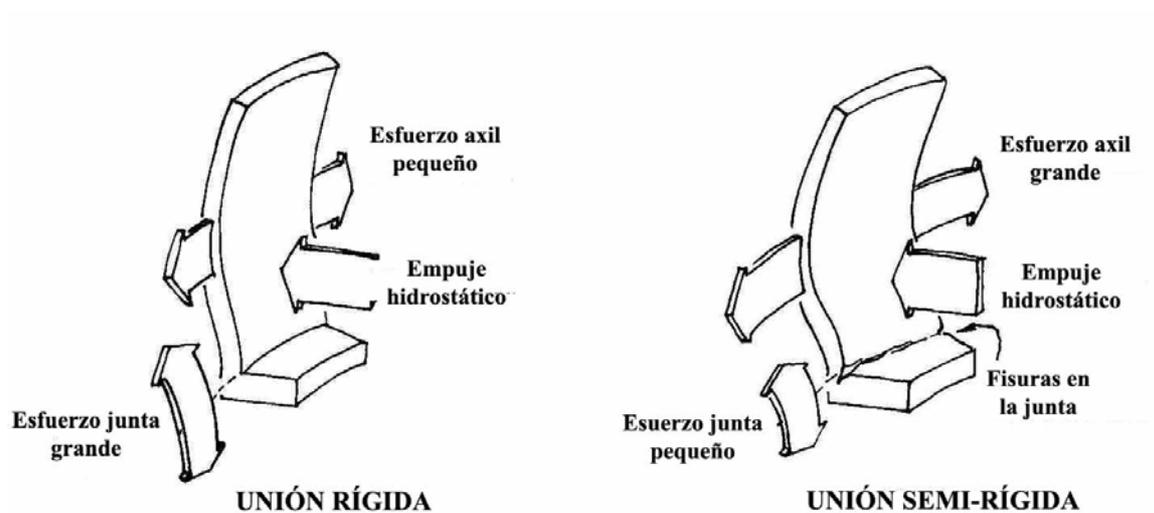


Fig.3.3.- Influencia de la unión pared-solera en la distribución de esfuerzos.

En este aspecto se va a insistir más adelante en el capítulo 5 donde se dimensionará la unión pared-solera a partir del momento flector en la base.

### 3.2.- ANÁLISIS DE LA PARED

#### 3.2.1.- Obtención del refuerzo. Formulación

Dadas las características de nuestro depósito (condiciones de empotramiento en la base, espesor de pared pequeño y extremo superior libre) los esfuerzos predominantes en lo que a la pared refiere serán los de membrana a lo largo de toda la altura (esfuerzo axial de tracción en sentido longitudinal,  $N_\phi$ ) y de flexión ( $M_x$ ) y cortante ( $Q_x$ ) en el empotramiento (en la base de la pared).

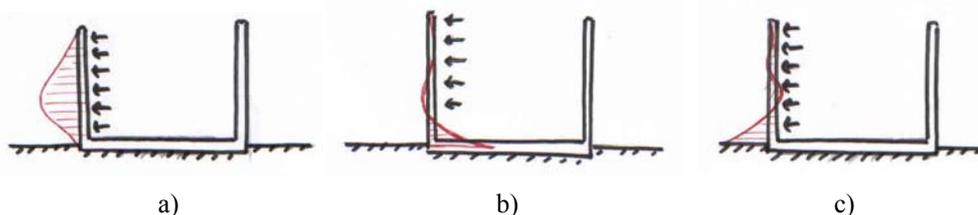


Fig.3.4.- Leyes de esfuerzos de un depósito sometido a la carga hidrostática del agua.  
 a) Esfuerzo axial      b) Momento flector      c) Esfuerzo cortante

Sin embargo, el esfuerzo condicionante en el dimensionamiento es el axial de tracción longitudinal. Pues tanto la flexión como el cortante adquieren importancia a nivel de la unión

pared-solera, que más adelante se comprobará debidamente, pero no a lo largo de la pared en altura.

Así pues, en la formulación que sigue a continuación, se estudiará el dimensionamiento de la pared a partir del esfuerzo axial de tracción  $N_\varphi$  ( $N_k$  en la formulación por tratarse de un valor característico en servicio) considerando condiciones de contorno de empotramiento en la base y extremo superior libre.

Los criterios posibles para el dimensionamiento de la pared son:

- Estado Límite de Fisuración.
- Estado Límite de Agotamiento por solicitaciones normales.
- Consideración de la fracción de volumen ( $V_f$ ) y la superficie específica del refuerzo ( $S_r$ ).

### 3.2.1.1.- Estado Límite de Fisuración

Planteando el equilibrio entre tensiones y fuerzas exteriores horizontales,

$$N_k = A_c \cdot f_{ct,m} + A_s \cdot \sigma_s \quad (3.1)$$

Donde:

- $A_c$  Área de la sección de pared.
- $f_{ct,m}$  Resistencia media a tracción del mortero.
- $A_s$  Área de la sección de armadura a tracción.
- $\sigma_s$  Tensión en servicio de la armadura pasiva.
- $N_k$  Máximo axial posible de la estructura (valor para el que se dimensionará el tanque).

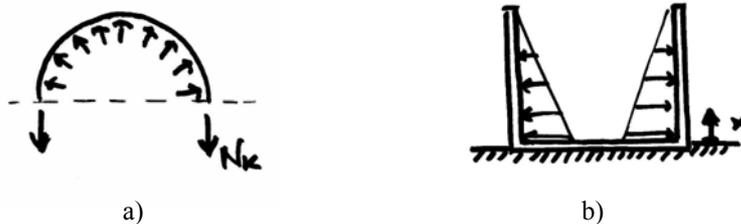


Fig. 3.5.- Secciones tipo de un tanque circular sometido a carga hidrostática:  
a) Sección circumferencial o longitudinal      b) Sección transversal

Conviene destacar que por el hecho de dimensionar la estructura según el Estado Límite de Servicio los valores que se tomarán para las acciones serán característicos (sin mayorar).

El valor máximo del axil  $N_k$  se puede obtener de acuerdo con la expresión formulada por Florencio Del Pozo

$$N_{kmax} = \gamma \cdot R \cdot H \cdot k \tag{3.2}$$

que depende de los parámetros geométricos del depósito y del factor  $k$ , que se puede obtener de la figura 3.6 o de la tabla 3.1 y en la que tal como se aprecia en la figura 3.6:

- $\gamma$     Peso específico del líquido.
- $R$     Radio del depósito.
- $H$     Altura del depósito.
- $e$     Espesor de pared del depósito.
- $\nu$     Coeficiente de Poisson

$$\beta = \frac{\sqrt[4]{3 \cdot (1 - \nu^2)}}{\sqrt{R \cdot e}} \text{ es una constante del depósito.}$$

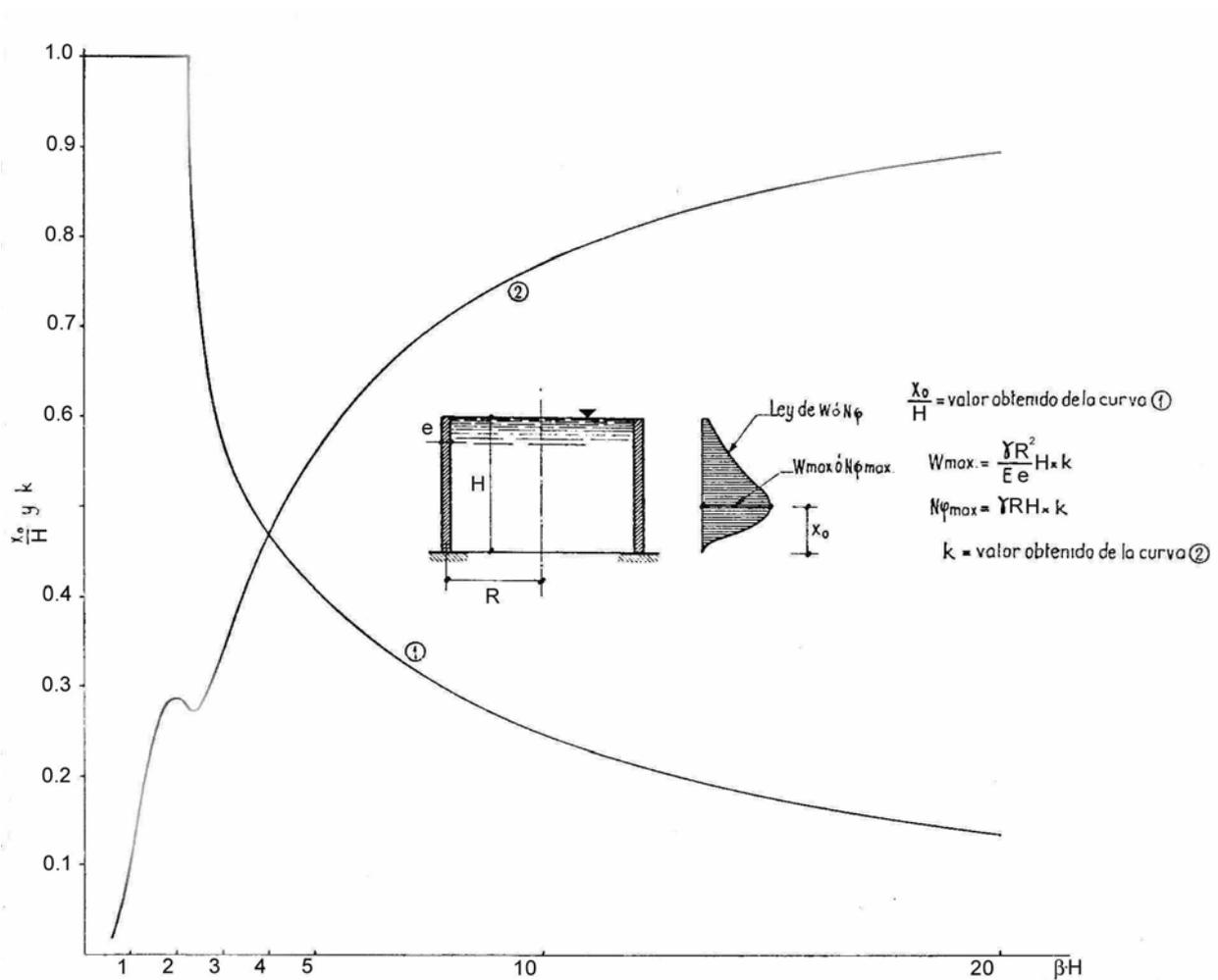


Fig.3.6.- Ábaco de cálculo del axil en servicio  $N_k$  máximo.

		VALORES DE x/H												
		0	0.05	0.10	0.15	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80	0.90	1.00
VALORES β·H	0.6	0	0.0001	0.0004	0.0008	0.0014	0.0028	0.0045	0.0064	0.0084	0.0104	0.0124	0.0145	0.0166
	0.8	0	0.0003	0.0011	0.0024	0.0040	0.0082	0.0132	0.0186	0.0244	0.0302	0.0361	0.0421	0.0480
	1.0	0	0.0006	0.0024	0.0052	0.0087	0.0176	0.0281	0.0395	0.0514	0.0634	0.0754	0.0875	0.0995
	1.2	0	0.0011	0.0043	0.0091	0.0152	0.0303	0.0478	0.0665	0.0856	0.1047	0.1237	0.1425	0.1613
	1.4	0	0.0018	0.0056	0.0138	0.0229	0.0499	0.0697	0.0954	0.1210	0.1459	0.1702	0.1941	0.2178
	1.6	0	0.0025	0.0092	0.0192	0.0316	0.0607	0.0922	0.1236	0.1534	0.1814	0.2078	0.2333	0.2585
	1.8	0	0.0034	0.0124	0.0255	0.0414	0.0778	0.1155	0.1508	0.1824	0.2101	0.2348	0.2579	0.2804
	2.0	0	0.0044	0.0161	0.0328	0.0528	0.0970	0.1403	0.1781	0.2090	0.2332	0.2527	0.2694	0.2853
	2.2	0	0.0057	0.0205	0.0414	0.0661	0.1187	0.1674	0.2066	0.2346	0.2527	0.2636	0.2706	0.2764
	2.4	0	0.0072	0.0257	0.0514	0.0813	0.1431	0.1972	0.2366	0.2600	0.2696	0.2695	0.2642	0.2571
	2.6	0	0.0089	0.0315	0.0628	0.0983	0.1701	0.2292	0.2680	0.2854	0.2849	0.2719	0.2523	0.2306
	2.8	0	0.0108	0.0381	0.0753	0.1170	0.1990	0.2629	0.3001	0.3105	0.2987	0.2718	0.2370	0.1998
	3.0	0	0.0129	0.0452	0.0887	0.1370	0.2292	0.2973	0.3322	0.3346	0.3110	0.2699	0.2199	0.1671
	3.2	0	0.0152	0.0528	0.1030	0.1578	0.2601	0.3316	0.3632	0.3571	0.3215	0.2668	0.2023	0.1348
	3.4	0	0.0176	0.0608	0.1178	0.1792	0.2910	0.3650	0.3924	0.3774	0.3303	0.2628	0.1852	0.1046
	3.6	0	0.0201	0.0692	0.1330	0.2010	0.3214	0.3967	0.4191	0.3951	0.3371	0.2581	0.1693	0.0775
	3.8	0	0.0228	0.0778	0.1486	0.2229	0.3511	0.4265	0.4430	0.4099	0.3419	0.2532	0.1550	0.0542
	4.0	0	0.0256	0.0867	0.1645	0.2449	0.3799	0.4541	0.4640	0.4219	0.3448	0.2480	0.1426	0.0349
	4.2	0	0.0285	0.0959	0.1806	0.2669	0.4075	0.4794	0.4819	0.4310	0.3459	0.2427	0.1321	0.0197
	4.4	0	0.0315	0.1053	0.1969	0.2888	0.4340	0.5024	0.4971	0.4377	0.3456	0.2375	0.1234	0.0081
4.6	0	0.0346	0.1150	0.2134	0.3106	0.4593	0.5232	0.5096	0.4421	0.3441	0.2324	0.1164	-0.0003	
4.8	0	0.0379	0.1249	0.2300	0.3322	0.4835	0.5419	0.5197	0.4445	0.3416	0.2276	0.1109	-0.0060	
5.0	0	0.0413	0.1351	0.2468	0.3537	0.5065	0.5586	0.5277	0.4454	0.3383	0.2230	0.1066	-0.0095	
5.5	0	0.0502	0.1614	0.2893	0.4063	0.5587	0.5923	0.5399	0.4424	0.3287	0.2132	0.1001	-0.0116	
6.0	0	0.0598	0.1888	0.3319	0.4569	0.6034	0.6160	0.5438	0.4352	0.3189	0.2061	0.0976	-0.0090	
7.0	0	0.0809	0.2460	0.4157	0.5498	0.6712	0.6398	0.5374	0.4186	0.3050	0.1991	0.0977	-0.0024	
8.0	0	0.1042	0.3049	0.4952	0.6293	0.7133	0.6428	0.5241	0.4064	0.2991	0.1981	0.0991	0.0003	
9.0	0	0.1293	0.3642	0.5684	0.6945	0.7352	0.6353	0.5120	0.4002	0.2981	0.1990	0.0999	0.0004	
10.0	0	0.1560	0.4226	0.6339	0.7456	0.7430	0.6244	0.5039	0.3982	0.2988	0.1997	0.1001	0.0001	
12.0	0	0.2130	0.5335	0.7400	0.8107	0.7356	0.6068	0.4983	0.3990	0.2999	0.2001	0.1000	0	
14.0	0	0.2731	0.6324	0.8137	0.8384	0.7195	0.5993	0.4988	0.3999	0.3001	0.2000	0.1000	0	
16.0	0	0.3348	0.7167	0.8594	0.8429	0.7070	0.5982	0.4997	0.4001	0.3000	0.2000	0.1000	0	
18.0	0	0.3965	0.7855	0.8836	0.8359	0.7004	0.5990	0.5001	0.4000	0.3000	0.2000	0.1000	0	
20.0	0	0.4572	0.8394	0.8926	0.8251	0.6983	0.5997	0.5001	0.4000	0.3000	0.2000	0.1000	0	

Tabla 3.1.- Valores del coeficiente k en función de las características del depósito.

Desarrollando la expresión (3.1) resulta

$$N_k = A_c \cdot f_{ct,m} + A_s \cdot \sigma_s = A_c \cdot f_{ct,m} + A_s \cdot E_s \cdot \varepsilon_s$$

y aplicando la hipótesis de adherencia ( $\varepsilon_s = \varepsilon_c = \varepsilon_{\text{fisuración}}$ ):

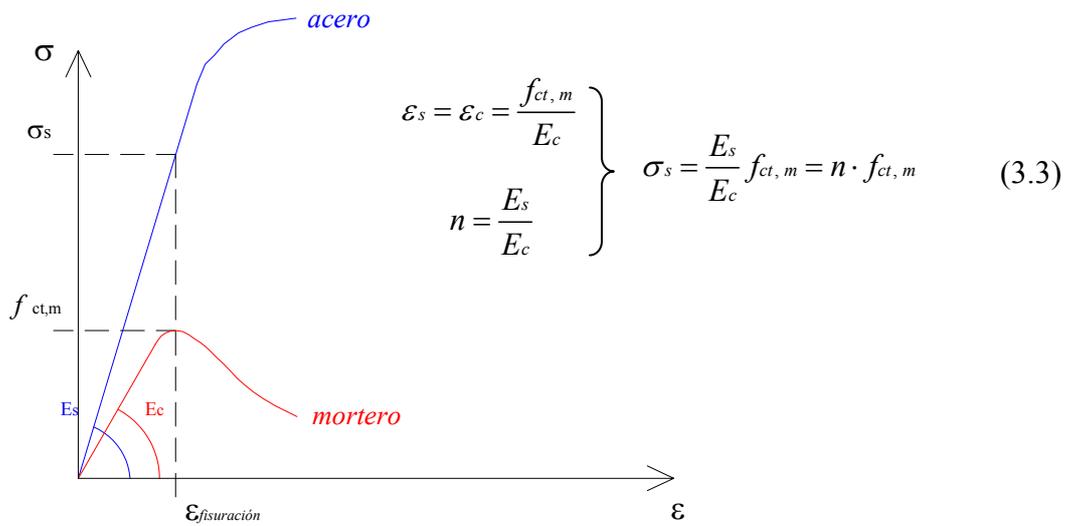


Fig.3.7.- Diagramas tensión-deformación del acero y del mortero respectivamente.

De la expresión (3.3) se obtiene:

$$N_k = A_c \cdot f_{ct,m} + A_s \cdot E_s \cdot \frac{f_{ct,m}}{E_c} = A_c \cdot f_{ct,m} + A_s \cdot n \cdot f_{ct,m} = f_{ct,m} \cdot (A_c + A_s \cdot n)$$

donde  $n$  es el coeficiente de equivalencia entre mortero y acero. Dicho de otra forma,

$$\frac{N_k}{f_{ct,m}} = A_c + n \cdot A_s \tag{3.4}$$

$$\frac{N_k}{f_{ct,m}} = e \cdot 1000 + n \cdot A_s$$

$$\boxed{\frac{N_k(N/ml)}{1000 \cdot f_{ct,m}(MPa)} = e(mm) + \frac{n}{1000} \cdot A_s(mm^2/ml)} \quad (3.5)$$

expresión para la que sólo tenemos dos variables:  $A_s$  i  $e$

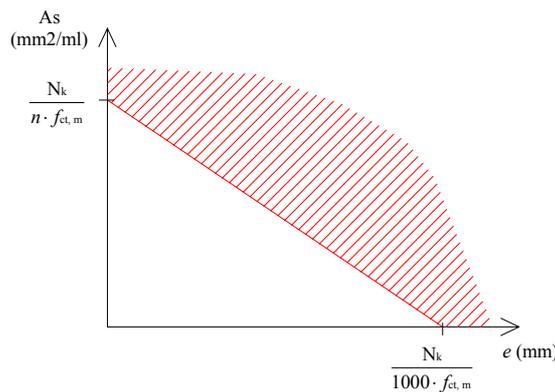


Fig.3.8.- Dominio de cálculo para la expresión (3.5).

Con todo, la deformación experimentada por el conjunto mortero-acero, será aproximadamente,

$$\epsilon_{pared} = \frac{f_{ct,m}}{E_c} = \frac{n \cdot f_{ct,m}}{E_s} \quad (3.6)$$

y suponiendo un coeficiente de equivalencia de 7 y utilizando para el mortero el valor medio de la resistencia a tracción obtenido en el ensayo de laboratorio (capítulo 2)  $f_{ct,m}=1,60MPa.$ ,

$$\epsilon_{pared} = \frac{7 \cdot 1,60}{2,1 \cdot 10^5} = 5 \cdot 10^{-5}$$

Este valor de deformación, de acuerdo con los valores de abertura de fisura establecidos por Walkus (1970) correspondientes a diferentes valores de deformación

$$\begin{array}{ll} \omega \leq 20 \mu m & 20 \leq \omega \leq 100 \mu m \\ \epsilon = 2 \cdot 10^{-4} & \epsilon = 6,45 \cdot 10^{-3} \end{array} \quad (3.7)$$

nos garantiza que se cumplirá el límite normativo establecido para la abertura de fisura, que para depósitos de agua de ferrocemento es de  $\omega \leq 50 \mu\text{m}$ .

No obstante, esta deformación ha sido obtenida de forma muy directa y un poco grosera. Más adelante, se hará una comprobación más fiable de la abertura de fisura, pues en realidad ésta depende de más parámetros y no exclusivamente de la deformación circunferencial.

3.2.1.2.- Estado Límite de Agotamiento por solicitaciones normales

Planteando el Estado Límite Último, el mortero ya está fisurado y el acero soporta todas las tracciones, así la expresión anterior toma la forma:

$$N_d = A_s \cdot f_{yd} \tag{3.8}$$

O también,

$$A_s = \frac{N_d}{f_{yd}} = \frac{N_d}{f_{yk}/\gamma_s} \tag{3.9}$$

Se ha planteado un modelo de cálculo para el ferrocemento en ELU basado en la curva tensión-deformación del hormigón y a partir de los resultados obtenidos de los ensayos.

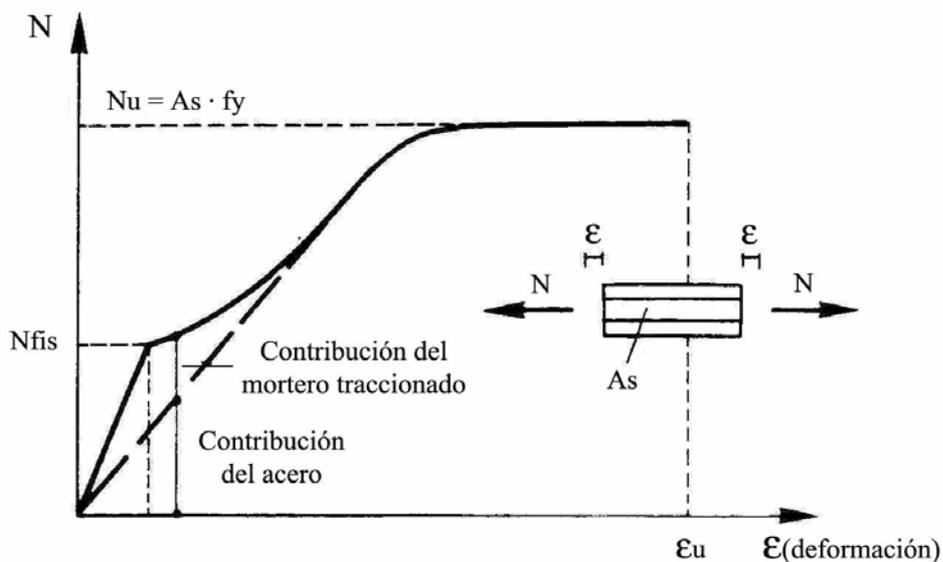


Figura 3.9.- Modelo de respuesta de un elemento de ferrocemento a tracción.

Uno puede así, obtener la respuesta que cabe esperar del material en ELU. A continuación se ofrecen los puntos notables de esta gráfica basados en dos tipos de malla de diferentes cuantías que se han estudiado.

	$A_s$ (mm <sup>2</sup> /ml)	$V_f$ (%)	$E_{fc}$ (GPa)	$N_{fis}$ (kN)	$N_u$ (kN)	$\sigma_u = N_u/A_c$ (MPa)	$\epsilon_u = \sigma_u/E_{fc}$
Malla de gallinero	13,09	0,05	3,61	<b>1,98</b>	<b>2,38</b>	1,90	<b><math>5,3 \cdot 10^{-4}</math></b>
Malla cuadrada	65,45	0,26	4,05	<b>1,98</b>	<b>2,87</b>	2,29	<b><math>5,7 \cdot 10^{-4}</math></b>

Tabla 3.2.- Valores de la resistencia a tracción obtenidos para los dos modelos de refuerzo estudiados.

Donde

- $V_f$  Es la fracción de volumen del refuerzo, que se define en el siguiente apartado.
- $E_{fc}$  Módulo de deformación resultante de considerar la fracción de volumen del refuerzo según la expresión  $E_{fc} = E_b + E_a \cdot V_f$  utilizada por Wainshtok (1998) para elementos de ferrocemento, en la que los módulos del mortero ( $E_b$ ) i acero ( $E_a$ ) adoptados han sido 3,5 i 210GPa, respectivamente.
- $N_u$  Carga última de tracción experimentada en el ensayo.
- $A_c$  Sección de la probeta de dimensiones 50x25mm.
- $\epsilon_u$  Es la deformación última del acero.
- $N_{fis}$  Carga de fisuración del mortero,  $N_{fis} = A_c \cdot f_{ct,m}$ .

Hay que remarcar tres consideraciones que se han tenido en cuenta en la obtención de este modelo:

- Por un lado, se ha considerado que la parte de la carga soportada por el acero (suponemos adherencia) antes de la fisuración es lo bastante pequeña como para poderla despreciar.
- Dado que en el ensayo no se midieron las deformaciones experimentadas por las probetas se ha obtenido la tensión de rotura a partir del módulo de  $E_{fc}$ , a pesar de que el modelo como se puede apreciar en la figura no es lineal.
- Este modelo se ha obtenido de ensayos basados en probetas con una única malla. Esto no reproduce fielmente lo que sucede al agrupar diversas mallas por el “efecto de grupo” que se produce.

De todas maneras, el Estado Límite Último refleja una situación de agotamiento de la pieza; los resultados aquí presentados corresponden a un ensayo de tipo destructivo. Esta situación es mucho menos condicionante en cuanto a armadura, pues  $f_{yk}$  toma usualmente valores superiores a los 400MPa, valor muy superior al de la tensión que toma la armadura en servicio al suponer la condición de adherencia. Además, esta situación en nuestro contexto no tiene demasiado sentido, pues lo que interesa es que no se produzcan fisuras y así evitar filtraciones.

### 3.2.1.3.- Consideración de la fracción de volumen y la superficie específica del refuerzo

Por lo que refiere al ferrocemento, existen unos parámetros de control que garantizan el comportamiento del material como tal. Por un lado, la fracción volumétrica del refuerzo ( $V_f$ ): es el volumen total de refuerzo dividido por el volumen de material (mortero y acero). Se mide en tanto por ciento.

$$V_f = \frac{\text{Volumen de refuerzo}}{\text{Volumen de ferrocemento}} \quad (3.10)$$

En el caso de que se disponga de malla rectangular o cuadrada el Comité 549 de la ACI (1993) propone una expresión simplificada que permite obtener la fracción:

$$V_f = \frac{N \cdot \pi \cdot \phi^2}{4 \cdot e} \left( \frac{1}{d_l} + \frac{1}{d_t} \right) \quad (3.11)$$

En la cual:

- N Número de mallas.
- $\phi$  Diámetro de alambre de la malla.
- $d_l$  Abertura de malla (separación de alambres) en sentido longitudinal.
- $d_t$  Abertura de malla (separación de alambres) en sentido transversal.
- $e$  Espesor de pared.

En caso de malla hexagonal o de gallinero, la fracción real puede variar ligeramente de la calculada mediante esta expresión. Por que refiere al esqueleto de refuerzo (en caso de que lo tenga), SÍ se contabiliza en la fracción volumétrica.

Por otro lado también se utiliza la superficie específica del refuerzo ( $S_r$ ): se mide como el área de refuerzo en contacto con el mortero dividida por el volumen total de ferrocemento. Para el caso de malla cuadrada, la relación entre  $S_r$  y  $V_f$  usada según (ACI C-449, 1993) es:

$$S_r = \frac{4 \cdot V_f}{\phi} \quad (3.12)$$

Se ha visto que a falta de cálculos precisos, para malla hexagonal esta expresión se aproxima suficientemente bien al valor real.

En el cálculo de la superficie específica no se contabiliza (en caso de que lo tenga) la correspondiente al esqueleto de refuerzo, pues se considera que su función es exclusivamente la de rigidizar el conjunto.

Existen diferentes organismos, agrupaciones que se han pronunciado en relación a estos dos parámetros. De entre ellos y tal vez el más conocido, la ACI a través de su Comité 549. Cabe comentar que tal y cómo señalan varios autores estos valores han sido fijados arbitrariamente, y en algunos casos se trata de valores sobradamente del lado de la seguridad. De hecho, los valores mínimo de cuantía de armadura establecidos por la ACI son difícilmente asumibles, para una pared delgada como la del depósito que se plantea. En la tabla 3.3 se muestran los valores establecidos para  $V_{fL}$ ,  $V_{fT}$ ,  $S_{rL}$  y  $S_{rT}$  que son respectivamente las fracciones de volumen y superficies específicas longitudinal y transversal respectivamente.

Otras directivas son las que se establecieron en la *IV Conferencia Latinoamericana sobre Ferrocemento* en la cual se reducían prácticamente a la mitad  $V_f$  y  $S_r$  (Llanes, 2003).

Otros valores son los logrados por el Grupo de San Carlos (Hanai, 1987), que han trabajado con valores aún inferiores llegando a superficies específicas de  $0,035\text{mm}^{-1}$  a resultados satisfactorios con cantidades de acero del orden de 200-300 kg/m<sup>3</sup> de mortero ( $V_f$  entre 2 y 3,5%), llamando a este material mortero armado, aunque lo consideran como un sinónimo de ferrocemento.

Parámetro	ACI Committee 549		IV Conferencia Latinoamericana sobre Ferrocemento
$V_{fL}$ (%)	1,8	3,6	1,8
$V_{fT}$ (%)	1,8		
$S_{rL}$ (mm <sup>-1</sup> )	0,08	0,16	0,05
$S_{rT}$ (mm <sup>-1</sup> )	0,08		

Tabla 3.3.- Valores mínimos establecidos para la fracción de volumen y la superficie específica.

Tienen sentido estas discrepancias entre directivas establecidas por organismos norteamericanos y suramericanos pues el hecho de reducir la cuantía puede reducir ostensiblemente el coste de la estructura, y esto es lo que se persigue precisamente en el segundo caso.

En el caso planteado, la línea a seguir sin duda dado que la mayoría de tanques que se prevé que seguirán este trabajo serán en Sudamérica, será la segunda.

En términos de cuantía de armadura y espesor de pared, esto se traducirá en

$$V_f = \frac{V_s}{V_c} = \frac{2 \cdot A_s \left( \frac{\text{mm}^2}{\text{ml}} \right)}{e(\text{mm}) \cdot 1000} \geq 0,018 \quad ; \quad \boxed{A_s \left( \frac{\text{mm}^2}{\text{ml}} \right) \geq 9 \cdot e(\text{mm})} \quad (3.13)$$

Por lo que refiere a la superficie específica se tiene que

$$S_r = \frac{\left( \left( \frac{1}{d_i} + \frac{1}{d_t} \right) \cdot \pi \cdot \phi \cdot 1000 \right) \cdot N \cdot 1000}{1000 \cdot e \cdot 1000} \geq 0,05$$

luego, suponiendo una misma abertura de malla  $d$  en ambos sentidos

$$S_r = \frac{2 \cdot \frac{N \cdot \pi \cdot \phi}{d}}{e} = \frac{A_{smalla}}{125 \cdot \phi \cdot e}$$

$$\frac{A_{smalla} \left( \frac{mm^2}{ml} \right)}{125 \cdot \phi (mm) \cdot e (mm)} \geq 0,05 \frac{mm^2}{mm^3} ; \quad \boxed{A_{smalla} \left( \frac{mm^2}{ml} \right) \geq 6,25 \cdot \phi (mm) \cdot e (mm)} \quad (3.14)$$

Las expresiones anteriores son comparables en el caso que no se disponga esqueleto de refuerzo. No obstante, para valores habituales de diámetro de malla (hasta 1,44mm) es más condicionante (3.13) que (3.14). Así la expresión que usaremos para el dimensionamiento será la (3.13) que es válida en todos los casos, hasta en presencia de esqueleto.

### 3.2.2.- Obtención del refuerzo. Solución del sistema

En el estudio de estas estructuras se ha apreciado un fenómeno: la tecnología del ferrocemento tal y cómo se define el material, según las recomendaciones establecidas en la tabla 3.3 exige unas cantidades de armadura y una distribución de ésta a lo largo del espesor que sólo son asumibles en el caso de que la única armadura sea a base de malla de alambre. Esta situación tiene un límite, por decirlo así, y es que a partir de un cierto axil y por tanto de una cierta cantidad de armadura no tiene sentido disponer únicamente mallas de alambre, pues se llegará a un punto en que ni tan sólo se podrá embeber la malla en el mortero.

El criterio que en este caso se ha seguido ha sido el de tomar 4 mallas como límite para una pared de ferrocemento. Para mayor cantidad de armadura habrá que disponer una malla electrosoldada incumpléndose por tanto las condiciones establecidas para considerar un material como ferrocemento. Se trata en este caso pues, por decirlo de alguna manera de *mortero armado*.

#### Estructura de ferrocemento

Éste suele ser el caso de estructuras armadas con mallas de gallinero (depósitos pequeños).

A través de las expresiones (3.5) y (3.13) se ha determinado el dominio de cálculo para el cual habría que moverse, a efectos de cumplir por un lado el comportamiento del material (3.5) y por el otro las características de refuerzo propias del ferrocemento (3.13).

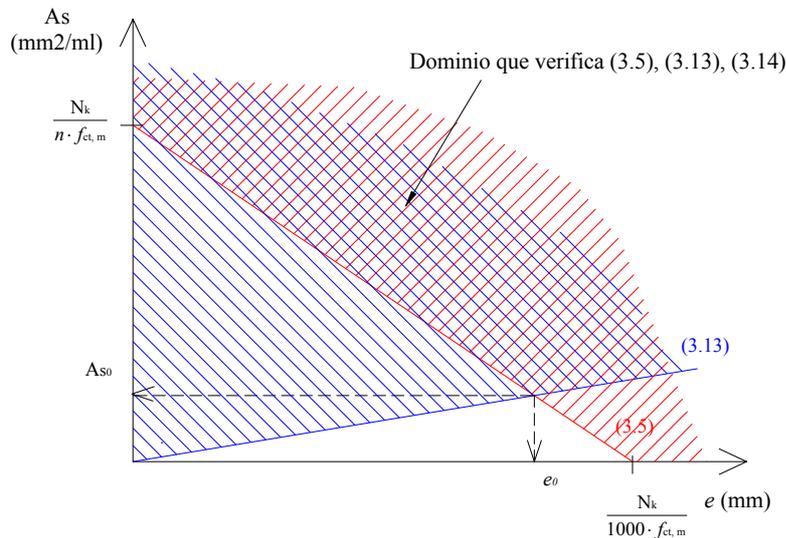


Fig.3.10.- Dominio de cálculo de las expresiones (3.5), (3.13),(3.14).

Se puede observar que el dominio que verifica (3.5), (3.13) y (3.14) es el mismo que el que verifica (3.5) y (3.13), pues como se ha explicado antes para valores habituales de  $\phi$  (3.13) es más condicionante que (3.14).

La intersección entre (3.5) y (3.13) es

$$\begin{aligned}
 e_o(mm) &= \frac{N_k(N/ml)}{f_{ct,m}(MPa) \cdot (9 \cdot n + 1000)} \\
 A_{so}(mm^2/ml) &= \frac{9 \cdot N_k(N/ml)}{f_{ct,m}(MPa) \cdot (9 \cdot n + 1000)} \tag{3.15}
 \end{aligned}$$

Ahora bien, este par de valores no necesariamente serán la solución a tomar. De hecho, lo que da es la relación  $A_s$ - $e$  que proporciona el mínimo de armadura atendiendo a criterios resistentes (3.5) y normativos (3.13). Interesa no disponer más acero del necesario para garantizar una buena adherencia entre mortero y acero.

La idea es lograr espesores pequeños que representen un ahorro de material (un  $\Delta e$  de 3cm puede duplicar la armadura necesaria). Pero por otro lado, si esto hace aumentar la cantidad de armadura, entonces no habrá suficiente espacio para dispersar ésta y por

consiguiente, tendremos problemas de adherencia. Por esto hace falta el punto de mínima armadura posible.

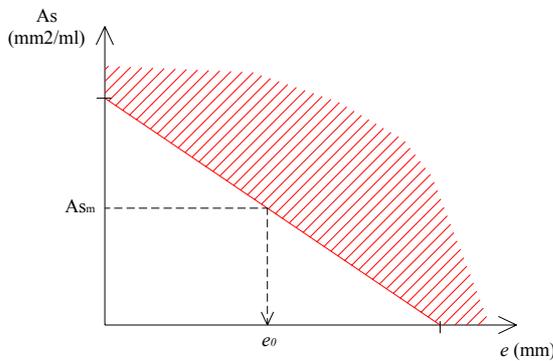
Una vez obtenido el espesor necesario para resistir se tendrá en cuenta el correspondiente aumento de éste por defectos de ejecución.

Estructura de mortero armado

Éste suele ser el caso de estructuras con malla electrosoldada (depósitos medianos y grandes).

Se ha determinado por ahora la solución a tomar para las expresiones (3.15), (3.13) y (3.14). Ahora bien, ¿qué ocurre si resulta que el material no verifica las condiciones de ferrocemento (3.13) y (3.14)? Esto puede suceder en el caso que nos encontremos delante de una solución mixta, con el denominado “mortero armado”. Entonces no tiene sentido la solución determinada antes y sólo es válida la expresión (3.5).

En este caso pues, según esto, sólo disponemos de una ecuación (3.5) y dos incógnitas ( $A_{sm}$ ,  $e_0$ ), o una incógnita y un parámetro según se mire, ya que si por alguna condición es posible determinar la armadura, automáticamente obtenemos el espesor mínimo neto correspondiente.



$$\frac{N_k}{1000 \cdot f_{ct,m}} = e_0 + \frac{n}{1000} \cdot A_{sm} \quad (3.16)$$

De esta manera se obtienen pares de soluciones ( $A_{sm}$ ,  $e_0$ ).

Fig.3.11.- Proceso de cálculo en el caso de una estructura de mortero armado.

Donde

- $A_{sm}$  Sección de acero correspondiente al conjunto de mallas de alambre.
- $e_0$  Espesor correspondiente al pre-dimensionamiento de la pared.

En el caso que se proceda al dimensionamiento según esta formulación, se seguirá manteniendo  $As_0$  como armadura correspondiente al pre-dimensionamiento siendo entonces

$A_{s0}-A_{sm}$  el valor de armadura correspondiente a refuerzo adicional que podamos añadir para rigidizar el conjunto (electromalla o longitudinal).

Cabe decir también que en este caso la variable  $e_0$  *se trata en realidad de un espesor ficticio* de ferrocemento, pues no incluye la parte correspondiente a la electromalla. De hecho, es un indicador del espacio a lo largo del cual habría que disponer las mallas.

### 3.2.3.- Recubrimiento. Espesor de pared

Tal como cita Llanes (2003), el mínimo neto recomendado para el refuerzo de piezas de ferrocemento es de 3mm, en el caso de un ambiente agresivo o depósito de agua el recubrimiento que se recomienda es de 5mm y en el caso de disponer de armaduras con barras y mallas de alambre, unos 8mm. Uno de éstos será según corresponda, el espacio que dejaremos libre entre la primera capa de refuerzo y el exterior.

Hay que tener en cuenta también que por los medios de ejecución empleados es posible que se den ciertas irregularidades, por esto se opta por disponer una capa adicional de regularización  $\Delta e$ .

Así, el espesor definitivo resultante, será  $e = e_0 + \Delta e$ , donde  $e_0$  es el espesor obtenido por el cálculo anteriormente.

### 3.2.4.- Comprobaciones a fisuración

#### 3.2.4.1.- Resistencia al agrietamiento en tracción

En realidad, el ferrocemento debido a la gran dispersión del acero en el mortero soporta una mayor resistencia a tracción y por consiguiente el material resiste mejor la fisuración.

En tracción directa, la resistencia a la aparición de fisuras, se incrementa desde un límite inferior correspondiente a la resistencia del mortero hasta valores mayores proporcionales a la superficie específica del refuerzo en la dirección cargada como recogen Wainshtok (1998) i Llanes (2003).

$$\sigma_{fis} = K \cdot S_{rL} + R_b \quad (3.17)$$

Donde:

- K Coeficiente que depende de diversos factores, entre otros el árido utilizado, el curado, el tipo de malla y su orientación, el tipo de solidificación, etc. De no disponer de otros valores se recomienda tomar  $K=20$  para tracción directa.

- $S_{rL}$  Superficie específica de la zona traccionada en la dirección longitudinal, que en la fórmula anterior se aplica en  $\text{mm}^{-1}$ .
- $R_b$  Resistencia a la tracción directa del mortero en MPa.

### 3.2.4.2.- Resistencia a flexión

#### Momento flector de cálculo

El momento flector de cálculo para un depósito empotrado en el borde inferior vendrá dado por la expresión

$$M_x = \frac{\gamma \cdot R \cdot e \cdot H}{2 \cdot \sqrt{3 \cdot (1 - \nu^2)}} \cdot k_1 \quad (3.18)$$

para la cual,

- $\gamma$  Peso específico del líquido.  
 $R$  Radio del depósito.  
 $H$  Altura del depósito.  
 $e$  Espesor de pared del depósito.  
 $\nu$  Coeficiente de Poisson  
 $\beta = \frac{\sqrt[4]{3 \cdot (1 - \nu^2)}}{\sqrt{R \cdot e}}$  es una constante del depósito.  
 $k_1$  coeficiente que se obtiene de la tabla 3.4.

		VALORES DE X/H												
		0	0.05	0.10	0.15	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80	0.90	1.00
VALORES DE $\beta \cdot H$	0.6	0.1164	0.0996	0.0844	0.0709	0.0589	0.0391	0.0243	0.0138	0.0069	0.0028	0.0007	0.0001	0
	0.8	0.1949	0.1658	0.1397	0.1165	0.0960	0.0624	0.0377	0.0206	0.0095	0.0033	0.0006	-0.0001	0
	1.0	0.2732	0.2299	0.1914	0.1573	0.1274	0.0793	0.0448	0.0218	0.0080	0.0011	-0.0010	-0.0006	0
	1.2	0.3376	0.2792	0.2276	0.1825	0.1435	0.0819	0.0396	0.0132	-0.0007	-0.0055	-0.0047	-0.0018	0
	1.4	0.3848	0.3108	0.2461	0.1901	0.1423	0.0690	0.0213	-0.0055	-0.0165	-0.0166	-0.0106	-0.0035	0
	1.6	0.4210	0.3306	0.2522	0.1853	0.1290	0.0450	-0.0062	-0.0314	-0.0374	-0.0307	-0.0179	-0.0055	0
	1.8	0.4535	0.3455	0.2528	0.1746	0.1096	0.0155	-0.0383	-0.0606	-0.0604	-0.0460	-0.0258	-0.0078	0
	2.0	0.4864	0.3599	0.2522	0.1622	0.0885	-0.0154	-0.0711	-0.0900	-0.0831	-0.0609	-0.0333	-0.0099	0
	2.2	0.5209	0.3749	0.2518	0.1499	0.0676	-0.0456	-0.1025	-0.1174	-0.1038	-0.0742	-0.0399	-0.0117	0
	2.4	0.5560	0.3902	0.2516	0.1381	0.0476	-0.0737	-0.1307	-0.1412	-0.1211	-0.0848	-0.0450	-0.0130	0
	2.6	0.5904	0.4048	0.2510	0.1265	0.0285	-0.0991	-0.1549	-0.1603	-0.1341	-0.0923	-0.0482	-0.0138	0
	2.8	0.6227	0.4176	0.2492	0.1146	0.0103	-0.1215	-0.1745	-0.1743	-0.1424	-0.0961	-0.0495	-0.0140	0
	3.0	0.6519	0.4278	0.2457	0.1021	-0.0073	-0.1409	-0.1894	-0.1829	-0.1458	-0.0964	-0.0488	-0.0136	0
	3.2	0.6776	0.4351	0.2403	0.0889	-0.0243	-0.1574	-0.1998	-0.1865	-0.1446	-0.0934	-0.0463	-0.0127	0
	3.4	0.6998	0.4395	0.2330	0.0749	-0.0409	-0.1711	-0.2060	-0.1856	-0.1395	-0.0876	-0.0423	-0.0113	0
	3.6	0.7188	0.4413	0.2239	0.0602	-0.0570	-0.1823	-0.2085	-0.1809	-0.1313	-0.0797	-0.0373	-0.0097	0
	3.8	0.7352	0.4409	0.2134	0.0451	-0.0725	-0.1913	-0.2081	-0.1733	-0.1208	-0.0704	-0.0316	-0.0079	0
	4.0	0.7493	0.4387	0.2017	0.0297	-0.0875	-0.1983	-0.2051	-0.1634	-0.1088	-0.0603	-0.0256	-0.0060	0
	4.2	0.7617	0.4350	0.1892	0.0142	-0.1017	-0.2035	-0.2001	-0.1521	-0.0961	-0.0500	-0.0197	-0.0042	0
	4.4	0.7727	0.4301	0.1761	-0.0011	-0.1152	-0.2071	-0.1936	-0.1398	-0.0832	-0.0401	-0.0141	-0.0026	0
4.6	0.7827	0.4244	0.1626	-0.0163	-0.1278	-0.2093	-0.1858	-0.1271	-0.0706	-0.0308	-0.0091	-0.0011	0	
4.8	0.7917	0.4180	0.1489	-0.0310	-0.1395	-0.2100	-0.1772	-0.1144	-0.0586	-0.0224	-0.0048	0.0001	0	
5.0	0.8000	0.4111	0.1352	-0.0453	-0.1503	-0.2096	-0.1678	-0.1018	-0.0476	-0.0150	-0.0012	0.0010	0	
5.5	0.8181	0.3918	0.1009	-0.0785	-0.1730	-0.2036	-0.1427	-0.0727	-0.0246	-0.0014	0.0045	0.0023	0	
6.0	0.8333	0.3708	0.0676	-0.1078	-0.1897	-0.1922	-0.1169	-0.0480	-0.0086	0.0059	0.0065	0.0024	0	
7.0	0.8571	0.3258	0.0056	-0.1543	-0.2071	-0.1587	-0.0695	-0.0136	0.0067	0.0084	0.0045	0.0012	0	
8.0	0.8750	0.2792	-0.0484	-0.1852	-0.2070	-0.1198	-0.0332	0.0034	0.0088	0.0048	0.0014	0.0001	0	
9.0	0.8889	0.2330	-0.0938	-0.2025	-0.1994	-0.0827	-0.0097	0.0088	0.0060	0.0016	-0.0001	-0.0002	0	
10.0	0.9000	0.1883	-0.1307	-0.2084	-0.1737	-0.0514	0.0031	0.0082	0.0028	0	-0.0004	-0.0001	0	
12.0	0.9167	0.1053	-0.1807	-0.1954	-0.1226	-0.0104	0.0089	0.0029	-0.0002	-0.0003	0	0	0	
14.0	0.9286	0.0328	-0.2041	-0.1631	-0.0736	0.0062	0.0050	0	-0.0003	0	0	0	0	
16.0	0.9375	-0.0288	-0.2073	-0.1240	-0.0358	0.0089	0.0014	-0.0004	-0.0001	0	0	0	0	
18.0	0.9444	-0.0798	-0.1964	-0.0861	-0.0111	0.0062	-0.0002	-0.0002	0	0	0	0	0	
20.0	0.9500	0.1207	-0.1766	-0.0539	0.0025	0.0030	-0.0004	0	0	0	0	0	0	

Tabla 3.4.- Valores del coeficiente  $k_1$  en función de las características del tanque.

### Momento flector de fisuración

Atendiendo a lo que se establece en la norma EHE (2000), el momento de fisuración de una sección ( $M_{fis}$ ) se calcula según la expresión

$$M_{fis} = f_{ct,m} \cdot W_b \quad (3.19)$$

Siendo

- $f_{ct,m}$  Resistencia media a tracción del hormigón, que se puede obtener directamente de los ensayos (Turner, 2000) incluidos en el apartado 2.5 ( $f_{ct,m}=1,60MPa$ ).
- $W_b$  Módulo resistente de la sección bruta respecto de la fibra extrema. Se calcula según la expresión (3.20).

El módulo resistente  $W_b$  correspondiente a una sección de la pared se puede calcular según

$$W_b = \frac{1}{6} \cdot b \cdot e^2 \quad (3.20)$$

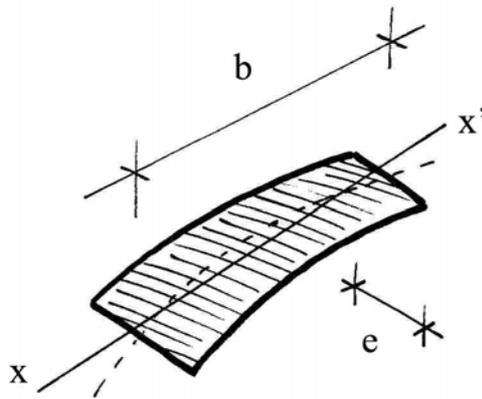


Fig.3.12.- Sección circunferencial de pared sobre la que se efectúa la comprobación.

### 3.2.4.3.- Resistencia a cortante

#### Esfuerzo cortante de cálculo

El esfuerzo cortante de cálculo para un tanque empotrado en el borde inferior vendrá dado por la expresión

$$V_{rd} = Q_x = -\frac{\gamma \cdot H \cdot \sqrt{R \cdot e}}{2 \cdot \sqrt[4]{3 \cdot (1 - \nu^2)}} \cdot k_2 \quad (3.21)$$

en la cual  $k_2$  es un coeficiente que se obtiene de la tabla 3.5. El resto de parámetros son los ya indicados para la expresión (3.18).

#### Esfuerzo cortante de agotamiento

En la norma EHE (2000) se establece que en general, si se cumplen las indicaciones sobre el Estado Límite de Agotamiento a Esfuerzo Cortante, el control de la fisuración en servicio está asegurado sin comprobaciones adicionales.

Estas indicaciones consisten en comprobar las expresiones

$$\begin{aligned} V_{rd} &\leq V_{u1} \text{ (esfuerzo cortante de agotamiento por compresión oblicua del alma).} \\ V_{rd} &\leq V_{u2} \text{ (esfuerzo cortante de agotamiento por tracción en el alma).} \end{aligned}$$

donde  $V_{rd}$  es el esfuerzo cortante efectivo de cálculo.

No obstante, para piezas sin armadura de cortante (como es el caso) no resulta necesaria la primera comprobación. Así la única comprobación necesaria será

$$V_{rd} \leq V_{u2} = \left[ 0,12 \cdot \xi \cdot (100 \cdot \rho_l \cdot f_{ck})^{1/3} - 0,15 \sigma'_{cd} \right] \cdot b \cdot d \quad (3.22)$$

en la cual:

$$\xi = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \text{ con } d \text{ en mm.}$$

$$\rho_l = \frac{A_s}{b \cdot d} \leq 0,02$$

$$\sigma'_{cd} = \frac{N_d}{A_c} \text{ Tensión axil efectiva de la sección (tracción positiva).}$$

$f_{ck}$  Resistencia característica a compresión del hormigón (en MPa). Se obtendrá considerando el valor  $f_{ct,m} = 1,60 \text{ MPa}$  obtenido de los ensayos:

$$f_{ct,m} = 0,30 \cdot \sqrt[3]{f_{ck}^2} \longrightarrow f_{ck} = \sqrt{\left(\frac{1,60}{0,30}\right)^3} = 12,32 \text{ MPa} \quad (3.23)$$

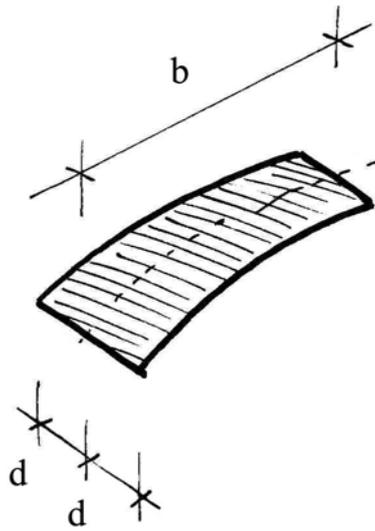


Fig.3.13.- Características de la sección para el cálculo del cortante (correspondiente a una sección circular).

		VALORES DE X/H												
		0	0.05	0.10	0.15	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80	0.90	1.00
VALORES DE $\beta \cdot H$	0.6	-0.5917	-0.5332	-0.4777	-0.4253	-0.3758	-0.2861	-0.2085	-0.1431	-0.0900	-0.0492	-0.0205	-0.0041	0
	0.8	-0.7678	-0.6898	-0.6158	-0.5460	-0.4802	-0.3612	-0.2589	-0.1734	-0.1049	-0.0532	-0.0185	-0.0008	0
	1.0	-0.9154	-0.8180	-0.7256	-0.6385	-0.5567	-0.4093	-0.2838	-0.1806	-0.0997	-0.0411	-0.0050	0.0087	0
	1.2	-1.0321	-0.9151	-0.8044	-0.7002	-0.6026	-0.4280	-0.2814	-0.1631	-0.0733	-0.0122	0.0204	0.0245	0
	1.4	-1.1263	-0.9898	-0.8609	-0.7398	-0.6268	-0.4262	-0.2603	-0.1294	-0.0337	0.0269	0.0527	0.0437	0
	1.6	-1.2095	-1.0536	-0.9065	-0.7687	-0.6408	-0.4154	-0.2319	-0.0904	0.0092	0.0676	0.0853	0.0627	0
	1.8	-1.2883	-1.1130	-0.9479	-0.7937	-0.6512	-0.4026	-0.2034	-0.0534	0.0534	0.0485	0.1037	0.1136	0
	2.0	-1.3640	-1.1693	-0.9863	-0.8161	-0.6596	-0.3895	-0.1771	-0.0210	0.0813	0.1327	0.1354	0.0909	0
	2.2	-1.4351	-1.2210	-1.0202	-0.8345	-0.6647	-0.3754	-0.1526	0.0067	0.1073	0.1537	0.1500	0.0984	0
	2.4	-1.4994	-1.2660	-1.0477	-0.8468	-0.6647	-0.3587	-0.1288	0.0304	0.1266	0.1670	0.1573	0.1011	0
	2.6	-1.5554	-1.3027	-1.0672	-0.8518	-0.6582	-0.3383	-0.1048	0.0509	0.1402	0.1732	0.1581	0.0996	0
	2.8	-1.6026	-1.3307	-1.0782	-0.8489	-0.6448	-0.3137	-0.0802	0.0689	0.1487	0.1733	0.1530	0.0943	0
	3.0	-1.6414	-1.3502	-1.0811	-0.8384	-0.6248	-0.2854	-0.0549	0.0846	0.1530	0.1683	0.1433	0.0861	0
	3.2	-1.6727	-1.3623	-1.0768	-0.8215	-0.5991	-0.2540	-0.0294	0.0981	0.1538	0.1593	0.1303	0.0759	0
	3.4	-1.6978	-1.3684	-1.0667	-0.7993	-0.5692	-0.2207	-0.0042	0.1096	0.1517	0.1476	0.1152	0.0645	0
	3.6	-1.7182	-1.3697	-1.0521	-0.7732	-0.5364	-0.1864	0.1865	0.0198	0.1190	0.1474	0.1342	0.0991	0
	3.8	-1.7349	-1.3674	-1.0343	-0.7446	-0.5017	-0.1525	0.0422	0.1262	0.1414	0.1200	0.0830	0.0415	0
	4.0	-1.7491	-1.3627	-1.0143	-0.7142	-0.4662	-0.1195	0.0625	0.1313	0.1340	0.1056	0.0676	0.0311	0
	4.2	-1.7614	-1.3561	-0.9928	-0.6830	-0.4307	-0.0880	0.0803	0.1342	0.1256	0.0915	0.0535	0.0218	0
	4.4	-1.7724	-1.3482	-0.9703	-0.6515	-0.3995	-0.0586	0.0955	0.1350	0.1166	0.0782	0.0409	0.0139	0
4.6	-1.7823	-1.3394	-0.9471	-0.6199	-0.3612	-0.0313	0.1081	0.1339	0.1070	0.0658	0.0300	0.0074	0	
4.8	-1.7914	-1.3297	-0.9235	-0.5885	-0.3278	-0.0064	0.1181	0.1312	0.0972	0.0545	0.0208	0.0023	0	
5.0	-1.7997	-1.3194	-0.8996	-0.5574	-0.2956	0.0162	0.1256	0.1269	0.0873	0.0442	0.0133	-0.0015	0	
5.5	-1.8180	-1.2915	-0.8393	-0.4819	-0.2204	0.0626	0.1347	0.1111	0.0633	0.0237	0.0008	-0.0063	0	
6.0	-1.8333	-1.2609	-0.7787	-0.4102	-0.1532	0.0958	0.1329	0.0912	0.0420	0.0095	-0.0050	-0.0069	0	
7.0	-1.8571	-1.1948	-0.6597	-0.2800	-0.0431	0.1299	0.1093	0.0510	0.0117	-0.0038	-0.0059	-0.0033	0	
8.0	-1.8750	-1.1250	-0.5467	-0.1695	0.0363	0.1331	0.0760	0.0207	-0.0024	-0.0056	-0.0029	-0.0005	0	
9.0	-1.8889	-1.0537	-0.4420	-0.0791	0.0888	0.1180	0.0449	0.0032	-0.0058	-0.0034	-0.0007	0.0003	0	
10.0	-1.9000	-0.9823	-0.3467	-0.0077	0.1193	0.0944	0.0214	-0.0043	-0.0046	-0.0012	0.0001	0.0002	0	
12.0	-1.9167	-0.8423	-0.1858	0.0854	0.1333	0.0460	-0.0021	-0.0046	-0.0008	0.0002	0.0001	0	0	
14.0	-1.9286	-0.7096	-0.0635	0.1268	0.1120	0.0132	-0.0057	-0.0013	0.0002	0.0001	0	0	0	
16.0	-1.9375	-0.5864	0.0240	0.1334	0.0787	-0.0019	-0.0032	0.0001	0.0001	0	0	0	0	
18.0	-1.9444	-0.4737	0.0820	0.1197	0.0470	-0.0058	-0.0009	0.0002	0	0	0	0	0	
20.0	-1.9500	-0.3721	0.1160	0.0965	0.0227	-0.0047	0.0001	0.0001	0	0	0	0	0	

Tabla 3.5.- Valores del coeficiente  $k_2$  en función de las características del depósito.

### 3.2.4.4.- Abertura de fisura

El límite de abertura de fisura que establece la ACI, ampliamente aceptado para depósitos de ferrocemento es de  $50\mu\text{m}$ .

En el caso de tratarse de elementos a tracción, y mientras no se disponga de valores experimentales más precisos que permitan aplicar un proceso menos conservador, para determinar la abertura de fisura se puede proceder según la siguiente formulación (Wainshtok, 1998; EHE, 2000):

Para  $\sigma_{s,d} \leq 345 \cdot S_{rL}$

$$\omega_{\text{máx}} = \frac{3500}{E_r} \quad (3.24)$$

Para  $\sigma_{s,d} > 345 \cdot S_{rL}$

$$\omega_{\text{máx}} = \frac{20}{E_r} [175 + 3,69 \cdot (\sigma_{s,d} - 345 \cdot S_{rL})] \quad (3.25)$$

Siendo:

$\sigma_{s,d}$  Tensión del refuerzo en la sección fisurada en MPa,  $\sigma_{s,d} = \frac{N_k}{A_s}$ .

$S_{rL}$  Superficie específica en sentido longitudinal en  $\text{cm}^{-1}$ .

$E_r$  Módulo eficaz del refuerzo ( $E_r = E_s = 2,1 \cdot 10^5$  MPa en malla soldada i  $E_r \approx 1,05 - 1,75 \cdot 10^5$  MPa en malla retorcida o de gallinero).

### 3.3.- ANÁLISIS DE LA SOLERA

¿Cómo debe ser la solera? Esta es la primera pregunta que nos viene a la cabeza. ¿Es mejor plana? ¿O tal vez perfectamente esférica para facilitar la transmisión de los esfuerzos? Es necesario ante todo analizar distintas formas para poder determinar de forma aproximada qué solera presenta un comportamiento más interesante. Éste es el principal objetivo que se va a perseguir en este apartado: caracterización de la solera.

El otro gran objetivo, el cálculo de los esfuerzos en la solera es un tema conflictivo debido a que resulta difícil obtener una formulación:

- Que se ajuste a la geometría de la solera. Para poder analizar distintas soluciones es necesario poder adaptar el cálculo a cada una.
- Que considere la deformabilidad del terreno dando así una mayor representatividad de los resultados.
- Que tenga en cuenta el carácter real de la unión pared-losa. La unión pared-losa no es en realidad un empotramiento perfecto, tampoco es una articulación. Es una unión de cierta rigidez (que dependerá de la pared y la solera) y con posibilidad de giro.

#### 3.3.1.- Tipo de análisis

Analíticamente es posible estudiar la solera independientemente de la pared, aplicando el momento de empotramiento en el borde exterior de la losa. No obstante, este sistema presenta dos inconvenientes:

- No tiene en cuenta el carácter real de la unión que decíamos en el apartado anterior.
- Se trata de un método que, como ya contempla Vilardell (1994), funciona bien para grandes depósitos de hormigón, no obstante, en el caso que nos contempla este método desprecia el carácter de lámina de esta estructura, para el cual tan bien funciona el ferrocemento.

Sin embargo, dada la dificultad de llevar a cabo cálculos analíticos que se ajusten a las condiciones reales del problema, en este caso la mejor solución es emplear el cálculo por elementos finitos: es un sistema fiable y de gran versatilidad. Como consecuencia, esto reduce el interés del cálculo de esfuerzos, en tanto que no permite la obtención de un resultado general extrapolable para cualquier depósito. Sin embargo, sí que resulta una herramienta muy útil como criterio de elección del diseño que presenta en servicio una mejor respuesta en cuanto a esfuerzos esto es, la caracterización de la solera.

#### 3.3.2.- Modelo de análisis

El modelo estudiado contempla la estructura entera para obtener una mayor representatividad de los resultados, tanto por parte de las cargas exteriores como de la caracterización de la unión pared-losa. Está constituido por un cilindro recto de espesor

constante que define las paredes del tanque y un casquete esférico correspondiente a la solera, ambos unidos rígidamente.

Parámetros geométricos del modelo:

- H Altura del depósito.
- R Radio de curvatura del casquete esférico.
- h Altura del centro de la esfera.
- r Radio del depósito.
- l Profundidad máxima de la solera.
- $\theta$  Ángulo del borde con la vertical.

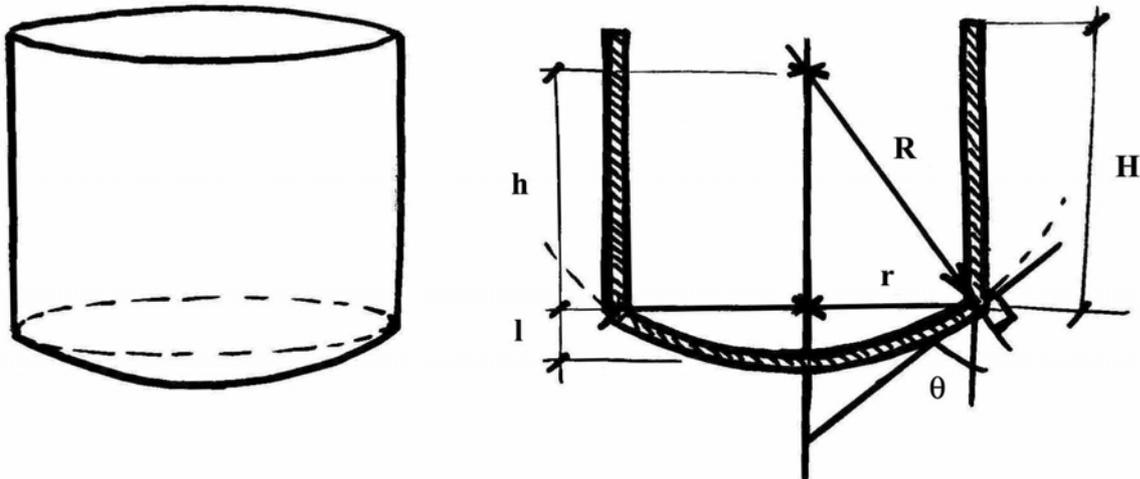


Fig. 3.14.- Geometría planteada para el modelo en el cálculo por elementos finitos.

Los parámetros geométricos de partida son los que definen las dimensiones del vaso (H,r). De éstos se puede obtener todo el resto de parámetros en función de  $\theta$ . Así, de la figura 3.14 se puede deducir fácilmente,

$$\begin{aligned}
 h &= r \cdot \operatorname{tg} \theta \\
 R &= \sqrt{r^2 + h^2} = r \cdot \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \theta} \\
 l &= R - h = r \cdot \left( \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \theta} - \operatorname{tg} \theta \right)
 \end{aligned}$$

Esto nos permite definir la geometría del depósito en función del ángulo del borde ( $\theta$ ) a partir de una geometría inicial del vaso (H,r) determinada.

### 3.3.3.- Condiciones de contorno. Acciones

Se ha considerado el borde superior libre y la pared unida rígidamente a la solera. En cuanto a las cargas se ha considerado en la solera el efecto de un suelo elástico con un módulo de balasto  $k_s = 5 \text{ kp/cm}^3$ , correspondiente a un terreno de mala calidad según establece Vilardell (1994) y el de la presión hidrostática en todo el depósito (ver figura 3.15) en la hipótesis de lleno total (superficie libre hasta el borde superior).

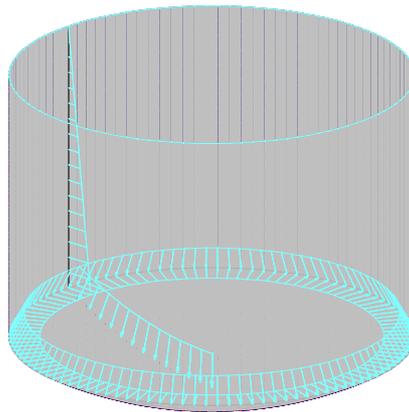


Fig. 3.15.- Carga hidrostática en paredes y solera del tanque.

### 3.3.4.- Mallado y cálculo del modelo

El mallado y el cálculo por elementos finitos se han llevado a cabo con el programa *Robot Millennium* para los cuales se han empleado elementos rectangulares de cuatro nodos. Se han analizado distintos tamaños y geometrías para el depósito cuyos resultados se incluyen en el Anejo 3.

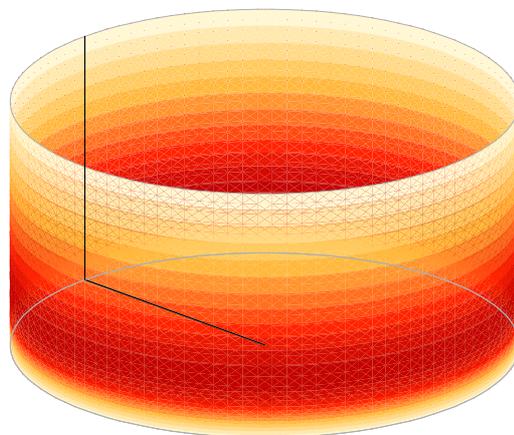


Fig.3.16.- Esquema del depósito planteado para el cálculo por elementos finitos.

### 3.4.- VALORES DE CÁLCULO DE LOS MATERIALES

Se incluyen a continuación los valores tanto mecánicos como de mezcla adoptados para la mezcla de mortero de proyecto. La resistencia a tracción del mortero se ha obtenido de los resultados de los ensayos (Turner, 2003) descritos en 2.5.

- Resistencia a tracción del mortero:  $f_{ct,m}=1,60MPa$ .
- Relación agua/cemento (peso): 0,5:1.
- Relación arena/cemento (volumen): 3:1.

Para el cálculo no se ha empleado la resistencia última del acero pues se ha estudiado el estado límite de fisuración del mortero como criterio de dimensionamiento.

## **CAPÍTULO 4**

### **EJECUCIÓN DE TANQUES DE FERROCEMENTO**

#### **4.1.- INTRODUCCIÓN**

Tal como ya se ha comentado con anterioridad, los tanques de ferrocemento o, más concretamente, de mortero armado se han utilizado y se están utilizando por todo el mundo. Se trata de una técnica básicamente experimental que presenta como cabe esperar, muchas variantes en función de las necesidades reales de los usuarios y las condiciones de contorno.

En este capítulo se recoge en un primer término el procedimiento general de ejecución de un tanque, analizando con detalle todos los pasos a seguir, desde la localización del espacio hasta el llenado del tanque, pero sin entrar en detalle sobre características particulares cuantitativas.

En un segundo término se describen cuatro ejemplos detallados que recogen distintas situaciones en cuanto a tanques de ferrocemento, correspondientes a las publicaciones de Watt (1986) y Development Technology Unit of Warwick (2000). En este apartado sí que se incluyen la relación de magnitudes de cada ejemplo.

#### **4.2.- EJECUCIÓN DE UN TANQUE DE FERROCEMENTO. CASO GENERAL**

A continuación, se describe brevemente los pasos a seguir para la ejecución de un tanque cualquiera.

## **4.2.1.- Delimitación del lugar y ejecución de la base**

### *4.2.1.1.- Limpieza del lugar y preparación de los cimientos*

El sitio escogido para el tanque debe ser limpiado de vegetación, suelo suelto y rocas que podrían perforar la base del tanque. Para los tanques más pequeños (hasta 10m<sup>3</sup>) habitualmente solo es necesario limpiar el sitio y disponer una capa de unos 15cm de arena y grava una vez todas las conducciones y tubos han sido dispuestos. Para los tanques más grandes es necesario un anillo de cimentación separado para soportar las paredes, que se prepara mediante la excavación de una zanja justo debajo de la línea de pared y rellenándola con hormigón (ver figura 4.16).

### *4.2.1.2.- Obtención de los materiales*

Arena, grava y agua deberían obtenerse antes de la construcción de un tanque, de esta manera los usuarios del tanque pueden colaborar en gran parte de su ejecución y reducir por tanto el coste de éste. El árido se puede almacenar en montones al lado de la bandeja de mezcla para el mortero: una región de unos 2x2m con una capa hormigón extendida sobre otra de grava (ver figura 2.4), acabada con un borde sobresaliendo ligeramente para prevenir el vertido accidental de pasta de cemento durante la mezcla.

Para tanques pequeños aislados, es más barato traerse directamente la tabla de mezclas como parte del equipo necesario, pues mezclar el mortero directamente sobre la superficie del suelo contaminaría el mortero y lo debilitaría, hay que evitarlo.

Los montones de árido deben mantenerse limpios de polvo y otros materiales, habitualmente se cubren con un plástico o sacos para protegerlos de contaminación por animales o polvo arrastrado por el viento. Hay que asegurarse que se dispone de suficiente arena para cada tanque antes de que se empiece a construir. El cemento y la arena deben mantenerse cubiertos durante su almacenamiento. Hay que reunir y revisar que todo el equipo y herramientas estén a punto para su utilización. Cualquier tubo o conducto debe instalarse antes de extender el hormigón.

La superficie del sitio donde va a ir el tanque hay que repararla antes, quitar cantos que puedan posteriormente ocasionar problemas o trabajo innecesario.

### *4.2.1.3.- Base. Ejecución de los cimientos*

Los cimientos para pequeños tanques construidos “in situ” suelen consistir en una losa de hormigón de unos 7,5cm de espesor y unos 2,8m de diámetro. El hormigón se prepara con una mezcla de 1:2:4 (cemento:arena:grava en volumen) y se deja endurecer durante una semana.

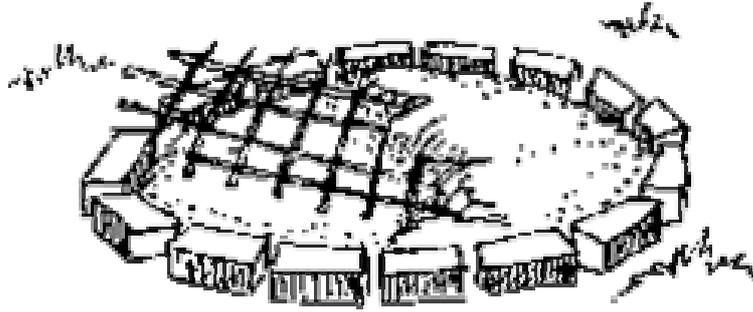


Fig.4.1.- Ejecución de la losa de base del tanque.

En ocasiones se suelen disponer ladrillos en círculo que actúan como molde para la base (ver figura 4.1). Primero se vierte el hormigón, luego se procede al armado de ésta colocando una malla electrosoldada o malla de gallinero en el hormigón fresco. Finalmente se vuelve a aplicar otra capa hasta cubrir la armadura por completo.

La zanja anular de los grandes tanques (comentada en el apartado 4.2.1.1) se rellena con hormigón después de haber ejecutado la losa de cimentación y se deja también endurecer. En el caso que se requieran también vigas debajo de las juntas de la losa (depósitos de más de 10m de diámetro) éstas se van a ejecutar al mismo tiempo.

#### 4.2.2.- Ejecución del refuerzo de las paredes

Existen diversas formas de ejecutar un tanque superficial de ferrocemento atendiendo al molde empleado para la ejecución de las paredes, aquí vamos a citar 3 posibilidades.

##### 4.2.2.1.- Molde formado por 4 planchas de acero

1. *Colocación del encofrado*: hay que examinar en el encofrado posibles daños, limpiarlo y engrasarlo para evitar que el hormigón se pegue. Para este propósito se puede incluso utilizar aceite de coche usado. A continuación se coloca el encofrado y se ata con los pernos.

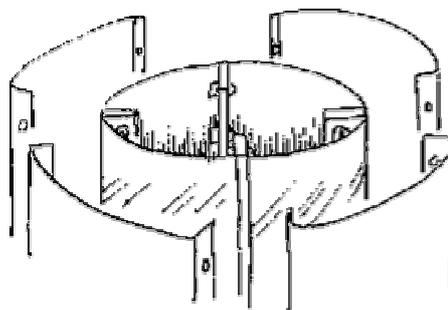


Fig.4.2.- Molde integrado por láminas de acero, para tanques pequeños.

Las láminas empleadas no necesariamente han de ser lisas como se muestra en la figura 4.2, es también habitual el uso de láminas corrugadas (ver figura 2.14) que de hecho dan más pegue para el mortero.

2. *Fijación de la armadura*: la malla retorcida se envuelve entorno del encofrado y se ata firmemente.

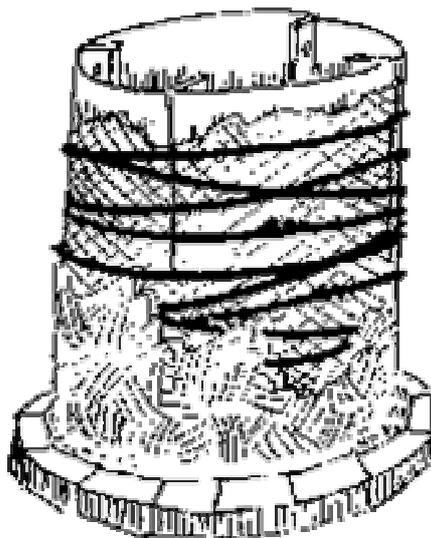


Fig.4.3.- Colocación y atado de la armadura en el tanque.

Para los tanques pequeños la malla se pasa por debajo del encofrado, para introducirse en la losa de cimentación (ver figura 4.11).

En los tanques más grandes se puede fijar la malla en la zanja de cimentación de las paredes, que posteriormente se rellenará con hormigón. En éstos incluso es mejor sustituir la malla por barras de refuerzo de unos 6mm de diámetro, verticales espaciadas cada 10cm. Los alambres longitudinales de unos 4mm de diámetro se envuelven a continuación entorno del tanque a lo largo de toda la altura de pared.

Cualquier unión entre alambres debe tener al menos un solapamiento de  $\frac{1}{2}$  metro y hay que atarse con alambre fino, una vez para cada alambre (nunca atar todos los alambres de la unión a la vez). Asimismo si se notan flojos los alambres longitudinales se pueden tensar mediante una llave especial como la que se muestra en la figura 4.4.

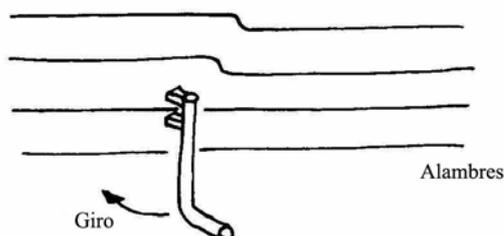


Fig.4.4.- Herramienta para tensar los alambres.

#### 4.2.2.2.- Esqueleto de refuerzo de malla electrosoldada.

Una vez ejecutada la base, se levanta sobre ésta una malla electrosoldada en forma de cilindro, clavándola en la losa de base de hormigón todavía fresco (figura 4.5). Es interesante como se verá en los ejemplos de más adelante atarla con la armadura de la base para lograr una mayor rigidez en la unión.

A continuación se procede (como en el caso de utilizar como molde planchas de acero) a la disposición de las mallas de alambre también atadas a la electromalla.

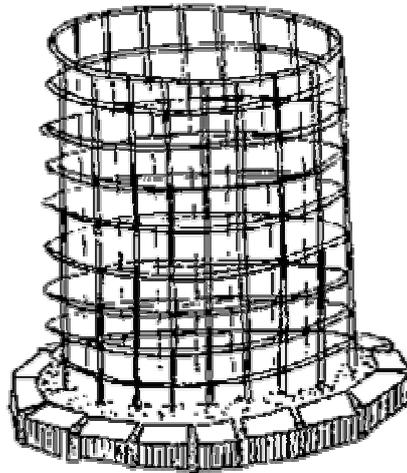


Fig.4.5.- Esqueleto de refuerzo de malla electrosoldada.

#### 4.2.2.3.- Molde de ladrillos o adobe

También posible ejecutar un molde que proporcione a la estructura la forma y suficiente rigidez para la posterior colocación y atado de la armadura.

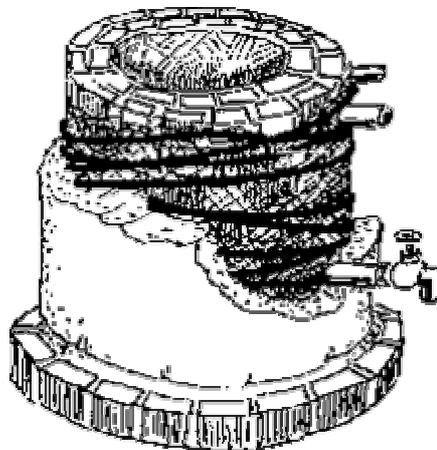


Fig.4.6.- Tanque con molde ladrillos.

Se han llevado a cabo algunas experiencias en las que se ha utilizado ladrillos como se muestra en la figura 4.6. En este caso el funcionamiento es prácticamente el mismo que en el caso de utilizar planchas de acero, teniendo en cuenta que la capa interior de ladrillos es perdida y, por tanto, habrá que colocarlos al mismo tiempo que los grifos y tuberías. A continuación, una vez dispuesta la armadura tanto malla de gallinero como refuerzo longitudinal, se aplicaran dos capas de mortero: una interior al tanque y otra exterior.

Otra posibilidad es la de utilizar adobe (mezcla de barro y paja) en lugar de ladrillos. En este caso después de la aplicación del mortero se rompe y extrae el adobe, lo cual permite aprovechar mucho mejor el buen funcionamiento del ferrocemento con espesores pequeños.

### **4.2.3.- Acabado del tanque: extendido de las paredes y cubierta**

#### *4.2.3.1.- Inserción tubos/desagües*

En total hay que disponer 3 tubos:

- Tubo para el grifo, 15cm por encima de la base.
- Tubo de entrada, en la parte más alta de la pared.
- Rebosadero, justo debajo del tubo de entrada.

En la figura 4.6 se pueden apreciar las tres conducciones y su posición relativa en el tanque. Por lo general, colocaremos antes todos los tubos y conducciones que el extendido del mortero por la pared, si bien a edades tempranas el mortero todavía está lo suficiente “verde” como para cortarlo manualmente.

#### *4.2.3.2.- Mezcla del mortero*

La arena y el cemento se colocan en la bandeja de mezcla o bien en la caja de medida en una proporción de de 3:1 en volumen si es posible (en el apartado 2.3.1 se describen con detalle las proporciones que debe tener la mezcla). Es difícil juzgar estos volúmenes a paladas: es necesaria una caja de medida como la que se muestra en la figura 2.4. La caja, con unas medidas de 50x50x40cm llena de arena y mezclada con una bolsa de 50kg de cemento da lugar a una mezcla 3:1 de arena/cemento en volumen.

El cemento y la arena se mezclan a mano en seco en la bandeja de mezcla (si no se dispone de una mezcladora) en varios montones hasta que estén bien mezclados. A continuación se hace un agujero en el centro del montón y se vierte el agua en él, unos 25 litros para cada cantidad medida con la caja. Se mezcla todo hasta lograr una buena consistencia y una mezcla homogénea, sin grumos. De hecho, es mejor inicialmente verter algo menos de agua e ir añadiendo después si resulta difícil hacer una mezcla húmeda con el cemento y la arena.

#### 4.2.3.3.- Extendido del mortero en las paredes del tanque

Después de la mezcla el mortero debe ser aplicado rápidamente en el tanque, si transcurre más de  $\frac{1}{2}$  hora, éste deberá ser utilizado para la losa de cimentación o habrá que tirarlo pues el cemento pierde rápidamente la trabajabilidad si no se añade gran cantidad de agua. En ambientes calurosos, hay que cubrir la mezcla con un saco húmedo o un plástico negro para prevenir el secado rápido.

El mortero se aplica a mano en las paredes del tanque con la ayuda de planchas para el extendido (fig.2.15a) en capas no mayores de 1cm, las capas demasiado gruesas no funcionan bien y tienden a desprenderse. El mortero recién preparado se vierte en una tabla de 75x75cm aproximadamente que evita que el mortero se mezcle con polvo u otros contaminantes. Además, recoge el mortero que cae de las paredes durante el extendido. El mortero se recoge de la tabla mediante las planchas para el extendido: con un panel de 30x30 como el que se muestra en la figura 2.15b se sostiene el mortero y se extiende con una plancha como la mostrada en 2.15a.

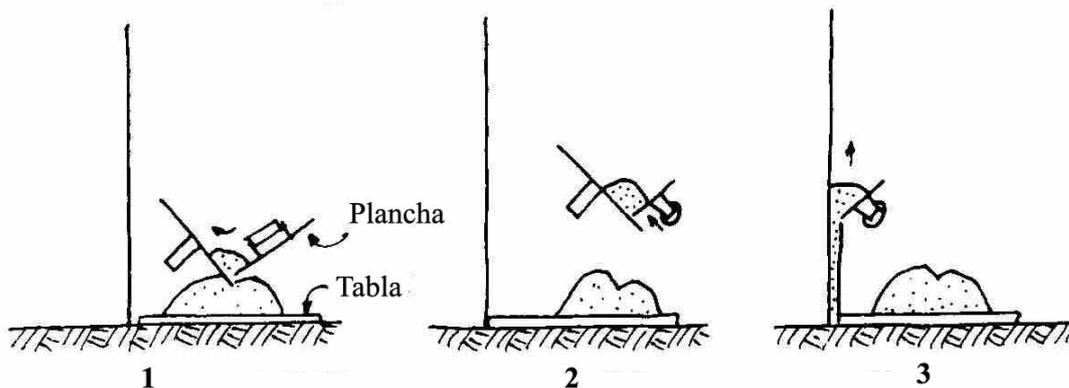


Fig.4.7.- Extendido del mortero en la pared del tanque.

Tal como se muestra en la figura 4.7 se extiende el mortero desde la base de la pared hasta arriba en finas capas, justo cubriendo el alambre de refuerzo. Las paredes se construyen de esta manera, en secciones verticales entorno del tanque. Asimismo, la tabla se va moviendo para cada sección.

Cuando la primera capa de mortero ha endurecido lo suficiente, hay que rascar la superficie para lograr darle una mínima textura rugosa a la cual pueda pegarse la siguiente capa de mortero. Es importante por eso, que no haya acabado de endurecer completamente. La siguiente capa será exterior y se le debe dar una textura lisa para lograr una buena superficie de pared.

El siguiente día se extrae el encofrado del interior del tanque y se aplica una capa de mortero en el interior. En caso de que las planchas de encofrado sean corrugadas (ver fig.2.14)

entonces se rellenarán las corrugas de la pared con esta capa y cualquier alambre de refuerzo que quede al descubierto.

En caso de que el tanque deba quedar durante la noche con una capa inacabada entonces hay que cortar el borde del mortero, al día siguiente rasarlo con un cepillo de púas y aplicarle una capa de cemento para darle un buen pegue al aplicar el mortero fresco. Es aconsejable sin embargo, completar las capas en cada jornada; si se prevé una interrupción en el trabajo entonces es mejor completar la sección entorno al tanque, generándose así una junta horizontal. En cualquier caso **hay que evitar siempre la formación de juntas verticales**, son las más desfavorables para el trabajo del tanque y que presentan una mayor tendencia a abrirse.

Aplicar el mortero en el tanque puede parecer difícil al principio pero en pocas horas cualquiera puede cogerle el truco sin dificultad. La idea está en aplicar el mortero bien mezclado rápida y firmemente con la plancha y darle una textura suficientemente fina. La superficie final no es lo más importante pues si queda rugosa se puede rellenar posteriormente. Lo más importante es lograr un espesor uniforme a lo largo de la pared sin agujeros ni puntos débiles.

#### 4.2.3.4.- Curado

Después de haber aplicado el mortero a las paredes del tanque debe cubrirse con un plástico negro o sacos húmedos. Si el mortero recién colocado queda expuesto directamente al sol o al viento, va a perder rápidamente el agua debido a la retracción ya comentada en el apartado 2.3.1 con lo cual su resistencia final y durabilidad se verán considerablemente reducidas. En el peor de los casos se puede llegar a producir la rotura del tanque.

En ambientes muy calurosos el tanque debe cubrirse entre las sucesivas aplicaciones de capa y capa. En condiciones más suaves el tanque se deja abierto hasta haberse aplicado la última capa y luego se cubre durante una semana o más para el curado. El mortero tardará al menos un mes en alcanzar una resistencia próxima a su resistencia final y durante los primeros días estará lo suficiente “manipulable” como para cortarlo a mano para la colocación de cualquier tubo u otro elemento.

El curado es absolutamente esencial para lograr tanques fuertes y es uno de los pasos más importantes de su construcción. Es además, una de las cosas más difíciles de asegurar en el campo.

#### 4.2.3.5.- Llenado del tanque con agua

El mortero de cemento retraerá más cuanto más se seque. Este efecto será pues mayor en ambientes calurosos y secos. Si después el tanque se llena de agua rápidamente el mortero no tiene tiempo para volver a expandir pues la absorción de humedad es más lenta y el refuerzo de alambre no contribuirá en soportar las tensiones de las paredes. En este caso, hay un alto riesgo de que se produzca la fisuración o hasta el fallo de la estructura. Un tanque

vacío, especialmente uno recién construido debe ser llenado siempre lentamente, y debería además dejarse durante una semana o más con un poco de agua antes de llenarse.

Un tanque de las características como el aquí descrito debería tener una vida útil de unos 20 a 30 años.

### 4.3.- EJEMPLO 1: TANQUE PEQUEÑO DE 10m<sup>3</sup> DE CAPACIDAD

Estos tanques constituyen un modelo simple y de fácil ejecución. Los usuarios, que inicialmente no están experimentados en este tipo de construcciones, pueden recoger los materiales, excavar los cimientos y preparar el mortero bajo la supervisión de un constructor experimentado. Con un constructor experimentado y cinco ayudantes se puede construir el tanque en 3 días.

El modelo cuyo proceso constructivo se describe a continuación tiene un diámetro de 2,5m, una altura de 2m y una capacidad de 10m<sup>3</sup>. El espesor final es de aproximadamente 4cm. Corresponde a un ejemplo recogido por S.B.Watt (1986). Su construcción es in situ y no hay que moverlo.

#### 4.3.1.- Encofrado o molde

El molde empleado está formado por láminas corrugadas de acero galvanizado de 2m de altura y 0,6mm de espesor. Dispuestas verticalmente, generan un cilindro de 2,5m de diámetro sobre el que se empastará el mortero de las paredes. Las láminas se han atado entre ellas a través de cuñas por las que se han pasado unos pernos como se puede ver en la figura 4.9. El ancho de corruga es de 7,5cm.

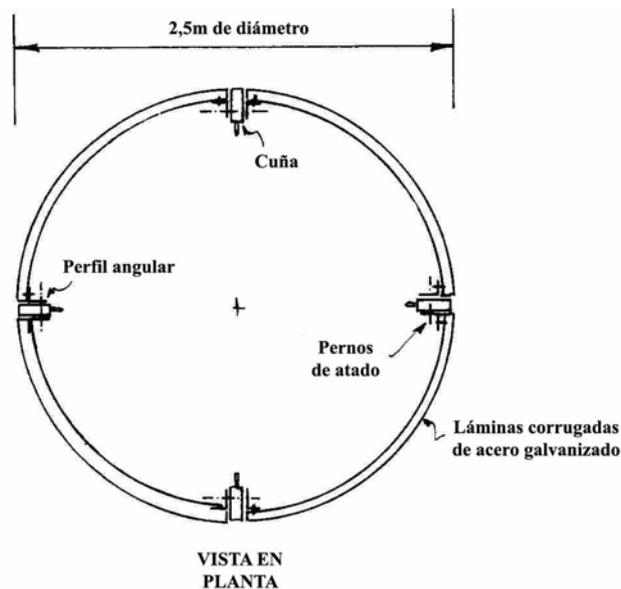


Fig.4.9.- Vista en planta del encofrado empleado.

#### 4.3.2.- Materiales y herramientas

A continuación en la tabla 4.1 se indican todos los materiales necesarios para el tanque que se describe

Materiales	Cantidad
Cemento Portland	600kg
Alambre 2,5mm diámetro	200m (8kg)
Malla gallinero (1m ancho)	16m
Tubo para la salida del agua	1u
Grifo	1u
Tubo para rebosadero	20cm long.x 8cm dia. (acero o hormigón)
Arena	1m <sup>3</sup>
Grava	0,5m <sup>3</sup>

Tabla 4.1.- Resumen de materiales necesarios para el tanque.

En cuanto a las herramientas, en el apartado 2.3.3 se ha descrito el equipo necesario para la ejecución de un tanque tipo.

### 4.3.3. Proceso constructivo

Los pasos seguidos son los siguientes

#### 4.3.3.1.- Losa de cimentación

Primero se excava un área circular de 2,8m en el punto donde debe ir el tanque. La losa está formada por una capa de 10cm de arena y grava, y una de 7,5cm de hormigón por encima, con una mezcla 1:2:4 (cemento:arena:grava en volumen).

Dentro de la losa se dispone un tubo de acero de 1m de longitud y 20mm de diámetro para la salida de agua (ver figura 4.10).

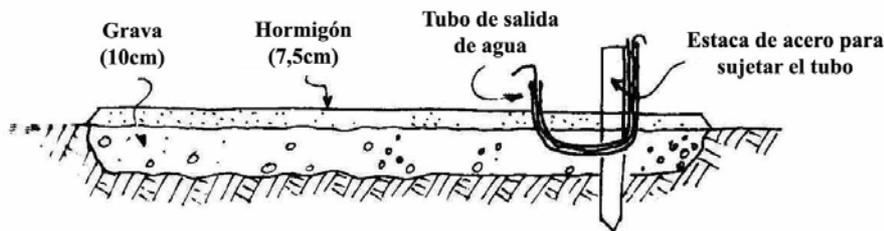


Fig.4.10.- Losa de cimentación del tanque.

Cuando la losa de cimentación ha endurecido se dispone el molde o encofrado para el tanque. Para garantizar una cierta rigidez, las planchas de acero que definen el molde cilíndrico se atornillan mediante pernos pasantes por un sistema de cuñas y perfiles angulares en la forma que se muestra en la figura 4.9.

#### 4.3.3.2.- Armadura de refuerzo

El molde se limpia de suciedad, se engrasa y a su entorno se extiende la malla de alambre, que se pasa por debajo para introducirse posteriormente en la losa de base. La malla tiene una separación de alambres de 5cm y un diámetro de 1mm.

Para disponer los refuerzos longitudinales, se disponen bien tensados entorno al tanque alambres de 2,5mm de diámetro (como se muestra en la figura 4.11) según los siguientes espaciamientos:

- 2 alambres por cada corruga en las primeras ocho.
- 1 alambre en cada corruga en las otras.
- 2 alambres en la corruga superior.

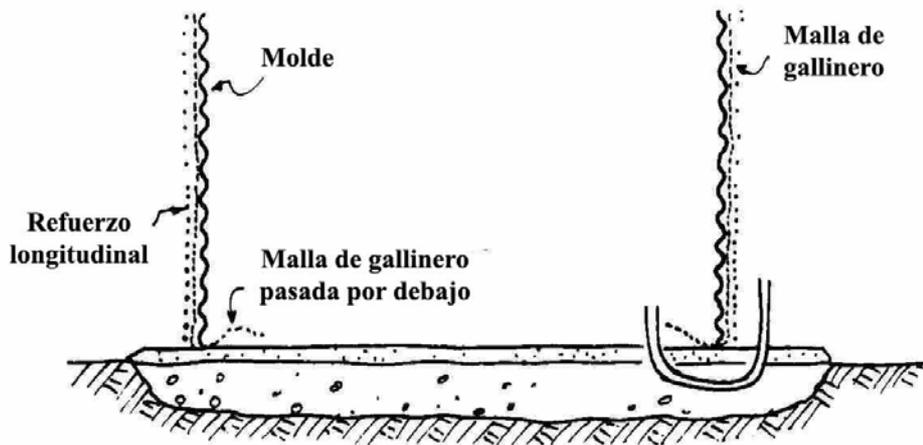


Fig.4.11.- Molde con el refuerzo preparado para el extendido.

Aproximadamente hacen falta 200m de alambre de 2,5mm de diámetro (unos 8kg). La malla proporciona refuerzo vertical al tanque y además mantiene los alambres longitudinales fuera de las corrugas.

#### 4.3.3.3.- Extendido de las paredes

A continuación se procede a extender el mortero por la cara exterior del tanque. La mezcla es 3:1 (arena/cemento en volumen) y cuando empieza a endurecer se extiende una segunda capa de mortero para cubrir los alambres de refuerzo hasta un espesor de 15mm. Finalmente se alisa la superficie con una plancha para el mortero.

Al cabo de un día se extrae el encofrado, quitando primero los pernos, cuñas y finalmente las láminas de acero libres, del interior del tanque. Con el mortero todavía manipulable se monta el rebosadero en la parte superior de la pared y se acaba el interior del tanque extendiendo una capa de mortero para llenar las corrugas dejadas por el encofrado.

Una vez ha endurecido ésta, se vuelve a aplicar otra capa para alisar la superficie con la plancha.

#### 4.3.3.4.- Base del tanque y curado

Tanto en la base como en la junta con la pared, se dispone una capa de 5cm de mortero sin reforzar. Antes de que el mortero de la base endurezca se crea un pequeño surco en el centro del tanque para facilitar la limpieza.

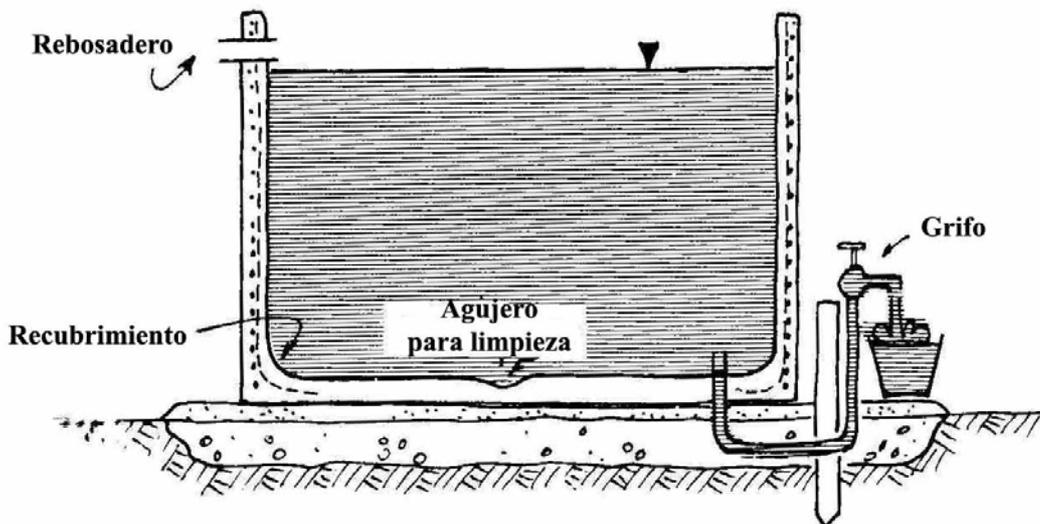


Fig.4.12.- Tanque acabado, en servicio.

El interior del tanque se pinta con pasta de cemento para sellar posibles fisuras. El tanque se llena con un poco de agua, se cubre y se deja curar durante 7 días.

#### 4.3.3.5.- Cubierta

El tanque se puede cubrir con planchas de acero galvanizado. También es posible una cubierta de mortero reforzado.

#### 4.4.- EJEMPLO 2: TANQUE DE 150m<sup>3</sup> DE CAPACIDAD

Estos tanques han sido construidos y utilizados con éxito desde aproximadamente 1950, llegando a diámetros de hasta 25m para contener 450m<sup>3</sup> de agua. Las paredes se construyen con la ayuda de un molde o encofrado a base de planchas prefabricadas de acero galvanizado corrugadas que se disponen formando un círculo completo. El coste del molde es pequeño, menor al 10% del total y como se puede reutilizar para la construcción de otros depósitos, el coste inicial se puede distribuir.

##### 4.4.1.- Diseño

El tanque descrito tiene una capacidad de 150m<sup>3</sup>, con una altura de 2m y un diámetro de 10m. Las paredes se ejecutan conjuntamente con un anillo de hormigón de cimentación. El suelo se ejecuta por separado de las paredes. El tanque no tiene cubierta. El modelo corresponde a otro ejemplo recogido por S.B.Watt (1986).

##### 4.4.2.- Materiales y herramientas

A continuación en la tabla 4.2 se indican todos los materiales necesarios para el tanque que se describe

Materiales	Paredes	Losa
Cemento	2300kg	2100kg
Arena	5m <sup>3</sup>	5m <sup>3</sup>
Grava	-	2,5m <sup>3</sup>
Malla soldada (1m ancho) / Barras refuerzo Ø6 (2,3m largo)	3 rollos de 35m / 310 barras (180kg)	-
Malla soldada / Barras de Refuerzo Ø8 (cada 30cm)	-	80m <sup>2</sup> / 250kg
Sellante bituminoso	-	50 litros
Alambres Ø4	1200m	-
Tuberías entrada/rebosadero/salida	1 juego	-

Tabla 4.2.- Resumen de materiales necesarios para el tanque.

En cuanto a las herramientas, *el equipo necesario para la ejecución de un tanque* descrito se recoge a modo de tabla en el apartado 2.3.3 de este estudio.

##### 4.4.3.- Encofrado

El encofrado consiste en láminas corrugadas de acero galvanizado de 0,6mm de espesor. Dispuestas verticalmente, las láminas pueden tener cualquier longitud, pero atadas

deben formar un círculo con el tamaño y forma correctos. Las láminas se atan mediante pernos como se muestra en la figura 4.13.

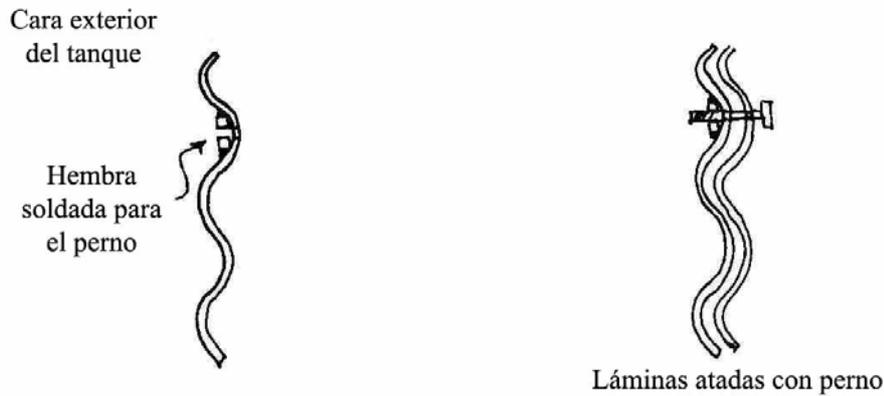


Fig.4.13.- Atado de las láminas empleadas para el encofrado.

#### 4.4.4.- Proceso constructivo

Los pasos seguidos son los siguientes

##### 4.4.4.1.- Localización del lugar

El sitio escogido para el tanque se nivela y se limpia la capa superior del suelo en un radio de 6m. El borde exterior de la losa de cimentación se marca disponiendo una distancia de 4,85m del centro unas estacas aproximadamente cada 1m (ver figura 4.14).

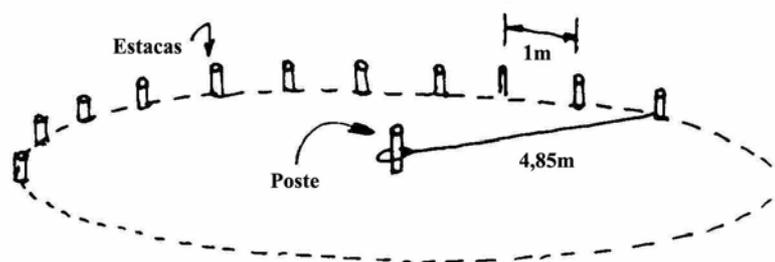


Fig.4.14.- Delimitación del borde exterior de la excavación.

##### 4.4.4.2.- Losa de base

El suelo se excava hasta una profundidad de 15cm por el interior de la región delimitada y se nivela con una capa de arena. El borde de la excavación se delimita con un material más rígido (fibra de vidrio o hasta ladrillos).

El refuerzo consiste en una malla electrosoldada (cuadrada de 20x20cm y diámetro Ø5) o barras de refuerzo Ø8 dispuestas sobre una serie de espaciadores (ver fig.4.15). La losa hay que ejecutarse de una pieza, sin juntas. En caso de una losa mayor, harían falta juntas para el movimiento, dilatación y retracción o asentamiento experimentados por la losa.

Las tuberías de entrada y salida deben estar instaladas antes de ejecutar la losa. El hormigón de mezcla 1:2:4 (en volumen) se coloca y compacta para lograr una losa de 10cm de espesor. La superficie se nivela con una tabla y se hace un ligero surco en el centro para facilitar la limpieza del tanque.

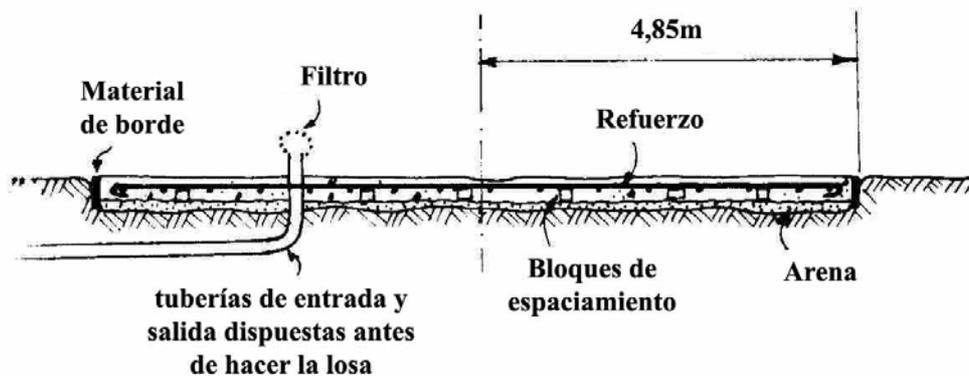


Fig.4.15.- Ejecución de la losa de base del tanque.

Después se cubre la losa con un plástico negro o sacos húmedos durante una semana para dejar que el hormigón endurezca. Esta fase es especialmente importante en climas cálidos.

El coste de los materiales para construir la losa de base es aproximadamente la mitad del coste total del tanque.

#### 4.4.4.3.- Armadura de refuerzo

Acabada la losa de base se excava una zanja de 30cm de ancho y 30 de profundidad entorno a la losa (ver fig.4.16) definiendo lo que será el anillo de cimentación.

Después se coloca el encofrado sujetado por unos bloques o ladrillos dispuestos previamente en el fondo de la zanja anular.

El refuerzo, malla de gallinero o similar se dispone entorno al encofrado con un solapamiento aproximado de 20cm en los bordes, solapamiento donde se cosen las mallas con alambre de atar.

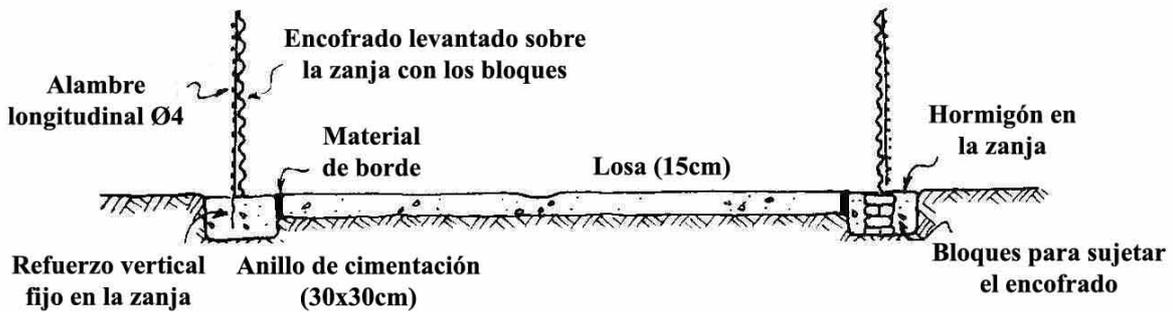


Fig. 4.16.- Disposición del encofrado sobre la zanja.

La malla de alambre se introduce hasta la zanja, donde más adelante se hormigonará in situ. Un diseño alternativo consiste en utilizar barras verticales de acero Ø6 cada 10cm entorno del tanque, este último es más resistente, barato y fácil de transportar.

El principal refuerzo longitudinal, formado por alambres Ø4 se enrollan entorno del encofrado por encima de la malla y se tensan. Cuando hay que unir algunos de ellos es preferible sujetar los cabos a la malla o barras verticales y disponer un generoso solapamiento de 1m con el nuevo alambre.

Los refuerzos longitudinales se disponen entorno al tanque según los siguientes espaciamientos:

- 2 alambres por cada corruga en las primeras veinte.
- 1 alambre en cada corruga en las otras.
- 2 alambres en la corruga superior.

A continuación el material de borde se compacta por el borde de la losa de base y se hormigona el anillo de cimentación relleno la zanja anular con una mezcla 1:2:4 (cemento:arena:grava) en volumen. Ahora, la malla de alambre o barras de refuerzo vertical quedan embebidas en el anillo de cimentación y se proporciona así una mayor resistencia a la base de la pared.

#### 4.4.4.4.- Extendido de las paredes

Con el refuerzo de alambre dispuesto, se procede a extender una mezcla 3:1 (arena:cemento) de mortero en volumen cubriendo los alambres. Luego se cubre con un plástico durante 24 horas y a continuación se extraen las láminas de encofrado y se extiende por la cara interior. Finalmente se vuelve a aplicar en el exterior una capa de unos 15mm de alisado, resultando en total un espesor pared de 7,5-8,5cm de mortero con el refuerzo en el centro.

Acabado este proceso se extrae el material de borde de la junta losa-anillo de cimentación y se vierte betún caliente para la junta de movimiento.



Fig 4.17.- Generación de la junta de dilatación.

Antes de verter el betún para sellar la junta, hay que secarla por completo y limpiarla sin pérdida de mortero o suciedad. Primero hay que pintar ambas caras de la junta con parafina y luego con una capa de pintura bituminosa. Inmediatamente después se llena la junta con betún caliente con lo que queda la junta acabada (ver figura 4.17).

#### 4.5.- EJEMPLO 3: TANQUE DE FERROCEMENTO ENTERRADO

Se trata de hecho, de un tanque semi-enterrado. Los tanques enterrados tienen un aspecto muy interesante en que aprovechan el empuje del terreno para compensar el del agua. Esto hace que el esfuerzo que deben soportar las paredes del tanque sea menor. Sin embargo, tiene el inconveniente que hay que excavar tanto en profundidad el terreno como altura tiene el tanque.

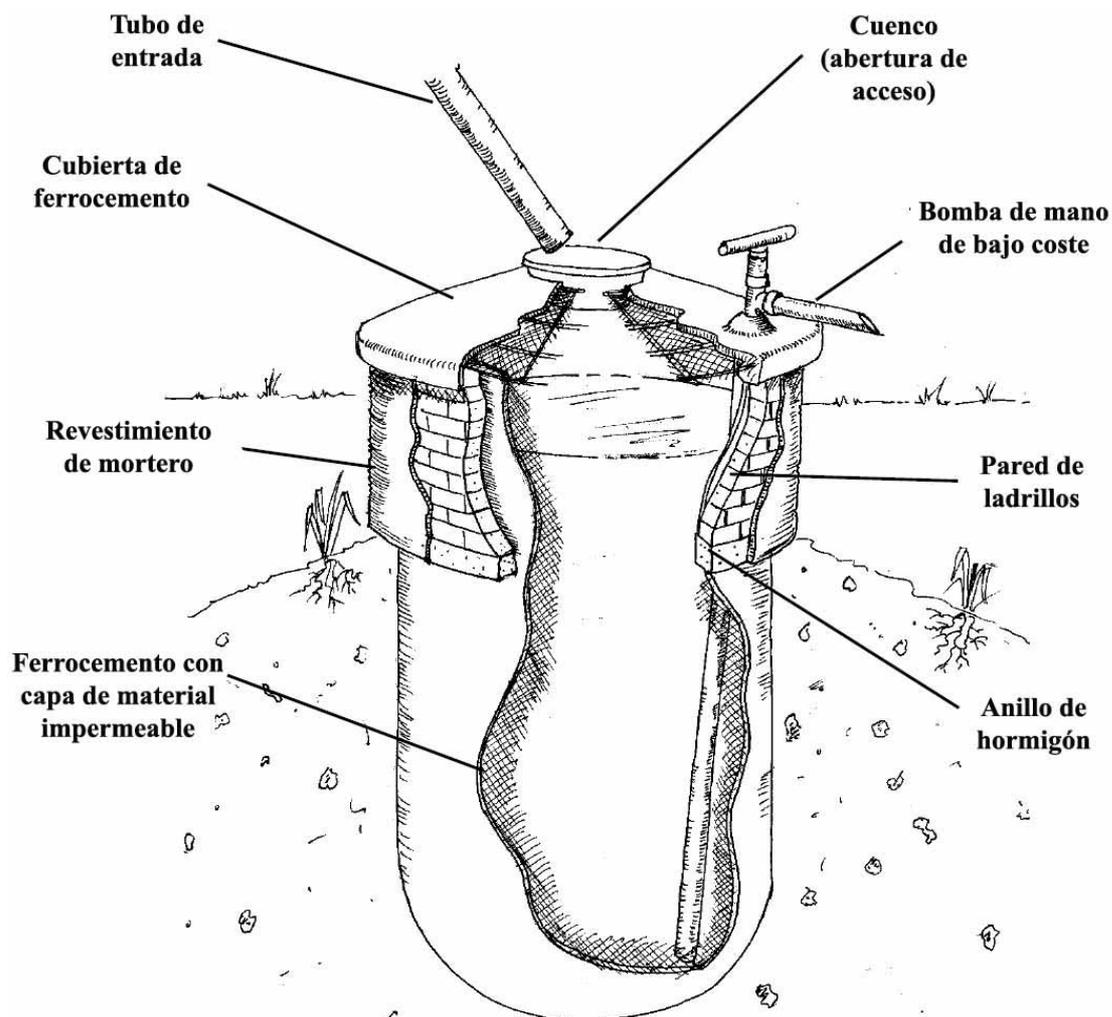


Fig.4.18.- Esquema de un depósito enterrado en el suelo.

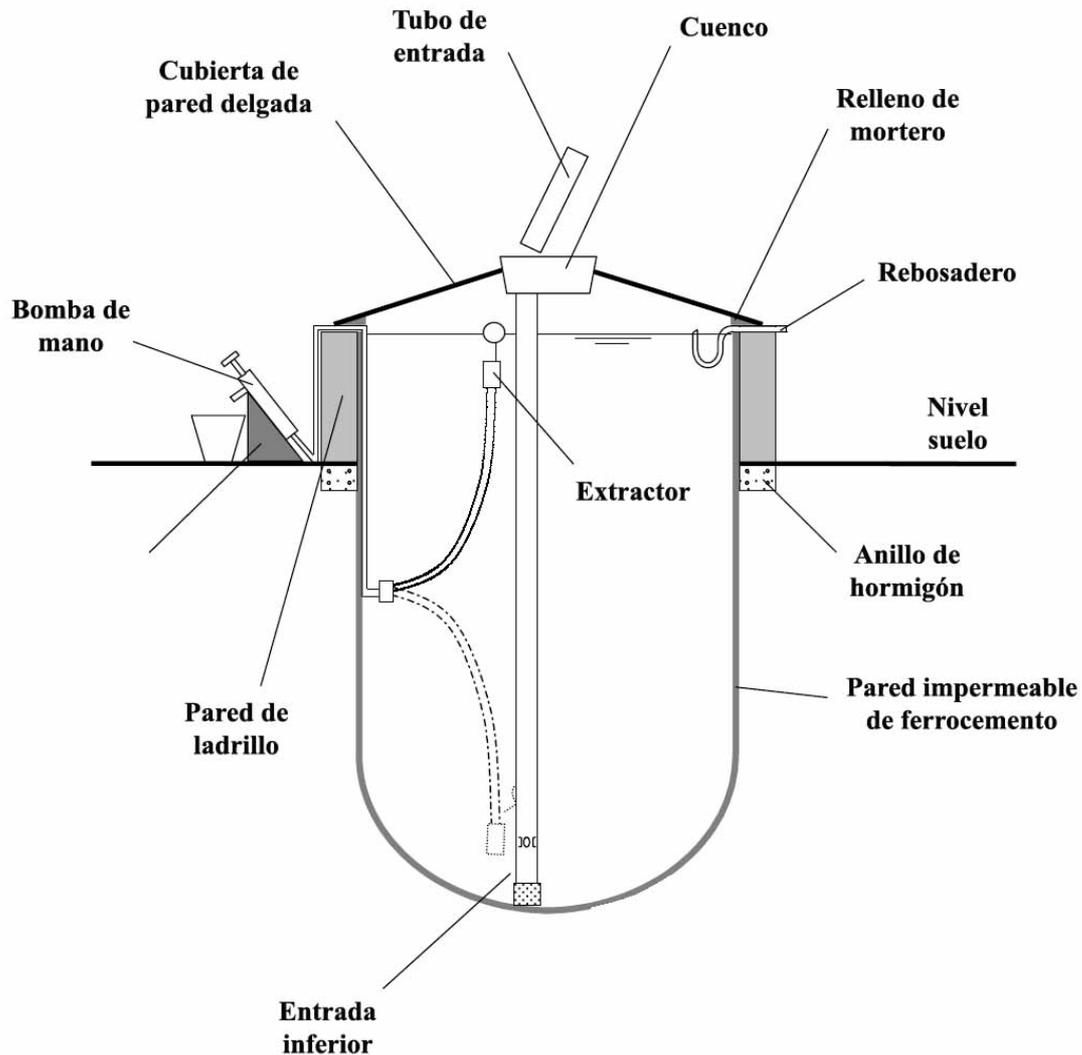


Fig.4.19.- Sección transversal del tanque.

En lo que sigue se va a describir detalladamente el proceso de construcción del tanque semi-enterrado mostrado en las figuras anteriores, llevado a cabo por la Development Technology Unit School of Engineering of Warwick (2000). El tanque tiene una capacidad de  $10,8\text{m}^3$ , con una sección cilíndrica de  $1,55\text{m}$  y una profundidad total de  $3,5\text{m}$  (desde el rebosadero hasta el punto más bajo).

#### 4.5.1.- Materiales y herramientas

A continuación en la tabla 4.3 se enumeran todos los materiales y herramientas empleados en la ejecución del tanque que se describe

Herramientas	Unidades	Materiales	Cantidad
Palas	2	Cemento	465kg
Pico	1	Arena	1585kg
Cubos	2	Árido (<50mm)	120kg
Martillo	1	Ladrillos	300u
Carretilla	1	Malla de gallinero (0,9m ancho)	24m
Herramientas para el extendido	1 juego	Grapas	1kg
Paleta	1	Aditivo impermeabilizante	4kg
Nivel	1	Barras Ø6	20m
Sierra	1	Barras Ø8	20m
Cubo con una cuerda (extracción de suelo)	1	Alambre para atar	1kg
Mazo para los ladrillos	1	Cuenco para filtro	1u
		Empleado experimentado	9,25días
		Empleado no experimentado	19,25días

Tabla 4.3.- Cuadro-resumen de materiales y herramientas totales necesarios para la obra.

#### 4.5.2.- Proceso constructivo

Los pasos seguidos son los siguientes

##### 4.5.2.1.- Localización del lugar

Localización de un lugar apto para excavar y ejecutar el tanque, sin demasiadas rocas y con el nivel freático varios metros por debajo del punto más bajo del tanque. Una vez se ha decidido donde irá el tanque, se procede a marcar los puntos a excavar. Puede resultar útil pegar un clavo y atándole un hilo marcar los círculos a excavar (ver figura 4.20).



Fig.4.20.- Marcando el terreno para la ejecución del anillo de refuerzo.

#### 4.5.2.2.- Ejecución del anillo de refuerzo

Se ha procedido a marcar dos círculos según el diámetro interior y exterior del anillo de 1.9 y 2.2m respectivamente, resultando un espesor de anillo de 0.15m como el indicado en la figura 4.21.

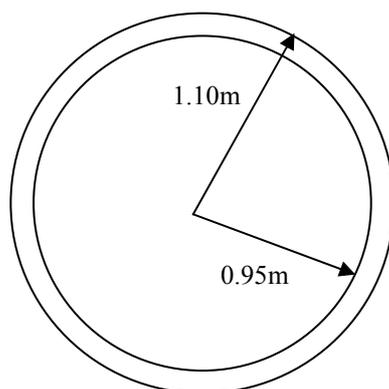


Fig.4.21.- Dimensiones del anillo de refuerzo.

A continuación se excava entre las dos líneas una zanja de 15cm de profundidad aproximadamente. Esto se puede lograr con un simple machete.

La mezcla de hormigón utilizada tiene unas proporciones 1:2:4 (cemento:arena:grava). Las cantidades de material empleadas han sido:

Material	Peso (kg)
Grava (<50mm)	120
Arena (limpia, graduada)	60
Cemento (Portland)	30
Agua (limpia)	Suficiente para hacer la mezcla trabajable

Tabla 4.4.- Cantidad de materiales para el anillo de refuerzo.

Hay que asegurarse que el hormigón esté bien mezclado y luego se echa la mezcla en la zanja, asegurando que no quedan vacíos vibrando el hormigón con un palo. Hay que tener en cuenta que las mezclas “acuosas” tienen menos resistencia final, por eso es mejor mantenerla trabajable pero no “acuosa”.

El anillo de refuerzo se cubre y se somete a un proceso de curado de 7 días consistente en cubrir el anillo con un plástico y regar el hormigón al menos dos veces al día.

4.5.2.3.- Excavación del agujero

Una vez terminado el curado, se puede empezar a excavar el agujero (figura 4.22) manteniendo las paredes razonablemente verticales. Al fondo del agujero se le da forma semiesférica: con una barra dispuesta en el centro y una pala atada se puede lograr fácilmente.

Para estimar el tiempo necesario para la excavación se puede considerar una persona al día por m<sup>3</sup> de excavación.



Fig.4.22.- Excavación del tanque.

4.5.2.4.- Construcción de la pared de ladrillos

La pared de ladrillos tiene una altura de 1m (ver figura 4.24). Los ladrillos se han hecho a medida según las dimensiones que se indican a continuación:

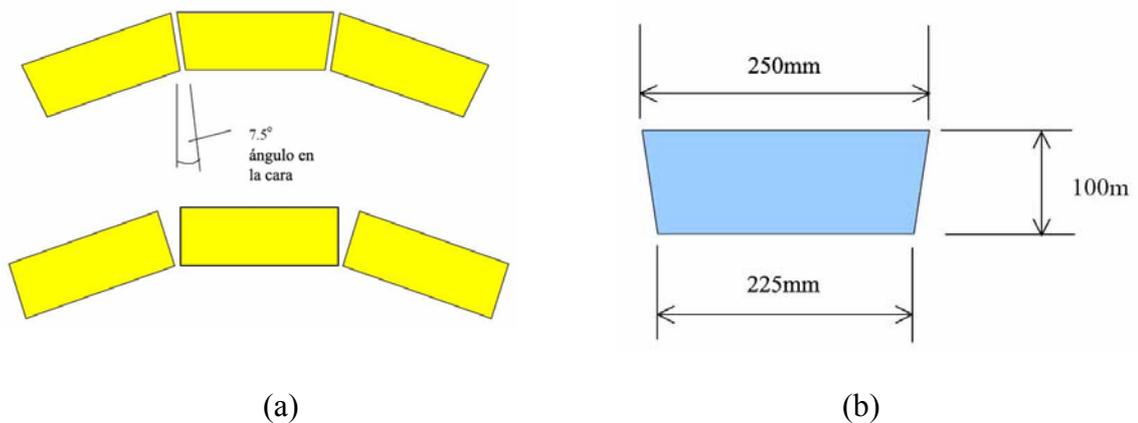


Fig.4.23.- Dimensiones y disposición de los ladrillos empleados.

Los ladrillos se han extendido aplicándoles una capa de mortero con una relación arena/cemento de 6:1. Una vez dispuestos los ladrillos se ha aplicado una capa de revestimiento de mortero para mejorar el aspecto del tanque. La relación de materiales necesarios para la ejecución de la pared ha sido:

Material	Pared	Revestimiento
Arena	300kg	25
Cemento	50kg	125
Ladrillos	300kg	
Agua	La suficiente para lograr un mortero trabajable.	

Tabla 4.5.- Materiales empleados para la ejecución de la pared.



Fig.4.24.- Pared exterior resultante.

#### 4.5.2.5.- Revestimiento interior de ferrocemento impermeable

Se trata de la pared que se va ejecutar en el agujero del tanque. Consiste en un material compuesto por una capa de mortero y malla de gallinero galvanizada, al mortero se le añade un aditivo impermeabilizante y de esta forma se consigue dar un carácter impermeable al conjunto.

Se aplica una fina capa (~1cm) de mortero 3:1 en arena/cemento en la pared del tanque. Cuando el mortero ha empezado a fraguar, hay que rascar un poco la superficie para dar más pegue a la siguiente capa. A continuación se cubre el tanque con un plástico y se deja curar durante dos días. Durante este período se ha ido regando regularmente con agua.

Finalizado el curado se extiende una capa de malla de gallinero que se fija en la capa de mortero con unas grapas. Hay que tener cuidado de disponer la malla lo más plana posible.

Una vez colocada la malla de gallinero se puede proceder a extender la segunda capa de mortero, nuevamente con una proporción 3:1, esta vez con un aditivo impermeabilizante en

las proporciones que indique el fabricante. El espesor debería ser similar al de la primera capa (~1cm). Nuevamente se va a dejar curar durante 7 días. Finalmente, y antes de colocar la cubierta, se sella el espacio para la tubería con mortero impermeable.



Fig.4.25.- Proceso de revestimiento del interior del tanque (izq.). En la derecha, la malla de gallinero.

La relación de materiales empleados en la ejecución del revestimiento ha sido

Material	Cantidad
Arena	600kg
Cemento (Portland)	200kg
Agua	La suficiente para hacer la mezcla trabajable
Aditivo impermeabilizante	Según indique el fabricante
Malla de gallinero	24m de longitud
Grapas	1kg

Tabla 4.6.- Cantidad de materiales para el revestimiento interior.



Fig.4.26.- Tanque acabado y listo para entrar en funcionamiento.

#### 4.6.- EJEMPLO 4: CUBIERTA DE UN TANQUE DE FERROCEMENTO

La cubierta de un tanque de ferrocemento se puede ejecutar sin necesidad de un molde o encofrado. Además se puede hacer independientemente del tanque en el que se va situar y luego ponerla en su sitio una vez acabada. El objetivo es reducir el coste de la cubierta eliminando el coste de moldes o encofrado y reduciendo la cantidad de material empleado para la elaboración de la cubierta. Esto significa que va a ser necesario que la cubierta se pueda extraer para futuras operaciones de mantenimiento o limpieza. La cubierta se puede construir por dos personas (una experimentada y la otra no) en un solo día (sin contar el tiempo posterior de curado).

A continuación se describen los detalles del proceso de construcción de una cubierta empleando la técnica del ferrocemento, desarrollado por el Development Technology Unit School of Engineering of Warwick (2000). Se trata de una cubierta de unos 2m de diámetro con una abertura superior de acceso de 0,5m. La pendiente es de 25°.

##### 4.6.1.- Materiales y herramientas

A continuación en la tabla 4.7 se enumeran todos los materiales y herramientas empleados en la ejecución de la cubierta que se describe

Herramientas	Unidades	Materiales	Cantidad
Sierra	1	Cemento Portland	50kg
Tenazas	1	Arena	150kg
Paleta grande	1	Barras Ø6	20m
Paleta pequeña	1	Barras Ø8	20m
Plancha para el mortero	1	Malla de gallinero	9,6m
Pala	1	Alambre para atar	1kg
Cubos	2	Palangana/cuenco (como filtro)	1u
Carretilla	1	Empleado experimentado	1día
Mesa de trabajo	1	Empleado no experimentado	1día

Tabla 4.7.- Cuadro-resumen de materiales y herramientas necesarios para la obra.

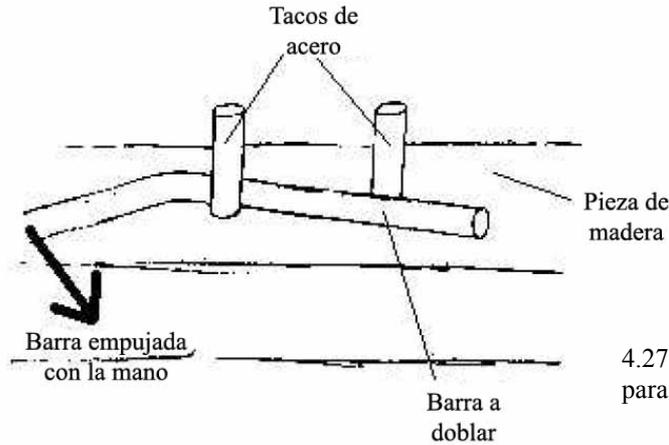
##### 4.6.2.- Proceso constructivo

Los pasos seguidos son los siguientes

###### 4.6.2.1.- Mesa de doblado

El primer paso es la construcción de un tablón o mesa para el doblado de las barras de refuerzo. El tablón dispone de dos clavos o tacos de acero de unos 5cm de largo separados

otros 5cm. Para ello se pueden emplear barras Ø8. En las figuras 4.27 y 4.28 se muestra su funcionamiento.



4.27.- Funcionamiento del tablón para el doblado de barras.



4.28.- Doblado de barras en la mesa de trabajo.

#### 4.6.2.2.- Doblado de las barras y colocación

El siguiente paso es doblar las **barras de refuerzo de 8mm** en círculos formando cuatro aros de 0.55m, 1m, 1.5m y 2m de diámetro respectivamente. Para hacer el proceso más fácil, se puede pegar un clavo en el suelo entorno del cual se van a marcar los círculos mediante una cuerda y una tiza, pudiendo reproducir así fielmente los aros (ver figura 4.29). Las longitudes a cortar para cada círculo son

Diámetro	Longitud aro	Longitud a cortar (+0.2m)
0.55m	1.72m	1.92m
1.0m	3.14m	3.34m
1.5m	4.71m	4.91m
2.0m	6.28m	6.48m

Tabla 4.9.- Longitudes necesarias para las barras.

En relación a la tabla anterior, en las longitudes totales se añaden 20cm para tener en cuenta el solapamiento.



Fig.4.29.- Marcas en el suelo para las barras.



Fig.4.30.- Atado con alambre de las barras.

El siguiente paso es doblar los radios, formados por **barras Ø6**. Su longitud es de 1.33m y se han doblado por tres puntos. En las figuras 4.31 y 4.32 se muestra cómo se ha doblado las barras y los ángulos tomados

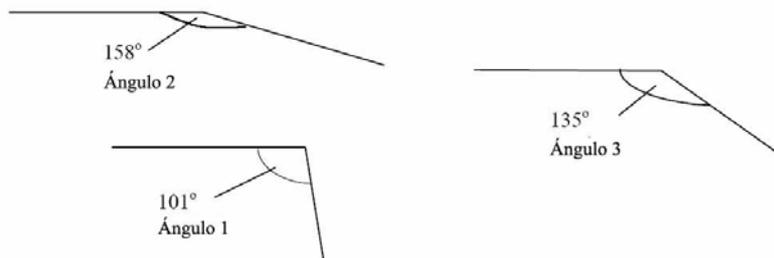


Fig.4.31.- Ángulos con los que hay que doblar las barras radiales.

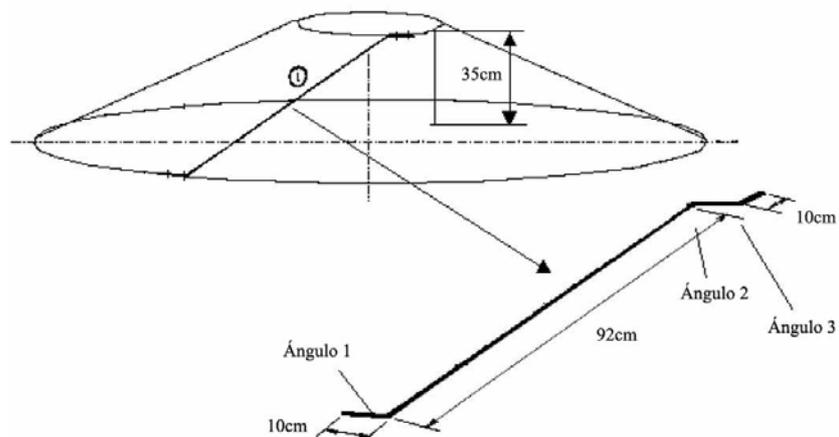


Fig.4.32.- Forma de las barras radiales y disposición de éstas en la cubierta.

Es recomendable doblar primero los ángulos 1 y 3; éstos se han doblado según el mismo plano, a continuación se gira la barra  $90^\circ$  y se dobla el ángulo 2. Las barras se van disponiendo una a una por el interior del círculo exterior. El círculo interior por ahora todavía no se ha colocado. La primera barra radial se fija en un soporte a unos 35cm de altura (ver figuras 4.32 y 4.33). Las otras barras radiales se van disponiendo cada  $45^\circ$  entorno del círculo exterior según los puntos marcados antes en el suelo hasta que la última de ellas se ata con la primera. Cada barra se ata por abajo con el aro exterior y por arriba con la barra anterior (ver figura 4.34).

Después se colocan los dos aros interiores y se atan, el aro más pequeño (el superior) se va a colocar más adelante, al hacer la abertura de acceso.



Fig.4.33.- Montaje de las barras que conforman el reticulado.

A continuación se doblan otras 8 **barras secundarias de  $\varnothing 6$**  con una longitud de 75cm. Se atan al resto de la estructura como se muestra en la figura 4.23 y la estructura ya esta lista para colocar las mallas de gallinero.

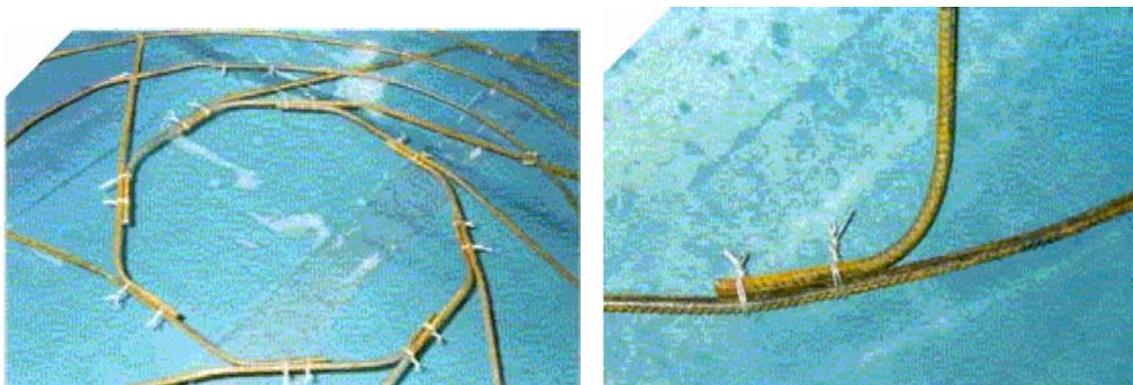


Fig.4.34.- Atado de las barras radiales entre ellas por arriba (izq.) y con el aro exterior por abajo (dcha.).

4.6.2.3.- Malla de gallinero

Se utiliza **malla de gallinero** con un espaciado de alambre de  $\frac{1}{2}$  pulgada y un rollo de 0,9m de ancho. En total se han empleado 9,6m de longitud de malla para aplicar dos capas y que corresponden a las ocho piezas (ver figura 4.35) en que se va a colocar la malla de gallinero en la cubierta cuyas características se muestran a continuación

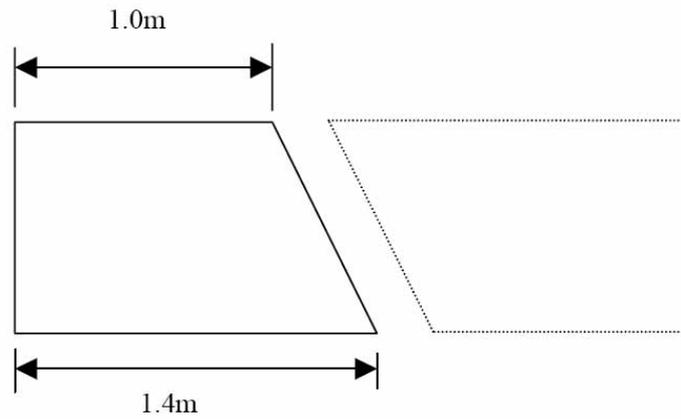


Fig.4.35.- Por cada 2,4m de malla se obtienen dos piezas.

De esta forma al colocar 4 piezas convenientemente se logra cubrir el círculo entero como se puede ver en la figura 4.36

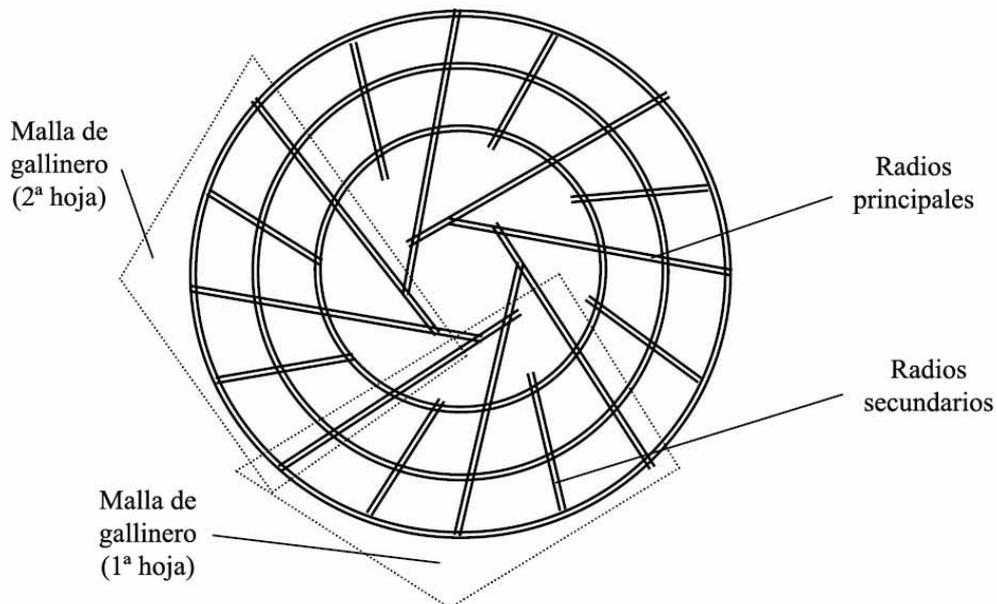


Fig.4.36.- Patrón para la aplicación de la malla de gallinero.

Una vez se ha acabado toda la primera capa de malla de gallinero, se empieza con la segunda, desfasada un radio ( $45^\circ$ ) con respecto de la primera.

#### 4.6.2.4.- Revestimiento de la cubierta

El objetivo es aplicar una capa de mortero a la malla de gallinero tan delgada como sea posible. Esto, a la práctica, representa un espesor de entre 15 y 25mm, con una media de 20mm. Primero se aplica por arriba y después al cabo de un día, por abajo.

Si se hace el proceso sobre un plástico, el mortero que caiga durante el emplastecido puede ser reutilizado.

Para que el trabajo se pueda llevar a cabo tanto de arriba como de abajo hay que elevar la estructura, colocándola al menos sobre 6 cajas o soportes para que se mantenga estable y pueda resistir la presión ejercida durante el revestimiento (ver figura 4.37). Además, en el centro también hay que colocar un soporte para evitar que fleche durante el emplastecido.



Fig.4.37.- Armadura de la cubierta ya completada, sin mortero.

Para preparar la mezcla, se emplea una relación arena/cemento de 3:1. Las cantidades hay que medirlas con cuidado en un recipiente, por ejemplo un cubo. La arena es angulosa con un tamaño de grano moderado y el cemento es del tipo Portland Ordinario.

La consistencia debe ser lo suficientemente seca como para no caerse atravesando las mallas pero también lo suficientemente trabajable como para poderla extender con la paleta en la estructura. Añadiendo un plastificante se logrará mantener una relación agua/cemento moderada con suficiente trabajabilidad.

La relación agua/cemento debe ser aproximadamente de 0,4. A la práctica el objetivo es lograr la plasticidad deseada con la mínima agua posible; con una proporción baja se logra

una mejor aplicación del mortero en la malla sin que se caiga y además se logra incrementar la resistencia del mortero.

#### 4.6.2.5.- *Abertura superior de acceso*

Para hacerla es válido un cubo o un cuenco de aproximadamente 0,5m de diámetro como el que se muestra en la figura 4.38. Éste se puede dejar in situ para que actúe como filtro. Entorno al cuenco se dispone el último aro restante que se ata al resto de la estructura y se recubre también de mortero.



Fig.4.38.- Ejecución de la abertura de acceso con el cuenco.

#### 4.6.2.6.- *Curado*

Una vez acabada la estructura, se cubre con un plástico y se deja curar durante 7 días. Durante el curado se irá humedeciendo dos veces al día para mantener una humedad alta en el proceso. Éste es uno de los puntos más importantes en la ejecución de la cubierta.

A los dos días de curado se aplica en los bordes superior e inferior del tanque una capa de masilla (pasta de cemento) para tapar las posibles grietas que puedan aparecer.

#### 4.6.2.7.- *Colocación de la cubierta en el tanque*

En cuanto a la colocación de la cubierta en el tanque, dependerá de las características del cuerpo de éste.

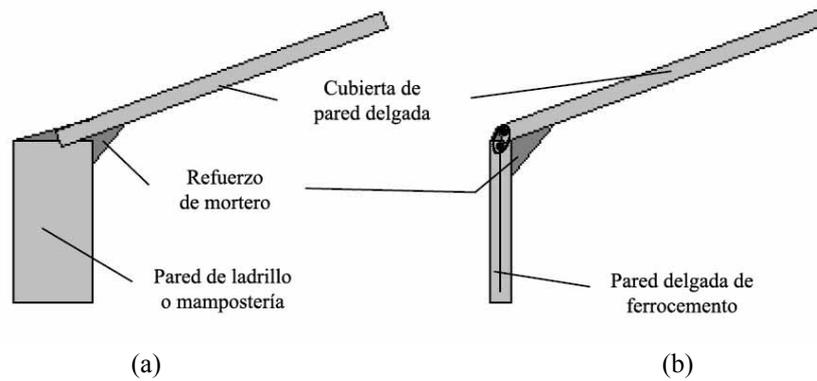


Fig.4.39.- Unión pared-cubierta en función del tipo de tanque.

Si la cubierta va a ir sobre una pared delgada de ferrocemento (fig.4.39a) entonces hay que dejar al menos 4 barras de la pared listos para atarlos a la estructura de cubierta.

En el caso de tener una pared de ladrillo o mampostería (fig.4.39b) entonces la cubierta se va a disponer sobre la pared suavizando la unión con una capa de mortero de refuerzo.

#### 4.6.2.8.- Prueba de carga

Acabada la cubierta se comprobó con una carga repartida de 1000kg en total y la flecha fue mínima (ver figura 4.40).

Posteriormente se aplicó una carga puntual de 160kg y los resultados fueron igualmente buenos, sin daños ni fisuras apreciables y una flecha mínima.



Fig.4.40.- Prueba de carga repartida sobre la cubierta acabada.

## 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  $10\text{m}^3$ .
- Tanque mediano de  $50\text{m}^3$ .
- Tanque grande de  $150\text{m}^3$ .

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  $\phi$  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  $\phi$  y mantener  $H$  en condiciones normales de trabajabilidad (accesibles para los trabajadores).

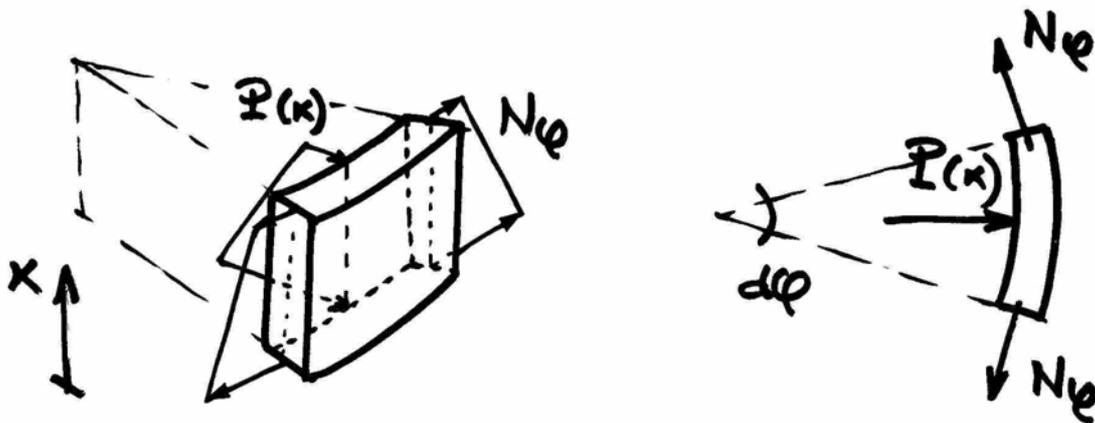


Fig.5.1.- Rebanada de elemento diferencial de pared.

## 5.2. – DIMENSIONAMIENTO DE UN TANQUE DE 10m<sup>3</sup>

### 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)

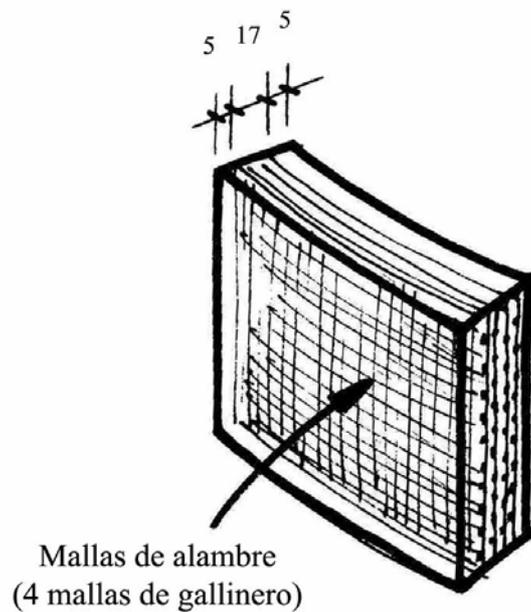


Fig.5.2.- Disposición de las mallas en el espesor de pared.

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 Llanes (2003) 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  $\sigma_{fi}$ , 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  $\zeta$ ,  $\rho_l$  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  $\sigma'_{cd}$ .

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 este estudio. 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.

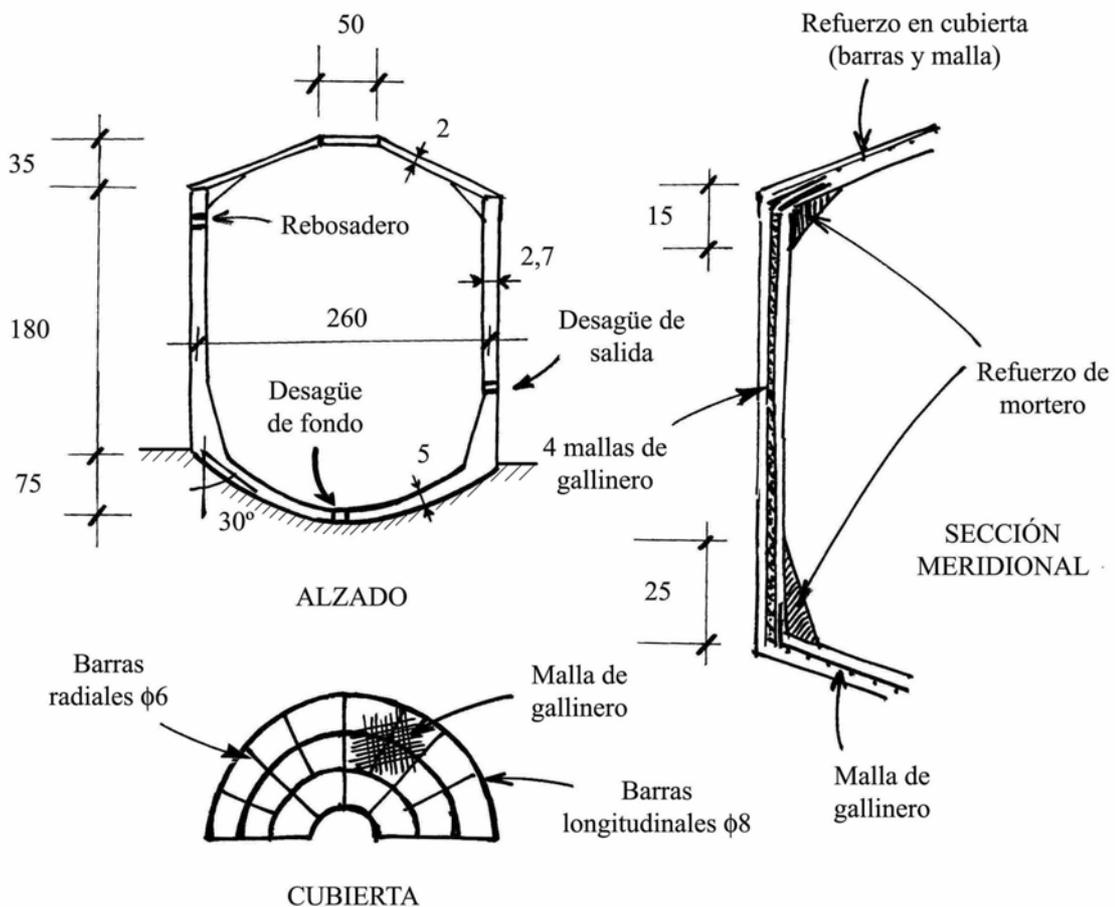


Fig.5.3.- Características y detalles de armado del depósito de 10m<sup>3</sup> (cotas en cm).

### 5.3.- DIMENSIONAMIENTO DE UN TANQUE DE 50m<sup>3</sup>

#### 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  $\varnothing 5$  y espaciamiento de 15cm ( $A_{sel} = \frac{\pi \cdot 5^2}{4} = 131 \text{ mm}^2/\text{ml}$ ). A la cual se van a atar las 4 mallas de gallinero (dos delante y 2 detrás).

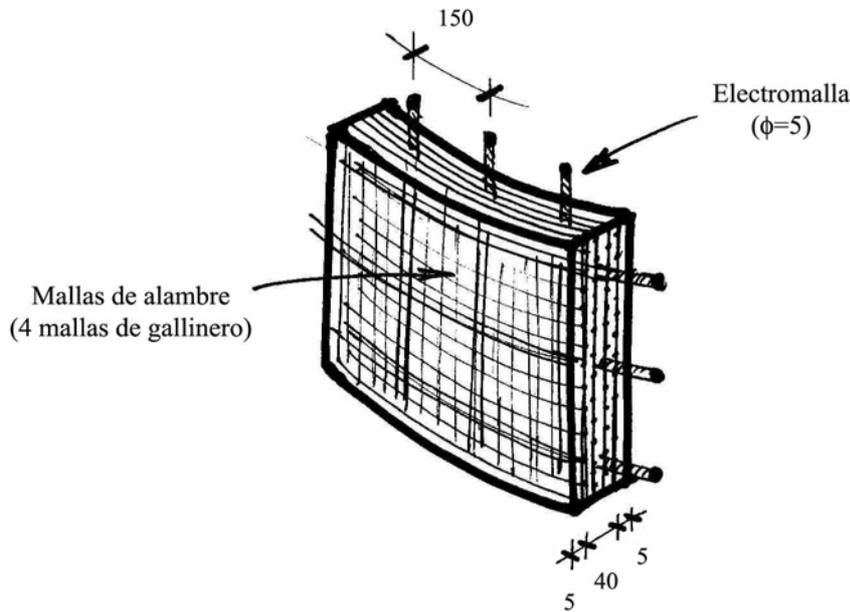


Fig.5.4.- Sección de pared para el depósito de 50m<sup>3</sup>.

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

$$S_r = \frac{4 \cdot V_{fm}}{\phi} = \frac{4 \cdot 0,009}{1,2} = 0,03 \text{ mm}^2 / \text{mm}^3 < 0,05$$

No se cumplen las directivas establecidas por Llanes (2003) 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  $\sigma_{ft}$ , 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  $\xi$ ,  $\rho_l$  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  $\sigma'_{cd}$ .

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 abertura 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.

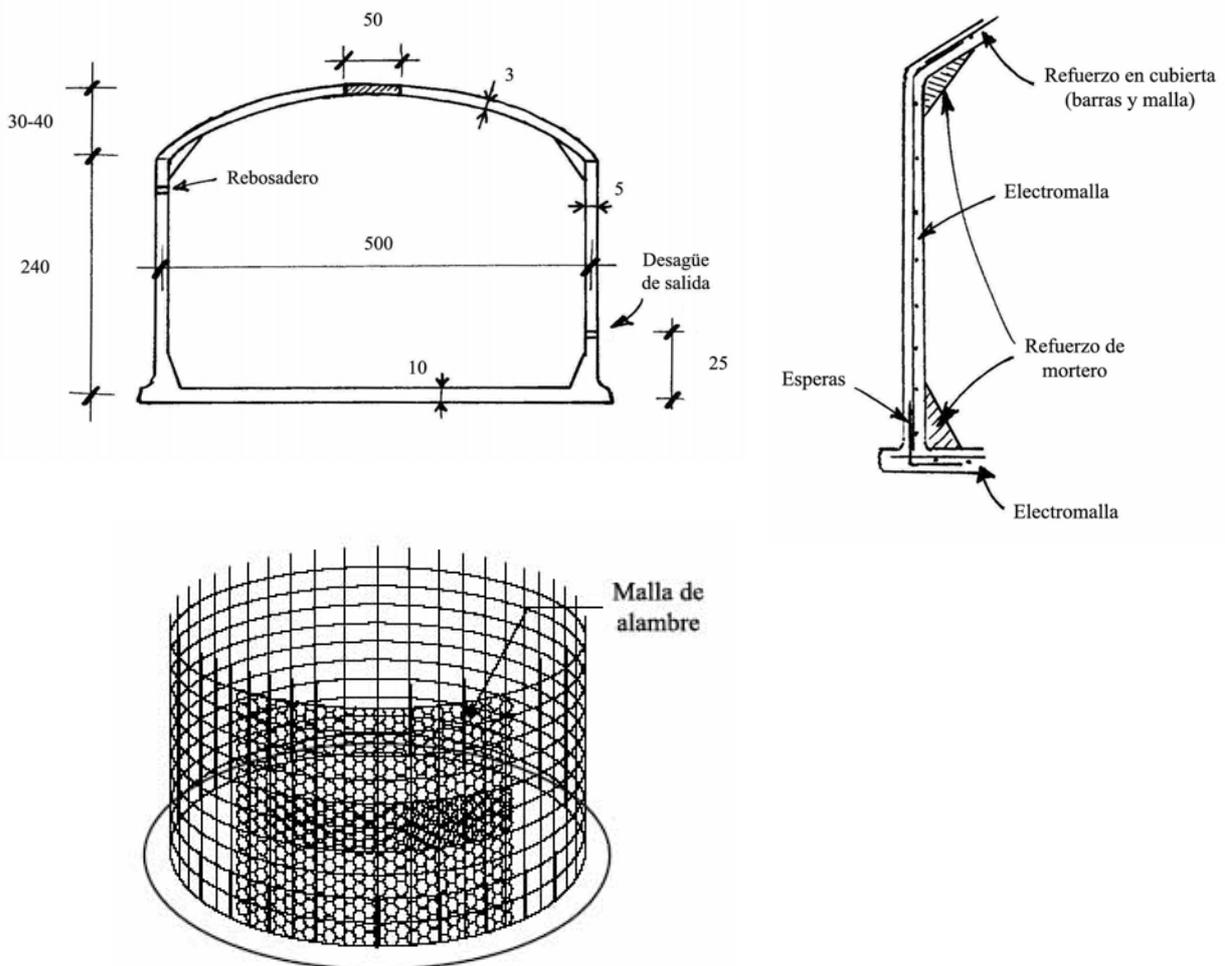


Fig.5.5.- Características y detalles del depósito de 50m<sup>3</sup> (cotas en cm).

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 (1986) 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 150m<sup>3</sup>

### 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 ( $A_{Set} = \frac{\pi \cdot 5^2 / 4}{0,15} = 131 \text{ mm}^2 / \text{ml}$ ). 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:

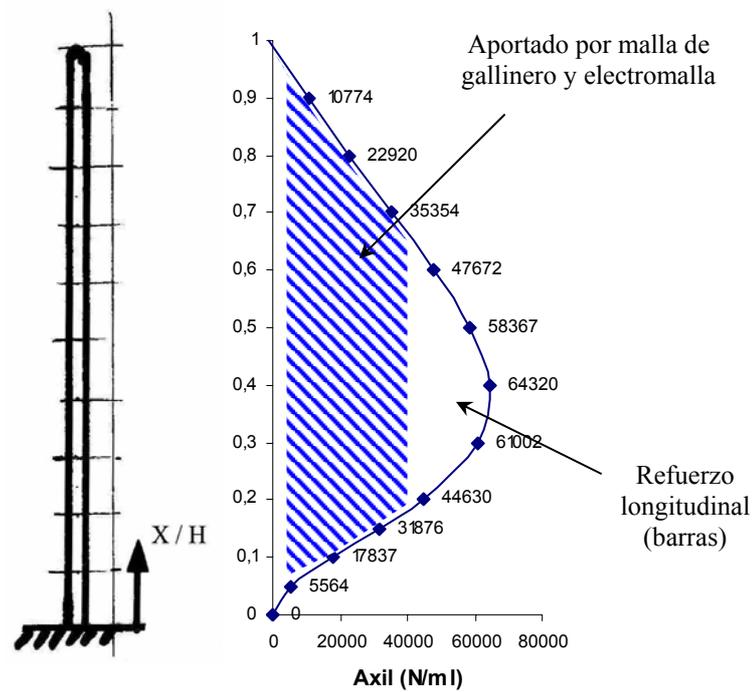


Fig.5.6.- Distribución de la ley de axiles en la pared.

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

X/H	$A_s$ (mm <sup>2</sup> /ml)	$A_{s \text{ ref}}$ (mm <sup>2</sup> )
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 ( $\text{mm}^2$ ) 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:

$$V_f = \frac{2 \cdot (A_{sm} + A_{sel})}{e_0 \cdot 1000} = \frac{2 \cdot (180 + 131)}{60 \cdot 1000} = 0,6 + 0,44 = 1,04\% < 1,8$$

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

$$S_r = \frac{4 \cdot V_{fm}}{\phi} = \frac{4 \cdot 0,006}{1,2} = 0,02 \text{ mm}^2 / \text{mm}^3 < 0,05$$

No se cumplen las directivas establecidas por Llanes (2003) 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  $\sigma_{ft}$ , 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  $\xi$ ,  $\rho_l$  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  $\sigma'_{cd}$ .

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,

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

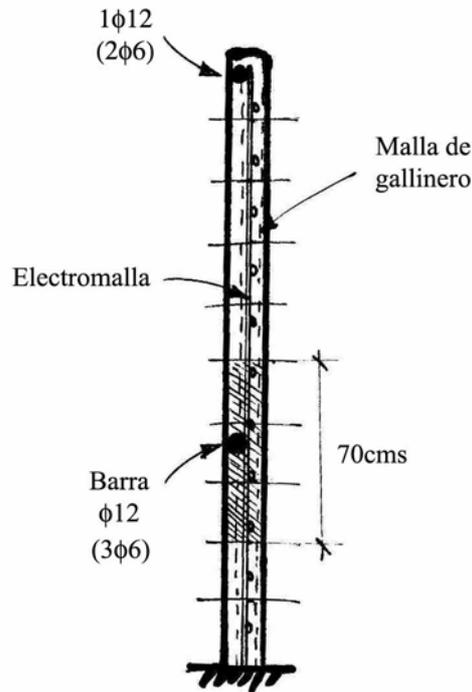


Fig.5.7.- Armadura en una sección transversal de pared.

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

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.

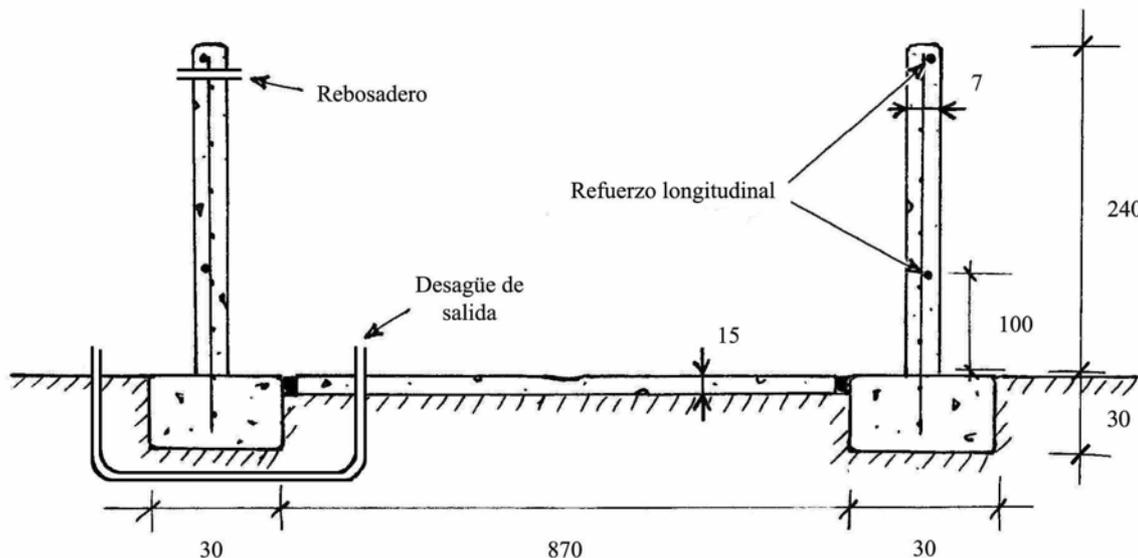
El espesor de la losa será de unos 10-15cm y su mezcla puede ser más gruesa que la del mortero de las paredes, se puede emplear hormigón 1:2:4 (cemento:grava:arena en volumen).

### 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 (1986) 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.



## **CAPÍTULO 6**

### **RESULTADOS**

#### **6.1.- INTRODUCCIÓN**

En este capítulo se recogen los resultados del estudio con el fin de facilitar el diseño de depósitos simplificándolo a modo de tablas. De esta manera uno puede obtener el diseño de un depósito así como los materiales necesarios sin necesidad de efectuar ningún cálculo.

Se van a presentar las tablas organizadas en dos grupos: un primer grupo con las tablas 1 a 7 correspondientes al dimensionamiento del depósito y un segundo grupo con las tablas 8 a 12 correspondientes a la cuantificación de materiales. Una última tabla (la tabla 15) recoge todos los resultados resumidos para una serie de depósitos representativos de los distintos modelos planteados en este estudio.

#### **6.2.- TABLAS**

##### **6.2.1.- Tablas para el dimensionamiento**

En las tablas 1 a 6 se ha dividido el dominio en 4 regiones

- Estructuras de ferrocemento. Estructuras que se pueden montar usando exclusivamente como armadura malla de gallinero, tal como el modelo descrito en 5.2. El tipo de malla considerado a este efecto tiene una abertura de 2,5cm y un diámetro de alambre de 1,2mm.

- Estructuras de mortero armado. Estructuras en las cuales es necesario el montaje de una malla electrosoldada en la pared. Estas estructuras siguen el modelo descrito en 5.3. La malla electrosoldada considerada en las tablas tiene un diámetro de alambraón de 5mm y un espaciamiento de 15cm.
- Estructuras de mortero armado con refuerzo longitudinal. En éstas, además de malla electrosoldada es necesaria la disposición de barras de refuerzo longitudinal a la altura del máximo esfuerzo longitudinal (aproximadamente un tercio de la altura del depósito). Estas estructuras siguen el modelo descrito en 5.4. En este caso, para la obtención del refuerzo longitudinal de barras hay que proceder como en el apartado 5.4.1.
- Dominio no contemplado ( $\beta \cdot H > 20$ ). Las estructuras pertenecientes a esta región tienen un ratio altura/diámetro excesivamente alto, motivo por el cual se ha optado por descartarlas.

En la tabla 7, en la cual se da el espesor de cubierta, hay 4 posibilidades

- Cubierta de tipo 1. Ésta sigue el mismo modelo de cubierta del depósito descrito en 5.2. La altura de cubierta será siempre de 35cm y el diámetro de la trampilla, de 50cm.
- Cubierta de tipo 2. Sigue el modelo de cubierta del depósito descrito en 5.3. La altura de cubierta será en este caso de 30 a 40cm. El diámetro de trampilla también será de 50cm.
- Sin cubierta. El diámetro del depósito (superior a 5m) es excesivo para la tecnología disponible. Esta cuestión ya se ha comentado en 5.4.3.
- Dominio no contemplado.

		Altura (m)																												
		1,00	1,10	1,20	1,30	1,40	1,50	1,60	1,70	1,80	1,90	2,00	2,10	2,20	2,30	2,40	2,50	2,60	2,70	2,80	2,90	3,00								
Radio (m)	0,50	1	1	1	1	Estructura de ferrocemento																								
	0,60	1	1	1	1	2	2	Estructura de ferrocemento															Estructura de mortero armado							
	0,70	2	2	2	2	2	2	2	3	3	Estructura de ferrocemento											Estructura de mortero armado								
	0,80	2	2	2	3	3	3	3	3	4	4	4	Estructura de ferrocemento										Estructura de mortero armado							
	0,90	3	3	3	3	4	4	4	4	5	5	5	5	6	6	Estructura de ferrocemento								Estructura de mortero armado						
	1,00	3	3	4	4	4	5	5	5	6	6	6	7	7	7	8	8	Estructura de ferrocemento						Estructura de mortero armado						
	1,10	4	4	5	5	5	6	6	6	7	7	8	8	8	9	9	10	10	10	10	11	11	11	11						
	1,20	5	5	5	6	6	7	7	8	8	9	9	10	10	10	10	11	11	12	12	13	13	14	14						
	1,30	5	6	6	7	7	8	8	9	10	10	11	11	12	12	13	13	14	14	15	15	16	16	16						
	1,40	6	7	7	8	9	9	10	10	11	12	12	13	14	14	15	15	16	17	17	18	18	18	18						
	1,50	7	8	8	9	10	11	11	12	13	13	14	15	16	16	17	18	18	19	19	20	20	21	21						
	1,60	8	9	10	10	11	12	13	14	15	16	17	18	18	19	20	21	22	22	23	23	24	24	24						
	1,70	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	25	26	26	27	27	27						
	1,80	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	28	29	29	29						
	1,90	11	12	14	15	16	17	18	19	20	22	23	24	25	26	27	28	29	31	32	33	34	34	34						
	2,00	13	14	15	16	18	19	20	21	23	24	25	26	28	29	30	31	33	34	35	36	38	38	38						
	2,25	16	17	19	21	22	24	25	27	29	30	32	33	35	37	38	40	41	43	45	46	48	48	48						
	2,50	20	22	24	26	27	29	31	33	35	37	39	41	43	45	47	49	51	53	55	57	59	59	59						
	2,75	24	26	29	31	33	36	38	40	43	45	48	50	52	55	57	59	62	64	67	69	71	71	71						
	3,00	28	31	34	37	40	42	45	48	51	54	57	59	62	65	68	71	74	76	79	82	85	85	85						
3,25	33	37	40	43	46	50	53	56	60	63	66	70	73	76	80	83	86	90	93	96	100	100	100							
3,50	38	42	46	50	54	58	62	65	69	73	77	81	85	89	92	96	100	104	108	112	115	115	115							
3,75	44	49	53	57	62	66	71	75	80	84	88	93	97	102	106	110	115	119	124	128	133	133	133							
4,00	50	55	60	65	70	75	80	85	90	96	101	106	111	116	121	126	131	136	141	146	151	151	151							
4,25	57	62	68	74	79	85	91	96	102	108	113	119	125	131	136	142	148	153	159	165	170	170	170							
4,50	64	70	76	83	89	95	102	108	115	121	127	134	140	146	153	159	165	172	178	184	191	191	191							
4,75	71	78	85	92	99	106	113	120	128	135	142	149	156	163	170	177	184	191	198	206	213	213	213							
5,00	79	86	94	102	110	118	126	134	141	149	157	165	173	181	188	196	204	212	220	228	236	236	236							
5,50	95	105	114	124	133	143	152	162	171	181	190	200	209	219	228	238	247	257	266	276	285	285	285							
6,00	113	124	136	147	158	170	181	192	204	215	226	238	249	260	271	283	294	305	317	328	339	339	339							
6,50	133	146	159	173	186	199	212	226	239	252	265	279	292	305	319	332	345	358	372	385	398	398	398							
7,00	154	169	185	200	216	231	246	262	277	292	308	323	339	354	369	385	400	416	431	446	462	462	462							
7,50	177	194	212	230	247	265	283	300	318	336	353	371	389	406	424	442	459	477	495	512	530	530	530							
8,00	201	221	241	261	281	302	322	342	362	382	402	422	442	462	483	503	523	543	563	583	603	603	603							
8,50	227	250	272	295	318	340	363	386	409	431	454	477	499	522	545	567	590	613	636	658	681	681	681							
9,00	254	280	305	331	356	382	407	433	458	483	509	534	560	585	611	636	662	687	713	738	763	763	763							
9,50	284	312	340	369	397	425	454	482	510	539	567	595	624	652	680	709	737	766	794	822	851	851	851							
10,00	314	346	377	408	440	471	503	534	565	597	628	660	691	723	754	785	817	848	880	911	942	942	942							

Estructura de ferrocemento

Estructura de mortero armado

Estructura M.A. con ref. longitudinal (barras)

Dominio no contemplado ( $\beta \cdot H > 20$ )

Tabla 6.1.- Capacidad del depósito (m<sup>3</sup>).

		Altura (m)																						
		1,00	1,10	1,20	1,30	1,40	1,50	1,60	1,70	1,80	1,90	2,00	2,10	2,20	2,30	2,40	2,50	2,60	2,70	2,80	2,90	3,00		
Radio (m)	0,50	14	14	15	15	Estructura de ferrocemento																		
	0,60	15	15	16	16	17	17	Estructura de mortero armado																
	0,70	15	16	17	17	18	18	19	19	20	Estructura de mortero armado													
	0,80	16	17	17	18	19	19	20	21	21	22	23	Estructura de mortero armado											
	0,90	17	17	18	19	20	20	21	22	23	23	24	25	26	26	Estructura de mortero armado								
	1,00	17	18	19	20	20	21	22	23	24	25	25	26	27	28	29	30	30	31	Estructura M.A. con ref. longitudinal (barras)				
	1,10	18	19	20	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	29	29	30	31	32	33	34	35	36	
	1,20	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
	1,30	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	
	1,40	19	21	22	23	24	25	26	27	28	29	31	32	33	34	35	37	38	39	40	41	43	45	
	1,50	20	21	22	23	25	26	27	28	29	31	32	33	34	36	37	38	39	41	42	44	45	47	
	1,60	21	22	23	24	25	27	28	29	30	31	32	33	34	36	37	38	40	41	42	44	45	47	
	1,70	21	22	24	25	26	27	29	30	31	33	34	36	37	38	40	41	43	44	46	47	49	50	
	1,80	21	23	24	25	27	28	30	31	32	34	35	37	38	40	41	43	44	46	47	49	50	52	
	1,90	22	23	25	26	27	29	30	32	33	35	36	38	40	41	43	44	46	47	49	51	52	54	
	2,00	22	24	25	27	28	30	31	33	34	36	38	39	41	42	44	46	47	49	51	52	54	58	
	2,25	23	25	26	28	30	31	33	35	37	38	40	42	44	46	47	49	51	53	55	56	58	62	
	2,50	24	26	28	29	31	33	35	37	39	41	43	45	47	49	51	53	56	58	60	62	64	66	
	2,75	25	27	29	31	33	35	37	39	41	43	45	47	49	51	53	56	58	60	62	64	66	70	
	3,00	26	28	30	32	34	36	38	40	43	45	47	49	52	54	56	59	61	63	65	68	70	74	
3,25	27	29	31	33	35	38	40	42	44	46	49	52	54	56	59	61	64	66	69	71	74	78		
3,50	27	29	32	34	36	39	41	44	46	49	51	54	56	59	61	64	67	69	72	74	77	81		
3,75	28	30	32	35	37	40	43	45	48	50	53	56	58	61	64	66	69	72	75	77	80	84		
4,00	28	31	33	36	38	41	44	46	49	52	55	57	60	63	66	69	72	74	77	80	83	87		
4,25	29	31	34	37	39	42	45	48	50	53	56	59	62	65	68	71	74	77	80	83	86	90		
4,50	29	32	35	37	40	43	46	49	52	55	58	61	64	67	70	73	76	79	82	86	89	93		
4,75	30	33	35	38	41	44	47	50	53	56	59	62	65	69	72	75	78	82	85	88	91	95		
5,00	30	33	36	39	42	45	48	51	54	57	61	64	67	70	74	77	80	84	87	91	94	98		
5,50	31	34	37	40	43	46	50	53	56	60	63	66	70	73	77	80	84	88	91	95	99	103		
6,00	32	35	38	41	44	48	51	55	58	62	65	69	72	76	80	84	87	91	95	99	103	107		
6,50	32	35	39	42	45	49	52	56	60	63	67	71	75	79	82	86	90	94	98	102	107	111		
7,00	33	36	39	43	46	50	54	57	61	65	69	73	77	81	85	89	93	97	101	106	110	114		
7,50	33	36	40	43	47	51	55	58	62	66	70	74	79	83	87	91	96	100	104	109	113	117		
8,00	33	37	40	44	48	51	55	59	63	68	72	76	80	85	89	93	98	102	107	111	116	120		
8,50	33	37	41	44	48	52	56	60	64	69	73	77	82	86	91	95	100	104	109	114	119	123		
9,00	34	37	41	45	49	53	57	61	65	70	74	78	83	87	92	97	102	106	111	116	121	125		
9,50	34	37	41	45	49	53	57	62	66	70	75	79	84	89	93	98	103	108	113	118	123	127		
10,00	34	38	41	45	49	54	58	62	67	71	76	80	85	90	95	100	105	110	115	119	124	128		

Estructura de ferrocemento

Estructura de mortero armado

Estructura M.A. con ref. longitudinal (barras)

Dominio no contemplado ( $\beta \cdot H > 20$ )

Tabla 6.2.-  
Espesor de pared (mm).

	Altura (m)																																					
	1,00	1,10	1,20	1,30	1,40	1,50	1,60	1,70	1,80	1,90	2,00	2,10	2,20	2,30	2,40	2,50	2,60	2,70	2,80	2,90	3,00																	
<b>0,50</b>	36	40	44	48	Estructura de ferrocemento																																	
<b>0,60</b>	43	46	51	56	60	65	Estructura de ferrocemento														Estructura de mortero armado																	
<b>0,70</b>	48	54	59	65	69	75	79	85	90	Estructura de ferrocemento											Estructura de mortero armado																	
<b>0,80</b>	55	60	67	72	78	84	90	96	103	108	114	Estructura de ferrocemento										Estructura de mortero armado																
<b>0,90</b>	60	67	73	80	87	94	100	106	113	120	127	134	140	147	Estructura de ferrocemento							Estructura de mortero armado																
<b>1,00</b>	66	73	80	87	94	102	109	117	124	132	139	146	153	161	169	176	184	192	Estructura de ferrocemento				Estructura de mortero armado															
<b>1,10</b>	71	79	87	94	102	111	119	127	135	142	151	159	167	175	184	192	200	208	216	225	233	Estructura de mortero armado																
<b>1,20</b>	76	85	93	102	111	119	128	136	145	154	163	171	180	189	198	207	216	224	233	242	251	Estructura de mortero armado																
<b>1,30</b>	81	90	99	109	118	127	136	146	155	165	174	183	192	202	211	221	230	240	250	260	268	Estructura de mortero armado																
<b>1,40</b>	85	95	105	115	124	135	145	155	165	175	185	195	205	215	225	235	245	256	266	276	286	Estructura de mortero armado																
<b>1,50</b>	90	101	112	121	132	142	153	163	175	185	195	206	217	227	238	249	260	271	282	293	303	Estructura de mortero armado																
<b>1,60</b>	95	105	116	128	139	149	161	172	184	194	206	218	228	240	251	263	274	285	297	309	320	Estructura de mortero armado																
<b>1,70</b>	99	111	123	134	145	157	169	181	193	204	216	228	239	251	264	276	287	300	312	325	336	Estructura de mortero armado																
<b>1,80</b>	102	115	128	139	151	164	176	188	200	213	226	238	251	263	276	288	302	314	327	339	353	Estructura de mortero armado																
<b>1,90</b>	107	120	132	145	157	171	184	196	209	222	235	249	261	275	288	302	315	328	341	355	369	Estructura de mortero armado																
<b>2,00</b>	112	124	137	150	164	176	191	204	218	231	244	259	272	286	300	313	328	342	355	370	384	Estructura de mortero armado																
<b>2,25</b>	121	134	148	164	178	192	208	222	237	251	267	282	297	312	327	343	358	374	389	404	421	Estructura de mortero armado																
<b>2,50</b>	129	144	159	175	192	207	223	239	255	271	287	304	320	337	354	370	387	404	421	438	455	Estructura de mortero armado																
<b>2,75</b>	137	153	169	186	203	220	237	255	272	290	308	325	344	362	379	397	415	434	452	471	488	Estructura de mortero armado																
<b>3,00</b>	143	161	179	197	215	233	250	269	288	307	327	344	364	384	403	422	442	461	480	500	520	Estructura de mortero armado																
<b>3,25</b>	149	168	187	206	226	244	264	284	302	323	344	363	384	404	425	446	466	488	508	530	550	Estructura de mortero armado																
<b>3,50</b>	157	174	195	215	234	255	277	296	318	338	360	380	403	424	445	468	489	512	534	556	579	Estructura de mortero armado																
<b>3,75</b>	161	182	201	223	243	266	286	309	330	352	375	397	421	443	465	488	512	535	558	581	606	Estructura de mortero armado																
<b>4,00</b>	165	188	207	231	252	275	297	319	344	366	389	412	438	461	485	508	533	556	581	607	632	Estructura de mortero armado																
<b>4,25</b>	171	191	216	237	259	284	307	330	353	378	404	429	453	478	503	528	553	579	604	630	656	Estructura de mortero armado																
<b>4,50</b>	174	198	220	243	269	293	316	341	366	390	416	441	467	493	520	546	573	597	624	652	679	Estructura de mortero armado																
<b>4,75</b>	179	201	224	251	275	300	325	350	376	403	429	453	480	508	535	563	589	617	642	674	700	Estructura de mortero armado																
<b>5,00</b>	181	208	231	256	281	307	333	360	386	411	439	466	495	521	550	579	605	635	665	693	722	Estructura de mortero armado																
<b>5,50</b>	189	215	241	267	293	318	346	375	404	431	461	488	519	547	578	607	639	668	700	731	761	Estructura de mortero armado																
<b>6,00</b>	194	220	247	276	301	330	360	388	419	447	480	509	539	572	603	634	665	700	732	764	797	Estructura de mortero armado																
<b>6,50</b>	201	224	253	283	309	341	369	402	431	462	496	527	559	592	624	657	691	725	759	794	828	Estructura de mortero armado																
<b>7,00</b>	202	231	257	288	316	349	379	410	445	477	510	543	577	611	645	681	716	749	785	822	859	Estructura de mortero armado																
<b>7,50</b>	206	232	264	292	326	357	388	420	453	487	521	556	591	628	664	698	735	773	808	847	886	Estructura de mortero armado																
<b>8,00</b>	205	237	265	299	330	362	395	428	463	498	534	571	604	642	680	715	755	791	831	868	910	Estructura de mortero armado																
<b>8,50</b>	209	242	271	301	332	370	399	435	471	507	545	579	617	657	693	734	771	809	852	891	930	Estructura de mortero armado																
<b>9,00</b>	212	240	276	307	339	373	408	444	477	515	554	589	630	667	708	747	786	825	869	910	951	Estructura de mortero armado																
<b>9,50</b>	215	243	273	306	339	375	411	448	487	521	562	598	640	679	717	757	802	843	885	927	970	Estructura de mortero armado																
<b>10,00</b>	216	245	276	310	344	380	418	451	491	526	568	605	649	688	729	770	812	854	897	940	986	Estructura de mortero armado																

Estructura de ferrocemento

Estructura de mortero armado

Estructura M.A. con ref. longitudinal (barras)

Dominio no contemplado ( $\beta \cdot H > 20$ )

Tabla 6.3.- Armadura de predimensionamiento  $A_{s0}$  (mm<sup>2</sup>/ml).

		Altura (m)																							
		1,00	1,10	1,20	1,30	1,40	1,50	1,60	1,70	1,80	1,90	2,00	2,10	2,20	2,30	2,40	2,50	2,60	2,70	2,80	2,90	3,00			
Radio (m)	0,50	1	1	1	2	Estructura de ferrocemento																			
	0,60	1	2	2	2	2	2	Estructura de ferrocemento															Estructura de mortero armado		
	0,70	2	2	2	2	2	2	2	2	3	Estructura de ferrocemento												Estructura de mortero armado		
	0,80	2	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	Estructura de ferrocemento									Estructura de mortero armado		
	0,90	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	4	4	Estructura de ferrocemento							Estructura de mortero armado		
	1,00	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4	Estructura de mortero armado					
	1,10	2	2	2	3	3	3	3	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4		
	1,20	2	2	3	3	3	3	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4		
	1,30	2	2	3	3	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4		
	1,40	2	3	3	3	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4		
	1,50	3	3	3	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4		
	1,60	3	3	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4		
	1,70	3	3	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4		
	1,80	3	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4		
	1,90	3	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4		
	2,00	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4		
	2,25	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4		
	2,50	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4		
	2,75	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4		
	3,00	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4		
3,25	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4			
3,50	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4			
3,75	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4			
4,00	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4			
4,25	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4			
4,50	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4			
4,75	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4			
5,00	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4			
5,50	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4			
6,00	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4			
6,50	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4			
7,00	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4			
7,50	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4			
8,00	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4			
8,50	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4			
9,00	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4			
9,50	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4			
10,00	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4			

Estructura de ferrocemento

Estructura de mortero armado

Estructura M.A. con ref. longitudinal (barras)

Dominio no contemplado ( $\beta \cdot H > 20$ )

Tabla 6.4.- N° de mallas de gallinero por sección de pared.

		Altura (m)																						
		1,00	1,10	1,20	1,30	1,40	1,50	1,60	1,70	1,80	1,90	2,00	2,10	2,20	2,30	2,40	2,50	2,60	2,70	2,80	2,90	3,00		
Radio (m)	0,50	28	29	30	31	Estructura de ferrocemento																		
	0,60	30	30	31	32	33	35	Estructura de mortero armado																
	0,70	31	32	33	34	35	37	38	39	40	Estructura de mortero armado													
	0,80	32	33	35	36	37	39	40	41	43	44	45	Estructura de mortero armado											
	0,90	33	35	36	38	39	41	42	44	45	47	48	50	51	53	Estructura de mortero armado								
	1,00	35	36	38	39	41	43	44	46	48	49	51	53	54	56	58	59	61	63	Estructura de mortero armado				
	1,10	36	38	39	41	43	45	46	48	50	52	53	55	57	59	61	63	65	67	69	71	72	Estructura con fer. longitudinal	
	1,20	37	39	41	43	45	47	48	50	52	54	56	58	60	62	64	66	68	70	73	75	77	Estructura con fer. longitudinal	
	1,30	38	40	42	44	46	48	50	52	55	57	59	61	63	65	67	70	72	74	77	79	81	Estructura con fer. longitudinal	
	1,40	39	41	43	46	48	50	52	54	57	59	61	64	66	68	71	73	75	78	80	83	85	Estructura con fer. longitudinal	
	1,50	40	42	45	47	49	52	54	56	59	61	64	66	69	71	74	76	79	81	84	87	89	Estructura con fer. longitudinal	
	1,60	41	43	46	48	51	53	56	58	61	63	66	69	71	74	77	79	82	85	88	90	93	Estructura con fer. longitudinal	
	1,70	42	45	47	50	52	55	57	60	63	66	69	71	74	77	80	83	85	88	91	94	97	Estructura con fer. longitudinal	
	1,80	43	46	48	51	54	57	59	62	65	68	71	74	77	80	83	86	89	92	95	98	101	Estructura con fer. longitudinal	
	1,90	44	47	49	52	55	58	61	64	67	70	73	76	79	82	85	89	92	95	98	101	105	Estructura con fer. longitudinal	
	2,00	45	48	51	53	57	59	63	66	69	72	75	79	82	85	88	91	95	98	101	105	108	Estructura con fer. longitudinal	
	2,25	47	50	53	56	59	63	67	70	73	77	81	84	88	91	95	99	102	106	109	113	117	Estructura con fer. longitudinal	
	2,50	49	52	55	59	63	66	70	74	78	82	85	89	93	97	101	105	109	113	117	121	125	Estructura con fer. longitudinal	
	2,75	50	54	58	61	65	69	73	78	82	86	90	94	99	103	107	111	116	120	124	129	133	Estructura con fer. longitudinal	
	3,00	52	56	60	64	68	73	77	81	86	90	95	99	103	108	113	117	122	126	131	136	140	Estructura con fer. longitudinal	
3,25	53	57	62	66	71	75	80	85	89	94	99	103	108	113	118	123	128	133	137	143	147	Estructura con fer. longitudinal		
3,50	55	59	63	68	73	78	83	87	93	97	103	107	113	118	123	128	133	139	144	149	150	Estructura con fer. longitudinal		
3,75	56	61	65	70	75	80	85	91	95	101	106	111	117	122	127	133	139	144	149	150	150	Estructura con fer. longitudinal		
4,00	57	62	66	72	77	82	88	93	99	104	109	115	121	126	132	138	143	149	150	150	150	Estructura con fer. longitudinal		
4,25	58	63	68	73	79	85	90	96	101	107	113	119	124	130	136	142	148	150	150	150	150	Estructura con fer. longitudinal		
4,50	59	64	70	75	81	87	92	98	104	110	116	122	128	134	140	146	150	150	150	150	150	Estructura con fer. longitudinal		
4,75	60	65	70	77	83	88	94	100	106	113	119	125	131	137	144	150	150	150	150	150	150	Estructura con fer. longitudinal		
5,00	60	67	72	78	84	90	96	102	109	114	121	128	134	141	147	150	150	150	150	150	150	Estructura con fer. longitudinal		
5,50	62	68	74	81	87	93	99	106	113	119	126	133	140	147	150	150	150	150	150	150	150	Estructura con fer. longitudinal		
6,00	63	69	76	83	89	96	103	109	117	123	131	138	145	150	150	150	150	150	150	150	150	Estructura con fer. longitudinal		
6,50	65	70	77	84	90	98	105	112	119	127	135	142	150	150	150	150	150	150	150	150	150	Estructura con fer. longitudinal		
7,00	65	72	78	86	92	100	107	114	123	130	138	146	150	150	150	150	150	150	150	150	150	Estructura con fer. longitudinal		
7,50	66	72	80	86	95	102	109	117	124	132	141	149	150	150	150	150	150	150	150	150	150	Estructura con fer. longitudinal		
8,00	66	74	80	88	95	103	111	119	127	135	144	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	Estructura con fer. longitudinal		
8,50	67	75	81	89	96	105	112	120	129	137	146	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	Estructura con fer. longitudinal		
9,00	68	74	83	90	98	106	114	122	130	139	148	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	Estructura con fer. longitudinal		
9,50	68	75	82	90	98	106	115	123	133	141	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	Estructura con fer. longitudinal		
10,00	69	75	83	91	99	107	116	124	133	142	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	Estructura con fer. longitudinal		

Estructura de ferrocemento

Estructura de mortero armado

Estructura con fer. longitudinal

Domnio no contemplado (β·H>20)

Tabla 6.5.-  
Espesor de solera (mm).

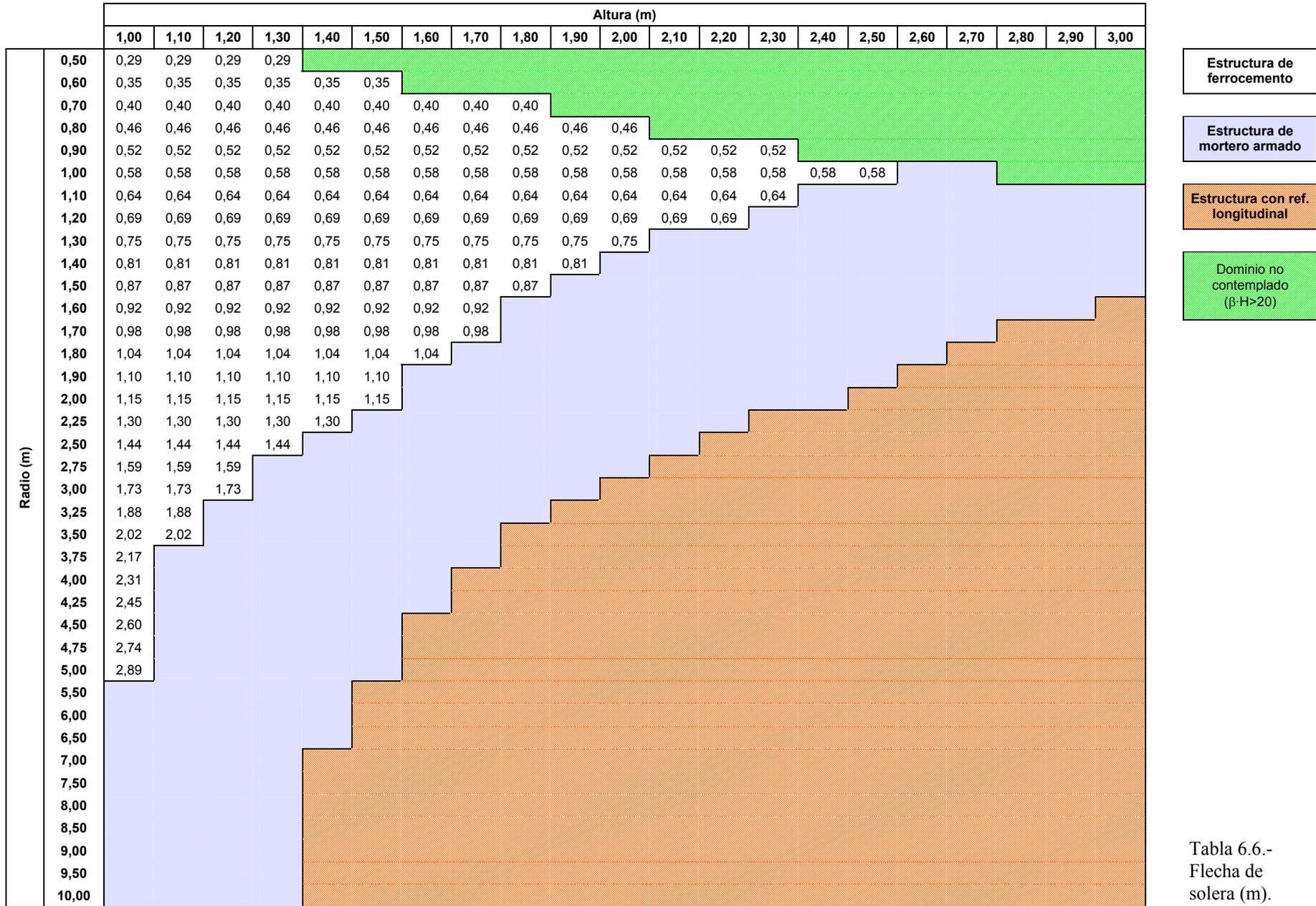


Tabla 6.6.-  
Flecha de solera (m).

		Altura (m)																																					
		1,00	1,10	1,20	1,30	1,40	1,50	1,60	1,70	1,80	1,90	2,00	2,10	2,20	2,30	2,40	2,50	2,60	2,70	2,80	2,90	3,00																	
Radio (m)	0,50	20	20	20	20	Dominio no contemplado (β·H>20)																																	
	0,60	20	20	20	20																		20	20															
	0,70	20	20	20	20																		20	20	20	20													
	0,80	20	20	20	20																		20	20	20	20	20	20											
	0,90	20	20	20	20																		20	20	20	20	20	20	20	20									
	1,00	20	20	20	20																		20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20					
	1,10	20	20	20	20																		20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	
	1,20	20	20	20	20																		20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
	1,30	20	20	20	20																		20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
	1,40	30	30	30	30																		30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
	1,50	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30																	
	1,60	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30																	
	1,70	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30																	
	1,80	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30																	
	1,90	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30																	
	2,00	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30																	
	2,25	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30																	
	2,50	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30																	
	2,75																																						
	3,00																																						
3,25																																							
3,50																																							
3,75																																							
4,00																																							
4,25																																							
4,50																																							
4,75																																							
5,00																																							
5,50																																							
6,00																																							
6,50																																							
7,00																																							
7,50																																							
8,00																																							
8,50																																							
9,00																																							
9,50																																							
10,00																																							

cubierta tipo 1

cubierta tipo 2

sin cubierta

Dominio no contemplado (β·H>20)

Tabla 6.7.-  
Espesor de cubierta (mm).

### **6.2.2.- Tablas para la cuantificación de materiales**

No se incluye una tabla específica para el refuerzo longitudinal de barras, luego, en caso de que la estructura a proyectar corresponda al tipo de *mortero armado con refuerzo longitudinal de barras* habrá que obtener dicho refuerzo longitudinal según el método descrito en 5.4.

		Altura (m)																					
		1,00	1,10	1,20	1,30	1,40	1,50	1,60	1,70	1,80	1,90	2,00	2,10	2,20	2,30	2,40	2,50	2,60	2,70	2,80	2,90	3,00	
Radio (m)	0,50	4,9	5,1	5,3	8,8																		
	0,60	6,2	9,7	10,3	10,9	11,5	12,1																
	0,70	11,1	11,8	12,5	13,2	13,9	14,6	15,3	15,9	22,8													
	0,80	13,3	14,1	14,9	15,7	16,4	17,2	24,3	25,5	26,7	27,8	29,0											
	0,90	15,6	16,5	17,4	18,3	19,2	26,7	28,0	29,3	30,7	32,0	33,3	34,6	45,7	47,4								
	1,00	18,2	19,1	20,1	21,1	29,0	30,4	31,9	33,4	34,8	36,3	47,6	49,6	51,5	53,5	55,5	57,4	56,1	58,1				
	1,10	20,8	21,9	23,0	31,1	32,7	34,3	36,0	37,6	39,2	51,1	53,2	55,4	57,5	59,7	57,9	60,1	62,2	64,4	66,5	68,7	70,9	
	1,20	23,7	24,9	33,1	34,9	36,6	38,4	40,2	52,0	54,3	56,7	59,0	61,4	63,7	61,4	63,7	66,1	68,4	70,8	73,2	75,5	77,9	
	1,30	26,7	28,0	36,9	38,8	40,7	42,7	54,8	57,3	59,9	62,4	65,0	62,0	64,6	67,1	69,7	72,2	74,8	77,3	79,9	82,4	85,0	
	1,40	30,2	39,1	41,2	43,3	45,3	47,4	60,4	63,2	65,9	68,7	65,0	67,8	70,5	73,3	76,0	78,8	81,5	84,3	87,0	89,8	92,5	
	1,50	40,9	43,1	45,3	47,6	49,8	63,0	66,0	68,9	71,8	67,4	70,4	73,3	76,3	79,2	82,2	85,1	88,0	91,0	93,9	96,9	99,8	
	1,60	44,9	47,3	49,7	52,0	65,4	68,5	71,6	74,8	69,5	72,7	75,8	79,0	82,1	85,2	88,4	91,5	94,7	97,8	100,9	104,1	107,2	
	1,70	49,1	51,6	54,1	56,6	70,8	74,1	77,5	80,8	74,7	78,0	81,4	84,7	88,0	91,4	94,7	98,1	101,4	104,7	108,1	111,4	114,7	
	1,80	53,4	56,1	58,7	72,9	76,4	79,9	83,5	76,4	79,9	83,5	87,0	90,5	94,1	97,6	101,1	104,7	108,2	111,7	115,3	118,8	122,3	
	1,90	57,9	60,7	63,5	78,5	82,2	85,9	77,8	81,6	85,3	89,0	92,8	96,5	100,2	103,9	107,7	111,4	115,1	118,9	122,6	126,3	130,0	
	2,00	62,6	65,5	80,3	84,2	88,1	92,0	82,9	86,8	90,7	94,7	98,6	102,5	106,4	110,4	114,3	118,2	122,1	126,1	130,0	133,9	137,8	
	2,25	75,0	78,3	94,8	99,3	103,7	91,5	96,0	100,4	104,8	109,2	113,6	118,0	122,5	126,9	131,3	135,7	140,1	144,5	149,0	153,4	157,8	
	2,50	88,4	105,5	110,5	115,4	99,8	104,7	109,6	114,5	119,4	124,4	129,3	134,2	139,1	144,0	148,9	153,8	158,7	163,6	168,5	173,4	178,3	
	2,75	78,7	84,1	89,5	70,2	75,6	81,0	86,4	91,8	97,2	102,6	108,0	113,4	118,8	124,2	129,5	134,9	140,3	145,7	151,1	156,5	161,9	
	3,00	88,3	94,2	100,1	76,6	82,4	88,3	94,2	100,1	106,0	111,9	117,8	123,7	129,5	135,4	141,3	147,2	153,1	159,0	164,9	170,8	176,7	
3,25	98,3	104,7	76,6	82,9	89,3	95,7	102,1	108,4	114,8	121,2	127,6	134,0	140,3	146,7	153,1	159,5	165,9	172,2	178,6	185,0	191,4		
3,50	108,8	115,6	82,4	89,3	96,2	103,1	109,9	116,8	123,7	130,5	137,4	144,3	151,1	158,0	164,9	171,8	178,6	185,5	192,4	199,2	206,1		
3,75	119,6	81,0	88,3	95,7	103,1	110,4	117,8	125,1	132,5	139,9	147,2	154,6	161,9	169,3	176,7	184,0	191,4	198,7	206,1	213,5	220,8		
4,00	130,9	86,4	94,2	102,1	109,9	117,8	125,6	133,5	141,3	149,2	157,0	164,9	172,7	180,6	188,4	196,3	204,1	212,0	219,8	227,7	235,5		
4,25	142,5	91,8	100,1	108,4	116,8	125,1	133,5	141,8	150,2	158,5	166,8	175,2	183,5	191,9	200,2	208,6	216,9	225,2	233,6	241,9	250,3		
4,50	154,6	97,2	106,0	114,8	123,7	132,5	141,3	150,2	159,0	167,8	176,7	185,5	194,3	203,2	212,0	220,8	229,7	238,5	247,3	256,2	265,0		
4,75	167,0	102,6	111,9	121,2	130,5	139,9	149,2	158,5	167,8	177,1	186,5	195,8	205,1	214,4	223,8	233,1	242,4	251,7	261,1	270,4	279,7		
5,00	179,9	108,0	117,8	127,6	137,4	147,2	157,0	166,8	176,7	186,5	196,3	206,1	215,9	225,7	235,5	245,4	255,2	265,0	274,8	284,6	294,4		
5,50	108,0	118,8	129,5	140,3	151,1	161,9	172,7	183,5	194,3	205,1	215,9	226,7	237,5	248,3	259,1	269,9	280,7	291,5	302,3	313,1	323,9		
6,00	117,8	129,5	141,3	153,1	164,9	176,7	188,4	200,2	212,0	223,8	235,5	247,3	259,1	270,9	282,7	294,4	306,2	318,0	329,8	341,5	353,3		
6,50	127,6	140,3	153,1	165,9	178,6	191,4	204,1	216,9	229,7	242,4	255,2	267,9	280,7	293,4	306,2	319,0	331,7	344,5	357,2	370,0	382,8		
7,00	137,4	151,1	164,9	178,6	192,4	206,1	219,8	233,6	247,3	261,1	274,8	288,5	302,3	316,0	329,8	343,5	357,2	371,0	384,7	398,5	412,2		
7,50	147,2	161,9	176,7	191,4	206,1	220,8	235,5	250,3	265,0	279,7	294,4	309,2	323,9	338,6	353,3	368,0	382,8	397,5	412,2	426,9	441,6		
8,00	157,0	172,7	188,4	204,1	219,8	235,5	251,2	266,9	282,7	298,4	314,1	329,8	345,5	361,2	376,9	392,6	408,3	424,0	439,7	455,4	471,1		
8,50	166,8	183,5	200,2	216,9	233,6	250,3	266,9	283,6	300,3	317,0	333,7	350,4	367,1	383,7	400,4	417,1	433,8	450,5	467,2	483,8	500,5		
9,00	176,7	194,3	212,0	229,7	247,3	265,0	282,7	300,3	318,0	335,7	353,3	371,0	388,6	406,3	424,0	441,6	459,3	477,0	494,6	512,3	530,0		
9,50	186,5	205,1	223,8	242,4	261,1	279,7	298,4	317,0	335,7	354,3	372,9	391,6	410,2	428,9	447,5	466,2	484,8	503,5	522,1	540,8	559,4		
10,00	196,3	215,9	235,5	255,2	274,8	294,4	314,1	333,7	353,3	372,9	392,6	412,2	431,8	451,5	471,1	490,7	510,3	530,0	549,6	569,2	588,9		

Estructura de ferrocemento

Estructura de mortero armado

Estructura M.A. con ref. longitudinal (barras)

Dominio no contemplado ( $\beta \cdot H > 20$ )

Tabla 6.8.- Malla de gallinero (kg).

Radio (m)	Altura (m)																				
	1,00	1,10	1,20	1,30	1,40	1,50	1,60	1,70	1,80	1,90	2,00	2,10	2,20	2,30	2,40	2,50	2,60	2,70	2,80	2,90	3,00
0,50																					
0,60																					
0,70																					
0,80																					
0,90																					
1,00																		113	113		
1,10															84	113	113	113	113	113	113
1,20														84	84	113	113	113	113	113	113
1,30													84	84	84	113	113	113	113	113	113
1,40												84	84	84	84	113	113	113	113	113	113
1,50											84	84	84	84	84	113	113	113	113	113	113
1,60											84	84	84	84	84	113	113	113	113	113	113
1,70											84	84	84	84	84	113	113	113	113	113	113
1,80										113	113	113	113	113	113	113	173	173	173	173	173
1,90										113	113	113	113	113	113	113	173	173	173	173	173
2,00										138	138	138	138	138	138	138	197	197	197	197	197
2,25										138	138	138	138	138	138	138	197	197	197	197	197
2,50										138	138	138	138	138	138	138	197	197	197	197	197
2,75										168	168	168	168	168	168	168	227	227	227	227	227
3,00										192	192	192	192	192	192	192	251	251	251	251	251
3,25										192	192	192	192	192	192	192	251	251	251	251	251
3,50										192	192	192	192	192	192	192	251	251	251	251	251
3,75										217	217	217	217	217	217	217	276	276	276	276	276
4,00										217	217	217	217	217	217	217	276	276	276	276	276
4,25										217	217	217	217	217	217	217	276	276	276	276	276
4,50										236	236	236	236	236	236	236	325	325	325	325	325
4,75										236	236	236	236	236	236	236	325	325	325	325	325
5,00										261	261	261	261	261	261	261	350	350	350	350	350
5,50										315	315	315	315	315	315	315	404	404	404	404	404
6,00										364	364	364	364	364	364	364	453	453	453	453	453
6,50										414	414	414	414	414	414	414	532	532	532	532	532
7,00										438	438	438	438	438	438	438	557	557	557	557	557
7,50										517	517	517	517	517	517	517	635	635	635	635	635
8,00										566	566	566	566	566	566	566	714	714	714	714	714
8,50										615	615	615	615	615	615	615	763	763	763	763	763
9,00										719	719	719	719	719	719	719	867	867	867	867	867
9,50										768	768	768	768	768	768	768	916	916	916	916	916
10,00										842	842	842	1019	1019	1019	1019	1019	1019	1019	1019	1019

Estructura de ferrocemento

Estructura de mortero armado

Estructura M.A. con ref. longitudinal (barras)

Dominio no contemplado ( $\beta \cdot H > 20$ )

Tabla 6.9.- Malla electro-soldada (kg).

		Altura (m)																								
		1,00	1,10	1,20	1,30	1,40	1,50	1,60	1,70	1,80	1,90	2,00	2,10	2,20	2,30	2,40	2,50	2,60	2,70	2,80	2,90	3,00				
Radio (m)	0,50	6,2	6,2	6,2	6,2	0,0																0,0				
	0,60	7,4	7,4	7,4	7,4	7,4	7,4	0,0													0,0					
	0,70	8,6	8,6	8,6	8,6	8,6	8,6	8,6	8,6	8,6	0,0											0,0				
	0,80	9,9	9,9	9,9	9,9	9,9	9,9	9,9	9,9	9,9	9,9	9,9	0,0								0,0					
	0,90	11,1	11,1	11,1	11,1	11,1	11,1	11,1	11,1	11,1	11,1	11,1	11,1	11,1	0,0						0,0					
	1,00	12,3	12,3	12,3	12,3	12,3	12,3	12,3	12,3	12,3	12,3	12,3	12,3	12,3	12,3	12,3	12,3	12,3	12,3	0,0			0,0			
	1,10	13,6	13,6	13,6	13,6	13,6	13,6	13,6	13,6	13,6	13,6	13,6	13,6	13,6	13,6	13,6	13,6	13,6	13,6	13,6	13,6	13,6	13,6			
	1,20	14,8	14,8	14,8	14,8	14,8	14,8	14,8	14,8	14,8	14,8	14,8	14,8	14,8	14,8	14,8	14,8	14,8	14,8	14,8	14,8	14,8	14,8			
	1,30	16,0	16,0	16,0	16,0	16,0	16,0	16,0	16,0	16,0	16,0	16,0	16,0	16,0	16,0	16,0	16,0	16,0	16,0	16,0	16,0	16,0	16,0			
	1,40	17,2	17,2	17,2	17,2	17,2	17,2	17,2	17,2	17,2	17,2	17,2	17,2	17,2	17,2	17,2	17,2	17,2	17,2	17,2	17,2	17,2	17,2			
	1,50	18,5	18,5	18,5	18,5	18,5	18,5	18,5	18,5	18,5	18,5	18,5	18,5	18,5	18,5	18,5	18,5	18,5	18,5	18,5	18,5	18,5	18,5			
	1,60	19,7	19,7	19,7	19,7	19,7	19,7	19,7	19,7	19,7	19,7	19,7	19,7	19,7	19,7	19,7	19,7	19,7	19,7	19,7	19,7	19,7	19,7			
	1,70	20,9	20,9	20,9	20,9	20,9	20,9	20,9	20,9	20,9	20,9	20,9	20,9	20,9	20,9	20,9	20,9	20,9	20,9	20,9	20,9	20,9	20,9			
	1,80	22,2	22,2	22,2	22,2	22,2	22,2	22,2	22,2	22,2	22,2	22,2	22,2	22,2	22,2	22,2	22,2	22,2	22,2	22,2	22,2	22,2	22,2			
	1,90	23,4	23,4	23,4	23,4	23,4	23,4	23,4	23,4	23,4	23,4	23,4	23,4	23,4	23,4	23,4	23,4	23,4	23,4	23,4	23,4	23,4	23,4			
	2,00	24,6	24,6	24,6	24,6	24,6	24,6	24,6	24,6	24,6	24,6	24,6	24,6	24,6	24,6	24,6	24,6	24,6	24,6	24,6	24,6	24,6	24,6			
	2,25	27,7	27,7	27,7	27,7	27,7	27,7	27,7	27,7	27,7	27,7	27,7	27,7	27,7	27,7	27,7	27,7	27,7	27,7	27,7	27,7	27,7	27,7			
	2,50	30,8	30,8	30,8	30,8	30,8	30,8	30,8	30,8	30,8	30,8	30,8	30,8	30,8	30,8	30,8	30,8	30,8	30,8	30,8	30,8	30,8	30,8			
	2,75	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0			
	3,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0			
3,25	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0				
3,50	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0				
3,75	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0				
4,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0				
4,25	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0				
4,50	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0				
4,75	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0				
5,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0				
5,50	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0				
6,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0				
6,50	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0				
7,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0				
7,50	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0				
8,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0				
8,50	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0				
9,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0				
9,50	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0				
10,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0				

Estructura de ferrocemento

Estructura de mortero armado

Estructura M.A. con ref. longitudinal (barras)

Dominio no contemplado ( $\beta \cdot H > 20$ )

Tabla 6.10.- Barras de cubierta (kg).

		Altura (m)																					
		1,00	1,10	1,20	1,30	1,40	1,50	1,60	1,70	1,80	1,90	2,00	2,10	2,20	2,30	2,40	2,50	2,60	2,70	2,80	2,90	3,00	
Radio (m)	0,50	0,10	0,20	0,20	0,20	Estructura de ferrocemento																	
	0,60	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	Estructura de mortero armado															
	0,70	0,20	0,20	0,20	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	Estructura de mortero armado												
	0,80	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,50	Estructura de mortero armado										
	0,90	0,30	0,30	0,40	0,40	0,40	0,40	0,50	0,50	0,50	0,50	0,60	0,60	0,60	0,60	Estructura de mortero armado							
	1,00	0,40	0,40	0,40	0,50	0,50	0,50	0,50	0,60	0,60	0,60	0,70	0,70	0,70	0,80	0,80	0,90	0,90	Estructura de mortero armado				
	1,10	0,40	0,50	0,50	0,50	0,60	0,60	0,60	0,70	0,70	0,80	0,80	0,80	0,90	0,90	0,90	0,90	1,00	1,00	1,10	1,10	1,20	1,20
	1,20	0,50	0,60	0,60	0,60	0,70	0,70	0,70	0,80	0,80	0,90	0,90	1,00	1,00	1,00	1,10	1,10	1,20	1,20	1,30	1,40	1,40	1,40
	1,30	0,60	0,60	0,70	0,70	0,80	0,80	0,90	0,90	1,00	1,00	1,10	1,10	1,10	1,20	1,20	1,30	1,40	1,40	1,50	1,50	1,60	1,70
	1,40	0,80	0,80	0,90	0,90	1,00	1,00	1,10	1,10	1,20	1,30	1,30	1,40	1,40	1,40	1,50	1,60	1,70	1,70	1,80	1,90	2,00	2,00
	1,50	0,90	0,90	1,00	1,00	1,10	1,20	1,20	1,30	1,40	1,40	1,50	1,60	1,60	1,70	1,80	1,90	2,00	2,10	2,20	2,30	2,40	2,30
	1,60	1,00	1,00	1,10	1,20	1,20	1,30	1,40	1,50	1,40	1,50	1,60	1,70	1,80	1,90	2,00	2,10	2,20	2,30	2,40	2,50	2,50	3,40
	1,70	1,10	1,20	1,20	1,30	1,40	1,50	1,60	1,60	1,60	1,70	1,80	1,90	2,00	2,10	2,20	2,30	2,40	2,50	2,50	3,50	3,60	3,70
	1,80	1,20	1,30	1,40	1,50	1,60	1,70	1,70	1,70	1,80	1,90	2,00	2,10	2,20	2,30	2,50	2,60	2,70	2,70	3,70	3,80	4,00	4,10
	1,90	1,40	1,40	1,50	1,60	1,70	1,80	1,80	1,90	2,00	2,10	2,20	2,30	2,50	2,60	2,70	2,90	3,90	4,10	4,20	4,40	4,40	4,50
	2,00	1,50	1,60	1,70	1,80	1,90	2,00	1,90	2,10	2,20	2,30	2,50	2,60	2,70	2,90	3,00	4,20	4,30	4,50	4,60	4,80	4,80	5,00
	2,25	1,90	2,00	2,20	2,30	2,40	2,30	2,50	2,60	2,80	2,90	3,10	3,30	3,50	4,70	4,90	5,10	5,30	5,50	5,70	5,90	6,10	6,10
	2,50	2,30	2,50	2,70	2,80	2,70	2,90	3,10	3,20	3,40	3,70	3,90	4,10	5,50	5,70	6,00	6,20	6,40	6,70	6,90	7,20	7,50	7,50
	2,75	2,10	2,30	2,50	2,30	2,50	2,80	3,00	3,20	3,50	3,70	4,00	5,60	5,80	6,10	6,40	6,70	6,90	7,30	7,60	7,90	8,20	8,20
	3,00	2,60	2,80	3,00	2,80	3,00	3,30	3,60	3,90	4,20	4,50	6,20	6,50	6,80	7,10	7,50	7,80	8,20	8,50	8,90	9,30	9,70	9,70
3,25	3,00	3,30	3,00	3,30	3,60	3,90	4,20	4,60	4,90	6,80	7,20	7,50	7,90	8,30	8,70	9,10	9,50	9,90	10,40	10,80	11,30	11,30	
3,50	3,50	3,80	3,50	3,80	4,20	4,60	5,00	5,30	7,40	7,80	8,20	8,60	9,10	9,50	10,00	10,50	11,00	11,50	12,00	12,50	12,90	12,90	
3,75	4,10	3,70	4,00	4,40	4,80	5,30	5,70	6,20	8,40	8,90	9,40	9,80	10,40	10,90	11,40	11,90	12,50	13,10	13,70	14,10	14,50	14,50	
4,00	4,60	4,20	4,60	5,10	5,50	6,10	6,60	9,00	9,50	10,00	10,60	11,10	11,70	12,30	12,90	13,50	14,20	14,90	15,30	15,70	16,10	16,10	
4,25	5,30	4,70	5,30	5,80	6,30	6,90	7,40	10,00	10,60	11,20	11,90	12,50	13,20	13,90	14,50	15,30	16,00	16,50	17,00	17,40	17,90	17,90	
4,50	6,00	5,40	5,90	6,50	7,10	7,80	10,50	11,20	11,80	12,50	13,20	13,90	14,70	15,50	16,30	17,10	17,80	18,20	18,70	19,20	19,70	19,70	
4,75	6,70	6,00	6,60	7,30	8,00	8,70	11,70	12,40	13,10	13,90	14,70	15,50	16,30	17,20	18,10	19,00	19,40	19,90	20,40	21,00	21,60	21,60	
5,00	7,40	6,70	7,40	8,10	8,90	9,70	12,80	13,70	14,50	15,30	16,20	17,10	18,10	19,00	20,00	20,70	21,20	21,80	22,30	22,90	23,50	23,50	
5,50	7,30	8,10	9,00	9,90	10,80	14,40	15,30	16,40	17,40	18,40	19,50	20,60	21,80	22,90	23,80	24,40	25,00	25,60	26,30	26,90	27,60	27,60	
6,00	8,70	9,70	10,70	11,90	12,90	16,90	18,10	19,30	20,60	21,80	23,20	24,50	25,80	27,00	27,60	28,30	29,00	29,70	30,50	31,20	32,00	32,00	
6,50	10,30	11,40	12,60	14,00	15,20	19,70	21,00	22,60	24,00	25,40	27,10	28,70	30,30	31,00	31,70	32,50	33,20	34,00	34,90	35,80	36,70	36,70	
7,00	11,90	13,30	14,60	16,20	21,00	22,70	24,30	25,90	27,80	29,50	31,30	33,20	34,50	35,30	36,10	36,90	37,80	38,60	39,60	40,60	41,60	41,60	
7,50	13,70	15,10	17,00	18,60	24,10	25,90	27,70	29,60	31,50	33,60	35,80	37,90	38,90	39,80	40,70	41,50	42,50	43,50	44,50	45,70	46,80	46,80	
8,00	15,40	17,40	19,10	21,30	27,10	29,20	31,30	33,50	35,80	38,20	40,60	42,80	43,60	44,50	45,50	46,40	47,50	48,60	49,80	51,00	52,30	52,30	
8,50	17,50	19,70	21,80	23,90	30,20	32,90	35,00	37,60	40,20	43,00	45,80	47,50	48,50	49,50	50,50	51,60	52,80	53,90	55,30	56,50	57,90	57,90	
9,00	19,70	21,80	24,50	27,00	33,90	36,50	39,30	42,20	44,90	48,00	51,30	52,60	53,70	54,70	55,80	57,00	58,20	59,50	61,00	62,40	63,90	63,90	
9,50	21,90	24,30	27,00	29,80	37,20	40,20	43,40	46,70	50,10	53,30	56,90	57,90	59,00	60,20	61,30	62,60	64,00	65,40	66,90	68,40	70,00	70,00	
10,00	24,30	27,00	29,90	33,10	41,10	44,50	48,00	51,30	55,20	58,70	62,40	63,40	64,60	65,80	67,10	68,50	69,90	71,40	73,00	73,00	76,40	76,40	

Estructura de ferrocemento

Estructura de mortero armado

Estructura M.A. con ref. longitudinal (barras)

Dominio no contemplado ( $\beta \cdot H > 20$ )

Tabla 6.11.- Volumen de arena (m<sup>3</sup>).

		Altura (m)																					
		1,00	1,10	1,20	1,30	1,40	1,50	1,60	1,70	1,80	1,90	2,00	2,10	2,20	2,30	2,40	2,50	2,60	2,70	2,80	2,90	3,00	
Radio (m)	0,50	55	110	110	110	Estructura de ferrocemento																	
	0,60	110	110	110	110	110	110	Estructura de ferrocemento															
	0,70	110	110	110	160	160	160	160	160	160	Estructura de ferrocemento												
	0,80	160	160	160	160	160	215	215	215	215	215	270	Estructura de ferrocemento										
	0,90	160	160	215	215	215	215	270	270	270	270	320	320	320	320	Estructura de ferrocemento							
	1,00	215	215	215	270	270	270	270	320	320	320	375	375	375	430	430	480	480	480	Estructura de ferrocemento			
	1,10	215	270	270	270	320	320	320	375	375	430	430	430	480	480	480	535	535	590	590	640	640	
	1,20	270	320	320	320	375	375	375	430	430	480	480	480	535	535	535	590	590	640	640	695	750	750
	1,30	320	320	375	375	430	430	480	480	535	535	590	590	590	640	640	695	750	800	800	855	910	
	1,40	430	430	480	480	535	535	590	590	640	695	640	695	750	750	800	855	910	910	960	1015	1070	
	1,50	480	480	535	535	590	640	640	695	750	695	750	800	855	855	910	960	1015	1070	1120	1175	1230	
	1,60	535	535	590	640	640	695	750	800	750	800	855	910	960	1015	1070	1120	1175	1230	1280	1335	1815	
	1,70	590	640	640	695	750	800	855	855	855	910	960	1015	1070	1120	1175	1230	1280	1335	1870	1920	1975	
	1,80	640	695	750	800	855	910	910	910	960	1015	1070	1120	1175	1230	1335	1390	1440	1975	2030	2135	2190	
	1,90	750	750	800	855	910	960	960	1015	1070	1120	1175	1230	1335	1390	1440	1550	2080	2190	2240	2350	2400	
	2,00	800	855	910	960	1015	1070	1015	1120	1175	1230	1335	1390	1440	1550	1600	2240	2295	2400	2455	2560	2670	
	2,25	1015	1070	1175	1230	1280	1230	1335	1390	1495	1550	1655	1760	1870	2510	2615	2720	2830	2935	3040	3150	3255	
	2,50	1230	1335	1440	1495	1440	1550	1655	1710	1815	1975	2080	2190	2935	3040	3200	3310	3415	3575	3680	3840	4000	
	2,75	1120	1230	1335	1230	1335	1495	1600	1710	1870	1975	2135	2990	3095	3255	3415	3575	3680	3895	4055	4215	4375	
	3,00	1390	1495	1600	1495	1600	1760	1920	2080	2240	2400	3310	3470	3630	3790	4000	4160	4375	4535	4750	4960	5175	
3,25	1600	1760	1600	1760	1920	2080	2240	2455	2615	3630	3840	4000	4215	4430	4640	4855	5070	5280	5550	5760	6030		
3,50	1870	2030	1870	2030	2240	2455	2670	2830	3950	4160	4375	4590	4855	5070	5335	5600	5870	6135	6400	6670	6880		
3,75	2190	1975	2135	2350	2560	2830	3040	3310	4480	4750	5015	5230	5550	5815	6080	6350	6670	6990	7310	7520	7735		
4,00	2455	2240	2455	2720	2935	3255	3520	4800	5070	5335	5655	5920	6240	6560	6880	7200	7575	7950	8160	8375	8590		
4,25	2830	2510	2830	3095	3360	3680	3950	5335	5655	5975	6350	6670	7040	7415	7735	8160	8535	8800	9070	9280	9550		
4,50	3200	2880	3150	3470	3790	4160	5600	5975	6295	6670	7040	7415	7840	8270	8695	9120	9495	9710	9975	10240	10510		
4,75	3575	3200	3520	3895	4270	4640	6240	6615	6990	7415	7840	8270	8695	9175	9655	10135	10350	10615	10880	11200	11520		
5,00	3950	3575	3950	4320	4750	5175	6830	7310	7735	8160	8640	9120	9655	10135	10670	11040	11310	11630	11895	12215	12535		
5,50	3895	4320	4800	5280	5760	7680	8160	8750	9280	9815	10400	10990	11630	12215	12695	13015	13335	13655	14030	14350	14720		
6,00	4640	5175	5710	6350	6880	9015	9655	10295	10990	11630	12375	13070	13760	14400	14720	15095	15470	15840	16270	16640	17070		
6,50	5495	6080	6720	7470	8110	10510	11200	12055	12800	13550	14455	15310	16160	16535	16910	17335	17710	18135	18615	19095	19575		
7,00	6350	7095	7790	8640	11200	12110	12960	13815	14830	15735	16695	17710	18400	18830	19255	19680	20160	20590	21120	21655	22190		
7,50	7310	8055	9070	9920	12855	13815	14775	15790	16800	17920	19095	20215	20750	21230	21710	22135	22670	23200	23735	24375	24960		
8,00	8215	9280	10190	11360	14455	15575	16695	17870	19095	20375	21655	22830	23255	23735	24270	24750	25335	25920	26560	27200	27895		
8,50	9335	10510	11630	12750	16110	17550	18670	20055	21440	22935	24430	25335	25870	26400	26935	27520	28160	28750	29495	30135	30880		
9,00	10510	11630	13070	14400	18080	19470	20960	22510	23950	25600	27360	28055	28640	29175	29760	30400	31040	31735	32535	33280	34080		
9,50	11680	12960	14400	15895	19840	21440	23150	24910	26720	28430	30350	30880	31470	32110	32695	33390	34135	34880	35680	36480	37335		
10,00	12960	14400	15950	17655	21920	23735	25600	27360	29440	31310	33280	33815	34455	35095	35790	36535	37280	38080	38935	38935	40750		

Estructura de ferrocemento

Estructura de mortero armado

Estructura M.A. con ref. longitudinal (barras)

Dominio no contemplado ( $\beta > 20$ )

Tabla 6.12.-  
Peso de cemento (kg).

### 6.3.- ACLARACIONES SOBRE EL MÉTODO

A continuación se describen algunas de los criterios adoptados para los cálculos en la elaboración de las tablas:

- Para la obtención del espesor, en las tablas se ha tomado como resistencia a tracción del mortero  $f'_{ct,m} = f_{ct,m}/1,5 = 1,10MPa$ , adoptando un factor de seguridad de 1,5 con respecto al resultado obtenido en los ensayos (Turner, 2000) facilitados en 2.5, para considerar un probable mal control en la ejecución.
- Las tablas no dan un valor del refuerzo longitudinal de barras en el caso de depósitos que lo requieran. En ese caso hay que proceder analíticamente en este paso (como se ha hecho en 5.4).
- El modelo obtiene el volumen de arena considerando que en  $1m^3$  de mortero tenemos  $1m^3$  de arena: el cemento se distribuye llenando los espacios entre la arena, mientras que el acero representa un volumen inferior al 3% del total.
- Posibilidad de actualización: una de las ventajas de las tablas es que están basadas en una formulación técnica analítica y se pueden actualizar al variar ciertos parámetros. Por ejemplo si se disponen de ensayos, se pueden montar las tablas con el valor de la resistencia a tracción del mortero que corresponda (pudiendo incluso llegar a reducir espesores).

### 6.4.- COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS

#### 6.4.1.- Mediciones

En este apartado se ha comprobado el funcionamiento de las tablas comparando los resultados con experiencias anteriores. Concretamente se han recogido mediciones incluidas en la obra *Ferrocement Water Tanks and their construction* (Watt, 1986).

Tanque de  $6m^3$  con  $R = 1m$ ;  $H = 2m$

Componente	Watt	Tablas
Espesor de pared	3cm	2,5cm
Cemento	400kg	375kg
Electromalla (espaciamento de 15cm y diámetro $\phi=5mm$ )	33kg	-
Malla de gallinero	18,5kg	47,6kg
Acero barras cubierta	-	12,3kg
Arena	$1m^3$	$0,70m^3$

Tanque de 10m<sup>3</sup> con R = 1,25m; H = 2m

Componente	Watt	Tablas
Espesor de pared	4cm	3cm
Cemento	600kg	535kg
Acero en alambre $\phi=2,5\text{mm}$	8kg	-
Malla de gallinero	18,3kg	62kg
Acero barras cubierta	-	15,4kg
Arena + Grava	1,5m <sup>3</sup>	1m <sup>3</sup>

Cabe decir que el modelo propuesto por Watt no incluye las mediciones correspondientes a la cubierta (sólo paredes y solera) en cambio, nuestro modelo sí.

Tanque de 40m<sup>3</sup> con R = 2,5m; H = 2m

Componente	Watt	Tablas
Espesor de pared	5cm	4,5cm
Cemento	2010kg	2080kg
Perfil angular 30x30x4mm (pared)	104kg	-
Acero en alambre $\phi=4\text{mm}$	90kg	-
Barras de refuerzo $\phi=8\text{mm}$	65kg	-
Electromalla (espaciamiento de 15cm y diámetro $\phi=5\text{mm}$ )	-	138kg
Malla de gallinero	-	129,3kg
Acero barras cubierta	-	31kg
Arena	3,8m <sup>3</sup>	3,9m <sup>3</sup>

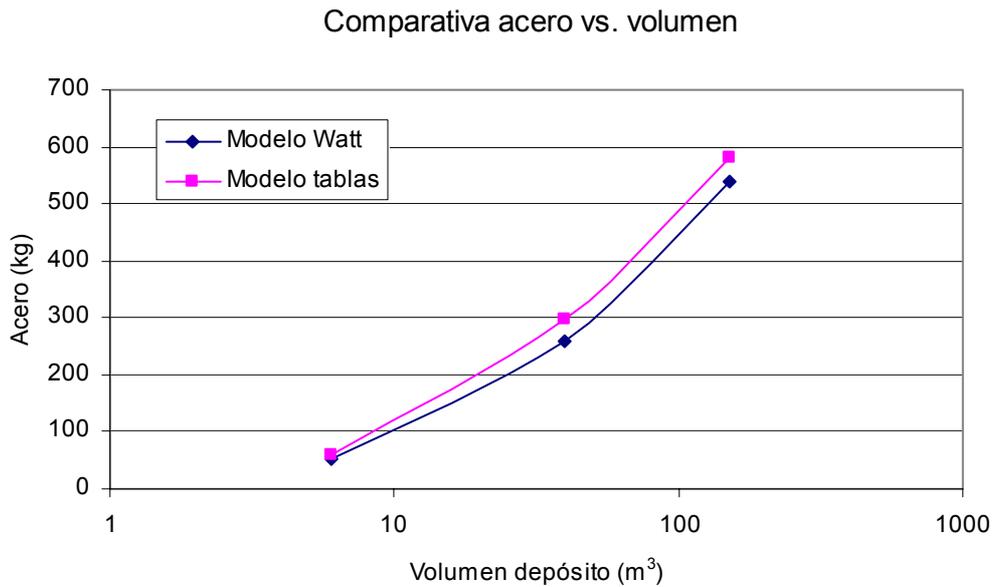
Tanque de 150m<sup>3</sup> con R = 5m; H = 2m

Componente	Watt	Tablas
Espesor de pared	7,5 - 8,5cm	6cm
Espesor de solera	10cm	13cm
Cemento	4400kg (6000kg)	8640kg
Acero en alambre $\phi=4\text{mm}$	118kg	-
Electromalla o barras $\phi=8\text{mm}$	250kg	350kg
Malla de gallinero o barras con $\phi=4\text{mm}$ y 2,3m longitud	180kg	196,3kg
Arena + grava	12,5m <sup>3</sup> (15,3m <sup>3</sup> )	16,2m <sup>3</sup>

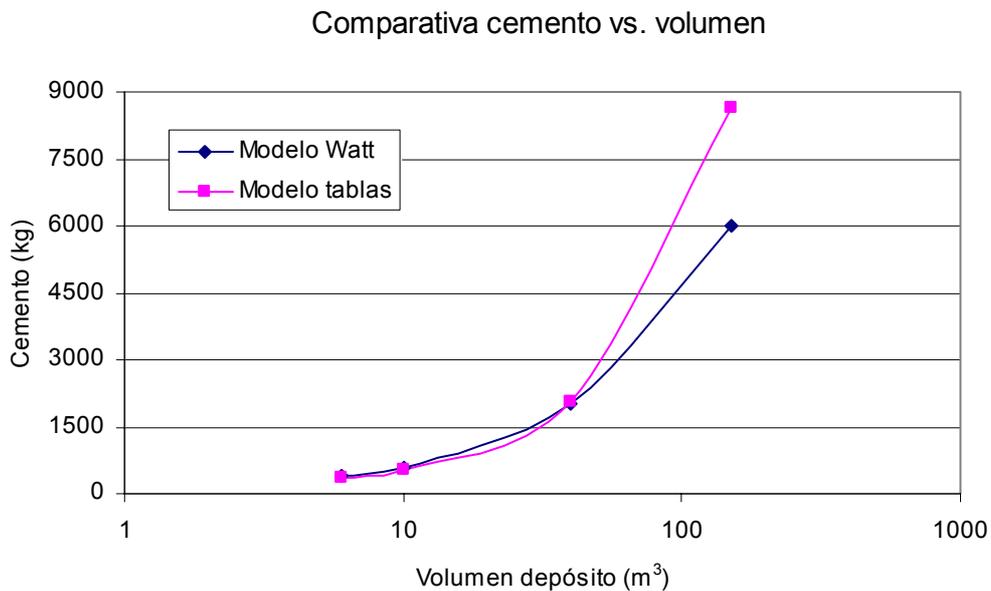
En este modelo, Watt no ha considerado el mortero correspondiente al anillo de cimentación, no así en el modelo propuesto en este estudio. Esto representa aproximadamente unos 3m<sup>3</sup> de mortero que reducirían en cierto modo las diferencias en cuanto a mediciones de

arena y cemento. Otra cuestión es que en nuestro modelo la solera es de 13cm, 3cm más gruesa que la propuesta por Watt.

### 6.4.2.- Gráficos

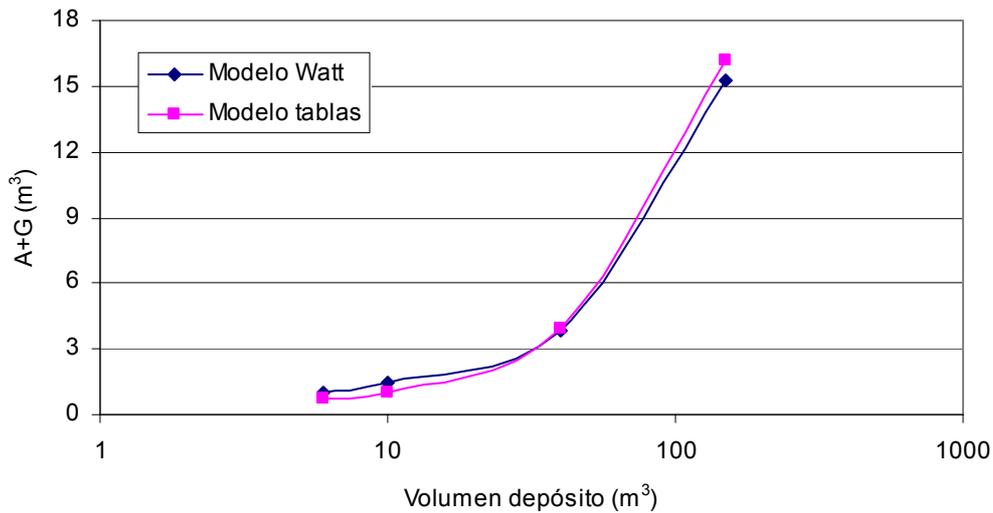


Apreciamos como la cantidad de acero obtenida con las tablas es ligeramente superior. Sin embargo el ajuste de las curvas es casi perfecto. En el caso del depósito de 150m<sup>3</sup> se ha añadido el peso de refuerzo longitudinal (no contemplado por las tablas).



En el caso del cemento podemos apreciar como hasta depósitos de  $50\text{m}^3$ , las cantidades prácticamente coinciden, no así a partir del depósito de  $150\text{m}^3$ .

Comparativa arena+grava vs. volumen



Los resultados para el volumen de arena dan prácticamente clavados en cualquiera de los depósitos.

#### 6.4.3.- Análisis de los resultados

Para depósitos pequeños y de tamaño mediano la coincidencia entre resultados experimentales y los proporcionados por las tablas es prácticamente perfecto.

Para depósitos grandes de  $150\text{m}^3$  los resultados difieren bastante en cuanto a peso de cemento: el exceso de cemento probablemente procede de la losa de base en la que se ha supuesto una mezcla 3:1 en arena/cemento. Watt por el contrario ha optado por una mezcla más gruesa de 1:2:4 (cemento, grava y arena en volumen) para la losa de base.

## **CAPÍTULO 7**

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

#### **7.1.- CONCLUSIONES GENERALES**

El ferrocemento como material de construcción, se encuentra en un proceso de expansión, la cantidad de artículos que sobre el tema se publica va cada día en aumento. Sin embargo, su costosa fabricación en países donde la mano de obra no es barata y la falta de métodos simplificados de diseño y de un reglamento o guía de proyecto hacen que su utilización en la práctica de la construcción sea hasta la fecha muy limitada.

Las posibilidades reales del ferrocemento son superiores en países donde la mano de obra es barata, ya que dentro de los sistemas de fabricación, hasta el momento empleados, la mano de obra representa un alto porcentaje en el coste final.

En opinión del autor, la utilización del ferrocemento como material de construcción, en países desarrollados, permanecerá enfocada a objetivos muy aislados hasta que no se logre desarrollar un sistema de fabricación que además de ser rentable garantice que el producto final coincida con los requerimientos de proyecto, es decir, separación entre mallas, espesor de recubrimiento y vibrado eficiente.

#### **7.2.- CONCLUSIONES ESPECÍFICAS**

Uno de los principales inconvenientes, sino el principal con el que el autor se ha encontrado ha sido la escasa formulación técnica relacionada con el tema del ferrocemento.

En este sentido se ha tenido que obtener una formulación específica empleada para el dimensionamiento de la pared.

Se ha observado que para obtener depósitos de ferrocemento estrictamente hablando, la capacidad no puede ser muy grande, por lo general, inferior a  $10\text{-}15\text{m}^3$ , a excepción de geometrías poco convencionales (diámetro grande y altura muy pequeña), para volúmenes mayores hay que emplear electromalla y entonces ya nos encontramos con una estructura con un comportamiento rígido y menos “laminar”, en este estudio llamada “mortero armado”. Es que las estructuras de ferrocemento reforzadas únicamente con malla de gallinero tienen una limitación en cuanto al esfuerzo soportable: la baja cuantía de las mallas hace que en cuanto el esfuerzo empieza a aumentar la cantidad de mallas necesarias se dispara, lo cual no es lógicamente viable. El límite dispuesto en este trabajo ha sido el de 4 mallas, en el caso de necesitar más mallas, ya se ha optado por disponer electromalla.

Para depósitos pequeños a medianos ( $10$  a  $50\text{m}^3$ ) los resultados que ofrecen las tablas son muy parecidos a las mediciones propuestas en proyectos anteriores. Sin embargo, para depósitos grandes ( $150\text{m}^3$ ) los resultados difieren en cuanto a volumen de arena necesario.

Se ha notado por los resultados en relación a la solera para depósitos con diámetro grande, las soleras que mejor funcionan son las soleras planas, mientras que para depósitos pequeños el uso de soleras esféricas proporciona a la estructura un mejor comportamiento como lámina, ideal para el uso de ferrocemento.

Conviene señalar que a pesar de que en las tablas se han intentado abarcar el mayor rango posible tanto de radios como de alturas, no es conveniente usarlas para obtener depósitos de diámetros superiores a  $10\text{m}$  aproximadamente, en los cuales, algunos efectos no considerados en el modelo como la retracción empiezan ya a ser importantes.

Un aspecto que se considera muy interesante en relación a estas tablas es su posibilidad de actualización: el hecho de que estén basadas en una formulación técnica analítica, hace que se puedan actualizar al variar ciertos parámetros. Por ejemplo, para la situación que se ha estudiado se ha adoptado  $f_{ct,m}=1,10\text{MPa}$ , sin embargo si se disponen de ensayos se puede montar las tablas con la  $f_{ct,m}$  que toque (así reducir espesores para morteros mejores). Esto incrementa aún más el ámbito de aplicación de estas tablas, es decir, no necesariamente deben aplicarse para países en vías de desarrollo, sino en general se podrán aplicar para cualquier tanque de ferrocemento.

### 7.3.- RECOMENDACIONES

Se recomienda ante todo el uso pero no abuso de la simplicidad constructiva que proporcionan estas tablas. Es decir, este trabajo da una guía de diseño para el técnico proyectista. Sin embargo, y ante todo conviene tener un cierto espíritu crítico ante los resultados que se pueden obtener de las tablas, sobretodo teniendo en cuenta la fase experimental en la que éstas se encuentran.

Se recomienda una vez más no tomar valores extremos, en opinión del autor, el rango para el que mejor van a funcionar las tablas es para valores intermedios, razonables. Los resultados obtenidos para valores extremos son fruto de una extrapolación numérica y conviene manejarlos con cautela.

#### **7.4.- FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN**

Hay algunos aspectos del trabajo en los que puede resultar interesante profundizar. Por ejemplo, una posible línea de investigación es la realización de un seguimiento de los depósitos ejecutados de acuerdo con el modelo propuesto.

Analizar al detalle el efecto de la retracción mediante modelos numéricos también se plantea como un punto interesante en relación a este estudio.

En el análisis del depósito por elementos finitos y más concretamente en el estudio de la solera puede ser de utilidad calcular más modelos para profundizar en su diseño. Parece ser que el diseño de la solera es determinante para el comportamiento del depósito. Así hay diseños que favorecen el comportamiento de lámina de la estructura más que otros.

Es necesaria la elaboración de una normativa técnica sobre ferrocemento, en relación a la cual se puedan referir proyectos de este tipo.

## REFERENCIAS

Acevedo, J. *Hormigón para el ferrocemento*. IV Conferencia Latinoamericana y del Caribe sobre ferrocemento. La Habana, 2003.

Acevedo, J. *Construcciones de bambú y ferrocemento en la reconstrucción de Armenia*. IV Conferencia Latinoamericana y del Caribe sobre ferrocemento. La Habana, 2003.

ACI Comité 549. *Ferrocement- Materials and Applications*. Detroit, 1979.

ACI Comité 549. *Guide for the Design, Construction, and Repair of Ferrocement*. Última revisión 1993.

ACI Comité 549. *State-of-the-Art Report on Ferrocement*. Última revisión 1997.

Barberio, V. *Capalas Delgadas de Ferrocemento para Una Instalación Ictica en el Rio Pirino*. Revista IMCYC (Mexico, D.F.), vol.13, n°74, May-June 1975.

Castro, J. *Ferrocement Roofing Manufactured on a Self-Help Basis*. Journal of Ferrocement (Bangkok) vol.7, n°1 Julio 1977.

Del Pozo, F. *Depósitos cilíndricos circulares*. Laboratorio central de ensayo de materiales de construcción, ETSICCP-UPM.

Development Technology Unit. *Low-cost, thin-shell, ferrocement tank cover*. Escuela de Ingeniería, Universidad de Warwick, año 2000.

Development Technology Unit. *Partially Below Ground tank for rainwater storage*. Escuela de Ingeniería, Universidad de Warwick, año 2000.

*Ferrocement: Applications in Developing Countries*. National Academy of Science, Washington, D.C., February 1973.

*Ferrocement*. Compendio de artículos publicados en la revista *Concrete International* (1983).

*Ferrocement Tanks and Utility Buildings*. Bulletin n° CP-10, New Zealand Portland Cement Association, Wellington, 1968.

Greenius, A.W. *Ferrocement for Canadian Fishing Vessels: A Summary and Interpretation of Test Results 1969-1974*. Industrial Development Branch, Fisheries and Marine Service, Environmental Canada, Ottawa, 1975.

Hagenbach, T.M. *Experience of 300 Commercially Built Craft in More Than 20 Countries*. FAQ Seminar on the Design and Construction of Ferrocement Fishing Vessels, Wellington, 1972.

Hanai, J.B. *Argamassa Armada, Fundamentos tecnológicos para proyectos e execucao*. Tesis doctoral, Sao Carlos, Brazil, 1987.

Hansen, F. *Investigation of the Effect of Amount and Distribution of reinforcement on the Physical Properties of Ferrocement*. Research Report n°2. Applied Scientific Research Corporation of Thailand, Bangkok, 1971.

Instrucción de Hormigón Estructural (EHE), edición año 2000.

Jimenez Montoya, P.; García Meseguer, A. y Morán Cabré, F. *Hormigón armado*. 14 edición. Barcelona, año 2000.

Kaushik, S.K. y Gupta, V.K. *Ferrocement. Applications and Progress*. Proceedings of the 3<sup>th</sup> International Symposium on Ferrocement. University of Roorkee, India. Ed. McGraw Hill, 1988.

Lea, F.M. *The Chemistry of Cement and Concrete*. St. Martin's Press. Nueva York, 1981.

Llanes Burón, C. *El ferrocemento: una opción frente a los desastres*. IV Conferencia Latinoamericana y del Caribe sobre ferrocemento. La Habana, 2003.

Llanes Burón, C. *Ferrocemento. Métodos de diseño*. IV Conferencia Latinoamericana y del Caribe sobre ferrocemento. La Habana, 2003.

Montes, L.R. *Estado del arte y estudio experimental sobre el comportamiento del ferrocemento a fatiga por flexión*. Tesina de especialidad ETSECCPB-UPC, 1991.

Murcia, J.; Aguado, A. y Marí, A. *Hormigón armado y pretensado – I*. Edicions UPC, 1993.

Naaman, A.E. *Deformance Criteria of Ferrocement*. Journal of Ferrocement, Vol.9, n°2 Abril, 1979.

Naaman, A.E. y Shah, S.P. *Evaluation of Ferrocement in Some Structural Applications*. Proceedings, 4<sup>th</sup> IAHS International Symposium on Housing Problems, Pergamon Press, Elmsford, 1976.

Nedwall, P.D. y Swamy, R.N. *Ferrocement*. Proceedings of the 5<sup>th</sup> International Symposium on Ferrocement. Ed. Chapman & Hall. Londres, 1994.

Nervi, P.L. *Costruire Correttamente. Caratteristiche e possibilità delle strutture cementizie armate*. Ed. Ulrico Hoepli. Milan, 1955.

Neville, A.M. *Properties of Concrete*. Pitman & Sons, USA, 1963.

*Norma de ferrocemento* (traducción al español), URSS, 1988.

Skinner, B.; Reed, B. y Shaw, R. *Ferrocement Water Tanks*. Loughborough University, Leicestershire, UK.

Smith, R.B.L. *Hermetic Storage for Rice for Thai Farmers*. Thai Journal for Agricultural Science, vol.4, July 1971.

Turner, S. *Design of Rainwater Storage Tanks for use in Developing Countries*. Departamento de Ingeniería, Universidad de Warwick, año 2000.

Vilardell, J.M. *Análisis estructural y criterios de diseño de depósitos cilíndricos*. Tesis doctoral ETSECCPB-UPC, 1994.

Wainshtok, H. *Ferrocemento. Diseño y construcción*. Ed. Félix Varela. La Habana, 1992, 1ª edición. Guayaquil, 1998, 3ª edición.

Wainshtok, H. *Uso del ferrocemento en Cuba*. IV Conferencia Latinoamericana y del Caribe sobre ferrocemento. La Habana, 2003.

Walkus, B.R. *State of cracking and Elongation of Ferrocement under Axial Load*. Parte I y II, Bulletin, Politecnic Institute Din Iarsi, Polonia, 1968-70.

Watt, S.B. *Ferrocement Water Tanks and their construction*. Intermediate Technology Publications, Londres, 1978, 1ª edición. Última edición 1986.

## ANEJO 1

### RESULTADOS DEL ENSAYO DE RETRACCIÓN LIBRE

En este anejo se transcriben, dado su interés, los resultados alcanzados por Turnen (2000).

#### A1.1.- RESULTADOS PARA LA MUESTRA DE MORTERO SIN ARMAR

Día	Cara A	Cara B	Deformación media ( $\times 10^{-6}$ )
1	0	0	0
4	-97	-16	-57
5	-178	-203	-190
6	-81	-81	-81
7	41	49	45
8	194	186	190
11	502	486	494
12	583	551	567
14	753	753	753
18	1029	972	1000
22	1215	1191	1203
28	1361	1345	1353

**A1.2.- RESULTADOS PARA LA MUESTRA DE MORTERO ARMADO CON MALLA DE GALLINERO**

Día	Cara A	Cara B	Deformación media ( $\times 10^{-6}$ )
1	0	0	0
4	-81	-32	-57
5	-97	-138	-117
6	-81	-32	-57
7	41	24	32
8	194	186	190
11	502	486	494
12	583	551	567
14	753	753	753
18	956	915	936
22	1150	1110	1130
28	1320	1337	1328

**A1.2.- RESULTADOS PARA LA MUESTRA DE MORTERO ARMADO CON MALLA CUADRADA**

Día	Cara A	Cara B	Deformación media ( $\times 10^{-6}$ )
1	0	0	0
2	-122	-146	-134
5	-81	-130	-105
6	-154	-186	-170
7	32	16	24
8	170	146	158
9	300	292	296
12	425	409	417
13	490	465	478
15	660	627	644
19	911	935	923
23	968	976	972
28	1105	1122	1113

## **ANEJO 2**

# **CÁLCULO DE DEPÓSITOS CILÍNDRICOS CIRCULARES SEGÚN LA TEORÍA DE LÁMINAS**

### **A2.1.- INTRODUCCIÓN**

En el capítulo 3 se ha desarrollado una formulación para el dimensionamiento y comprobación de depósitos basada en el cálculo de esfuerzos en un depósito según la teoría de láminas que se recoge en la obra de Florencio Del Pozo *Depósitos cilíndricos circulares*.

Este procedimiento de cálculo resulta de asimilar la pared del depósito a una lámina de espesor constante con simetría de revolución y sollicitación también simétrica (presión hidrostática) respecto al eje de revolución. Aceptando las simplificaciones usuales en el cálculo de láminas, se trata de uno de los pocos casos en que la teoría conduce a una solución explícita muy sencilla.

### **A2.2.- DESARROLLO DEL CÁLCULO**

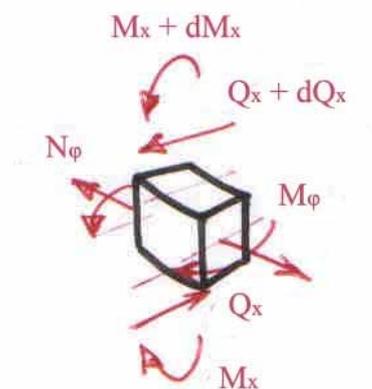
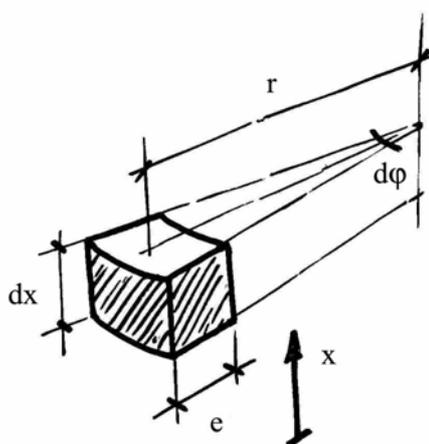
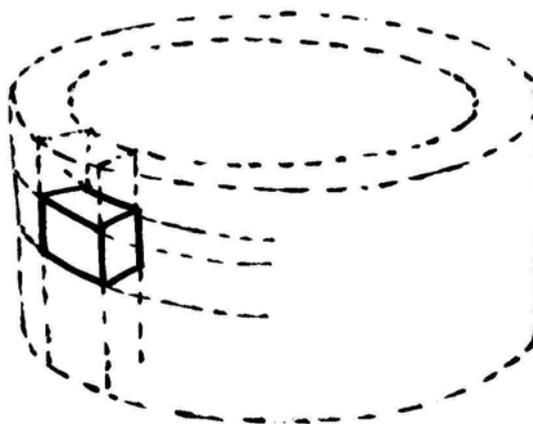
Los depósitos cuya superficie media es un cilindro de directriz circular con generatrices verticales, constituyen un caso particular de las láminas de revolución, en el que las cargas exteriores tienen simetría de revolución, y por lo tanto les serán aplicables los desarrollos y simplificaciones de la teoría elástica para este tipo de estructuras.

En lo que sigue se desarrollará el cálculo de una manera formal, aceptando todas las hipótesis que se admiten en la teoría elástica de las láminas.

Los esfuerzos que actuarán en un elemento diferencial serán los que se indican a continuación (ver pág. siguiente); es decir, un esfuerzo circunferencial normal  $N_\varphi$ , los momentos flectores  $M_x$  y  $M_\varphi$  y el esfuerzo cortante  $Q_x$ . De estos esfuerzos, al considerar cargas con simetría de revolución,  $N_\varphi$  y  $M_\varphi$  serán independientes de la coordenada angular  $\varphi$ .

Se prescinde de las cargas verticales sobre la pared del depósito, ya que si tienen simetría de revolución, producirán unos esfuerzos  $N_x$  cuyos efectos sobre el elemento corresponden a los de una sollicitación axial pura y pueden analizarse muy simplemente.

Con la condición de simetría impuesta a las cargas, solamente se considerará una presión normal  $p$  en dirección radial, variable con la coordenada  $x$ , pero independiente de  $\varphi$ .



Dado un elemento diferencial como el definido en la figura, planteando equilibrio de fuerzas y momentos, y admitiendo que los esfuerzos sólo varían según el eje x (simetría radial tanto de esfuerzos como de geometría) obtenemos:

$$\sum F_r = 0, \quad \frac{dQ_x}{dx} \cdot r \cdot d\varphi \cdot dx - N_\varphi \cdot dx \cdot d\varphi + p \cdot r \cdot d\varphi \cdot dx = 0$$

(donde  $2N_\varphi \cdot dx \frac{d\varphi}{2} = N_\varphi \cdot dx \cdot d\varphi$ )

$$\boxed{\frac{dQ_x}{dx} - \frac{N_\varphi}{r} + p = 0} \quad (\text{A2.1})$$

$$\sum M_{\text{paralelo}} = 0, \quad \frac{dM_x}{dx} dx \cdot r \cdot d\varphi + Q_x \cdot r \cdot d\varphi \cdot dx = 0$$

$$\boxed{\frac{dM_x}{dx} + Q_x = 0} \quad (\text{A2.2})$$

A partir de las ecuaciones A2.1 i A2.2 llegamos a

$$\frac{d^2 M}{dx^2} + \frac{N_\varphi}{r} - p = 0$$

siendo  $N_\varphi = \frac{E \cdot e}{r} w$

$$M_x = \frac{E \cdot e^3}{12(1-\nu^2)} \frac{d^2 w}{dx^2}$$

$$M_\varphi = \nu \cdot M_x$$

resulta

$$\boxed{\frac{d^2}{dx^2} \left[ \frac{E \cdot e^3}{12(1-\nu^2)} \frac{d^2 w}{dx^2} \right] + \frac{E \cdot e}{r^2} w - p = 0} \quad (\text{A2.3})$$

Esta ecuación diferencial de cuarto grado resuelve el problema para el caso general de espesor variable  $e(x)$ .

### A2.2.1.- Depósitos de espesor de pared constante

Si suponemos espesor de pared  $e$  constante, la ecuación anterior queda

$$\frac{E \cdot e^3}{12(1-\nu^2)} \frac{d^4 w}{dx^4} + \frac{E \cdot e}{r^2} w = p$$

expresión que suele presentar-se de la forma

$$\boxed{\frac{d^4 w}{dx^4} + 4\beta^4 w = \frac{p}{D}} \quad (\text{A2.4})$$

donde  $D = \frac{E \cdot e^3}{12(1-\nu^2)}$

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{3(1-\nu^2)}{r^2 \cdot e^2}}$$

La solución de esta ecuación diferencial es la siguiente

$$\boxed{w = w_p + e^{\beta x} [K_1 \cdot \cos \beta x + K_2 \cdot \sin \beta x] + e^{-\beta x} [K_3 \cdot \cos \beta x + K_4 \cdot \sin \beta x]} \quad (\text{A2.5})$$

donde  $w_p$  es una solución particular de la ecuación diferencial y  $K_1, K_2, K_3, K_4$  constantes de integración a determinar en cada caso particular en función de las condiciones de contorno del depósito.

A partir del valor de  $w$  y teniendo en cuenta que

$$N_\phi = \frac{E \cdot e \cdot w}{r} \quad M_x = \frac{E \cdot e^3}{12(1-\nu^2)} \frac{d^2 w}{dx^2} \quad Q_x = -\frac{E \cdot e^3}{12(1-\nu^2)} \frac{d^3 w}{dx^3}$$

se puede determinar el estado tensional de un depósito de espesor constante, sea cual sea el tipo de sustentación en los bordes.

### A2.2.2.- Solución del problema para el caso de un depósito empotrado en el fondo

En el caso de un depósito lleno, libre en el borde superior y rígidamente empotrado en el borde inferior tendremos

$$p(x) = \gamma \cdot (H - x)$$

con lo cual, de la ecuación 3 obtenemos directamente una solución particular

$$w_p = \frac{\gamma \cdot r^2}{E \cdot e} (H - x)$$

de esta expresión se deduce también las soluciones particulares para los diversos esfuerzos planteados

$$N_{\phi p} = \gamma \cdot r \cdot (H - x) \qquad M_{xp} = Q_{xp} = 0$$

### Condiciones de contorno

$$\text{borde inferior:} \qquad w|_{x=0} = 0; \qquad \left. \frac{dw}{dx} \right|_{x=0} = 0$$

$$\text{borde superior:} \qquad M_x|_{x=H} = 0; \qquad Q_x|_{x=H} = 0$$

si se supone además que el depósito cumple por sus dimensiones, la condición que la acción en un borde no tiene influencia en el otro se simplifica el problema, de forma que

$$K_1 = K_2 = 0 \qquad K_3 = -\frac{\gamma \cdot r^2 \cdot H}{E \cdot e}$$

$$K_4 = \frac{\gamma \cdot r^2 \cdot H}{E \cdot e} \left( \frac{1}{\beta \cdot H} - 1 \right)$$

con lo cual se llega a las expresiones simplificadas siguientes

$$w = \frac{\gamma \cdot r^2}{E \cdot e} H \left[ 1 - \frac{x}{H} + e^{-\beta x} \left( -\cos \beta x - \sin \beta x + \frac{1}{\beta \cdot H} \sin \beta x \right) \right]$$

$$N_{\phi} = \gamma \cdot r \cdot H \left[ 1 - \frac{x}{H} + e^{-\beta x} \left( -\cos \beta x - \sin \beta x + \frac{1}{\beta \cdot H} \sin \beta x \right) \right]$$

$$M_x = \frac{\gamma \cdot r \cdot e \cdot H}{2\sqrt{3}(1-\nu^2)} e^{-\beta x} \left[ -\sin \beta x + \cos \beta x - \frac{1}{\beta \cdot H} \cos \beta x \right]$$

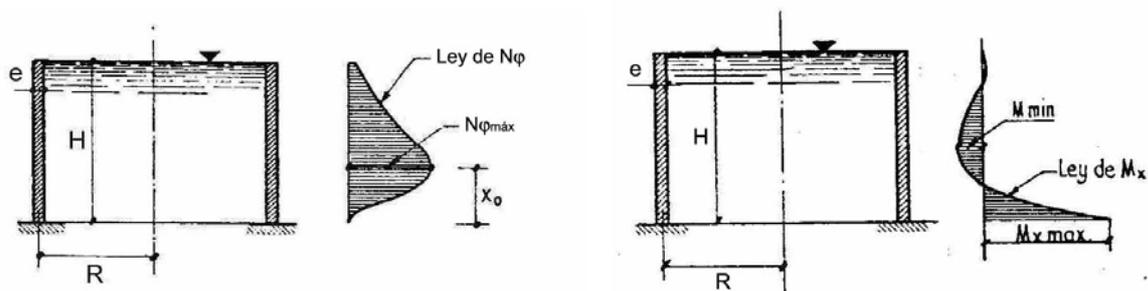
$$Q_x = -\frac{\gamma \cdot H \cdot \sqrt{r \cdot e}}{2^4 \sqrt{3}(1-\nu^2)} e^{-\beta x} \left[ -2 \cos \beta x + \frac{1}{\beta \cdot H} (\cos \beta x - \sin \beta x) \right]$$

Los valores de  $M_x$  y  $Q_x$  están tabulados y se pueden obtener a partir de las expresiones (3.18) y (3.22) empleando las tablas 3.4 y 3.5 respectivamente. Asimismo, el valor del axil  $N_\phi$  máximo se obtiene de la expresión (3.2) empleando la tabla 3.1.

Los valores máximos de  $M_x$  y  $Q_x$  se obtienen directamente para  $x=0$ , es decir, en el empotramiento i sus valores son

$$(M_x)_{x=0} \approx \frac{\gamma \cdot r \cdot e \cdot H}{2\sqrt{3(1-\nu^2)}} \left[ 1 - \frac{1}{\beta \cdot H} \right]$$

$$(Q_x)_{x=0} \approx \frac{\gamma \cdot H \cdot \sqrt{r \cdot e}}{2\sqrt{3(1-\nu^2)}} \left[ 2 - \frac{1}{\beta \cdot H} \right]$$



### A2.2.3.- Solución del problema planteado para el caso de un depósito articulado en el fondo

En el caso de un depósito lleno, libre en el borde superior y articulado en el borde inferior tendremos el mismo problema ( $p(x)$ ,  $w_p, \dots$ ) pero con unas condiciones de contorno distintas.

#### Condiciones de contorno

En este caso, el giro en el borde inferior no está impedido y por lo tanto el momento en esta fibra es nulo

$$\text{borde inferior:} \quad w|_{x=0} = 0; \quad M_x|_{x=0} = 0$$

$$\text{borde superior:} \quad M_x|_{x=H} = 0; \quad Q_x|_{x=H} = 0$$

si se supone además que el depósito cumple por sus dimensiones la condición que el efecto en un borde no tiene influencia en el otro, se simplifica el problema, de modo que en la expresión general  $w(x)$  (ecuación A1.5) queda

$$K_1 = K_2 = K_4 = 0 \qquad K_3 = -\frac{\gamma \cdot r^2 \cdot H}{E \cdot e}$$

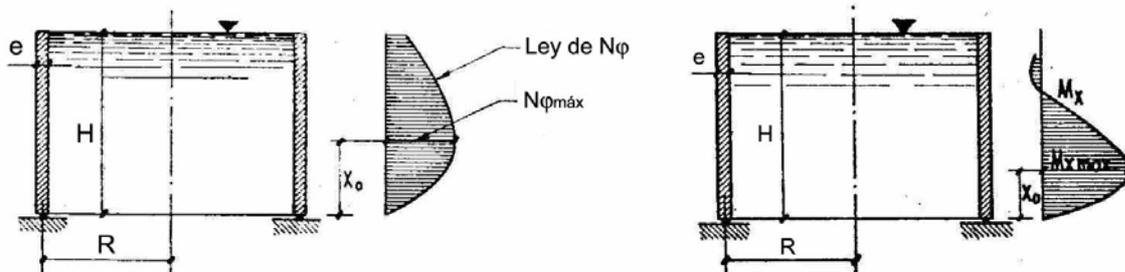
con lo cual se llega a las expresiones simplificadas siguientes

$$w = \frac{\gamma \cdot r^2}{E \cdot e} H \left[ 1 - \frac{x}{H} - e^{-\beta x} \cos \beta x \right]$$

$$N_\varphi = \gamma \cdot r \cdot H \left[ 1 - \frac{x}{H} - e^{-\beta x} \cos \beta x \right]$$

$$M_x = -\frac{\gamma \cdot r \cdot e \cdot H}{2\sqrt{3(1-\nu^2)}} e^{-\beta x} \sin \beta x$$

$$Q_x = \frac{\gamma \cdot H \cdot \sqrt{r \cdot e}}{2\sqrt{3(1-\nu^2)}} e^{-\beta x} (\cos \beta x - \sin \beta x)$$



En esta solución simplificada, y para depósitos de hormigón armado o pretensado con  $\nu \approx 0,2$ , el valor máximo del momento flector  $M_x$  es

$$M_{x_{\max}} \approx -0,095 \cdot \gamma \cdot r \cdot e \cdot H$$

que se obtiene a una altura relativa de  $\frac{x_0}{H} \approx 0,6 \sqrt{\frac{r \cdot e}{H^2}} = 0,6 \sqrt{\frac{2,5 \cdot 0,04}{2,4^2}} = 0,08$ .

Esto viene a ser a unos 18-20cm del suelo.

**ANEJO 3****CÁLCULO DE DEPÓSITOS CILÍNDRICOS CIRCULARES  
POR EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS****A3.1.- INTRODUCCIÓN**

En esta sección se ha determinado cuál es la forma de la solera de un depósito que mejor se adapta a las características de éste. Como criterio de diseño se ha evaluado la respuesta (esfuerzos) de un modelo con unas determinadas condiciones de contorno y se han ido cambiando algunos parámetros para obtener varios resultados en base a los cuales se elegirá el diseño más adecuado para cada caso.

**A3.2.- MODELO DE ANÁLISIS**

Como ya se ha comentado en el apartado 3.3, el modelo estudiado contempla la estructura entera para obtener una mayor representatividad de los resultados, tanto por la influencia de acciones exteriores como por la caracterización de la unión pared-losa. El depósito tipo estudiado en esta sección viene dado por una altura y radio prefijados, y una solera definida por un casquete esférico con un radio de curvatura  $R = R(\theta)$ , en el que  $\theta$  es el ángulo que toma el borde de la solera con respecto de la vertical, en definitiva, la variable que define la solera. La pared del depósito viene dada por una unión rígida con la solera en la base y borde superior libre.

En cuanto a acciones se ha considerado el efecto de carga hidrostática y una reacción del terreno correspondiente a la de un suelo elástico de coeficiente de balasto  $k_s = 5 \text{ kp/cm}^3$ .

En el apartado 3.3 de este estudio se describe con más detalle el modelo y el proceso de cálculo.

Se han estudiado las tres alternativas propuestas en el capítulo 5 para unos volúmenes de 10, 50 y 150m<sup>3</sup>, y unos diámetros de 2.6, 5 y 9m respectivamente, con una altura de 2.4m en el segundo y el tercer caso (el ancho de malla electrosoldada) y de 1.8m en el primero de ellos, como se indica en la tabla A3.1.

Volumen (m <sup>3</sup> )	Altura (m)	Radio (m)
10	1,8	1,3
50	2,4	2,5
150	2,4	4,5

Tabla A3.1.- Dimensiones del vaso de los tres depósitos estudiados.

Para cada una se ha ido variando el radio de curvatura del casquete, en función del ángulo  $\theta$  del borde con la vertical,  $R = R(\theta)$ . Ciertamente es que en el caso que la solera no sea plana los volúmenes reales de los depósitos van a aumentar. En lo que sigue, se va a hacer referencia a cada uno de los depósitos atendiendo a su capacidad sin contar el posible volumen extra debido a la curvatura de la solera.

### A3.3.- RESULTADOS

A continuación se muestran los resultados obtenidos con cada uno de los modelos estudiados, para los distintos ángulos entre el borde de la solera y la vertical.

#### A3.3.1.- Tablas

Nº unión	Unión pared-solera	Depósito de 10m <sup>3</sup>				
		$N_{\phi}^{máx}$ (kN/ml)	$N_{\phi}^{mín}$ (kN/ml)	$M_x^+$ (N·m/ml)	$M_x^-$ (N·m/ml)	$Q_x$ (kN/ml)
1	Empotramiento	19,75	-1,04	112,41	-30,70	1,084
2	Ángulo de 90°	20,11	0,15	63,63	-28,41	0,424
3	Ángulo de 75°	20,08	-0,14	63,01	-26,14	0,401
4	Ángulo de 60°	20,00	-1,00	67,42	-24,09	0,409
5	Ángulo de 45°	19,93	-0,80	69,00	-22,30	0,406
6	Ángulo de 30°	19,84	-2,00	65,97	-20,35	0,374
7	Ángulo de 15°	19,92	-3,75	57,20	-18,18	0,307
8	Semiesfera	21,67	-5,50	38,71	-14,51	0,187

Tabla A3.2.- Resultados obtenidos con el depósito pequeño para distintos valores de  $\theta$ .

Depósito de 10m <sup>3</sup>						
Nº unión	Unión pared-solera	$N_{\phi}^{máx}$ (kN/ml)	$N_{\phi}^{mín}$ (kN/ml)	$M_x^+$ (N·m/ml)	$M_x^-$ (N·m/ml)	$Q_x$ (kN/ml)
1	Empotramiento	44,58	-0,97	679,97	-163,57	4,011
2	Ángulo de 90°	45,87	0,13	399,83	-169,65	2,286
3	Ángulo de 75°	46,39	0,13	403,09	-158,25	1,836
4	Ángulo de 60°	46,65	-2,67	427,09	-145,21	1,668
5	Ángulo de 45°	46,78	-2,88	420,15	-133,54	1,676
6	Ángulo de 30°	46,89	-2,96	395,16	-122,55	1,597
7	Ángulo de 15°	47,03	-7,80	332,57	-107,24	1,363
8	Semiesfera	61,78	-13,06	202,26	-80,96	0,876

Tabla A3.3.- Resultados obtenidos con el depósito mediano para distintos valores de  $\theta$ .

Depósito de 10m <sup>3</sup>						
Nº unión	Unión pared-solera	$N_{\phi}^{máx}$ (kN/ml)	$N_{\phi}^{mín}$ (kN/ml)	$M_x^+$ (N·m/ml)	$M_x^-$ (N·m/ml)	$Q_x$ (kN/ml)
1	Empotramiento	64,96	-0,98	1671,82	-423,47	7,042
2	Ángulo de 90°	68,04	-0,90	1132,42	-432,87	5,800
3	Ángulo de 75°	69,15	-0,81	1180,66	-417,83	4,281
4	Ángulo de 60°	69,79	-7,18	1289,29	-397,73	3,832
5	Ángulo de 45°	70,56	-10,03	1311,55	-376,76	3,616
6	Ángulo de 30°	71,40	-6,31	1238,75	-350,53	3,513
7	Ángulo de 15°	72,36	-7,26	1067,87	-316,28	3,140
8	Semiesfera	111,99	-20,72	637,12	-249,91	2,047

Tabla A3.4.- Resultados obtenidos con el depósito grande para distintos valores de  $\theta$ .

### A3.3.2.- Gráficos

Para una mejor interpretación de los resultados se han construido para cada esfuerzo en cada depósito los correspondientes gráficos Esfuerzo-Unión en los que se ha numerado cada tipo de unión (1,2,3...8) según el orden presentado en las tablas anteriores. De este modo se puede valorar el efecto de una u otra unión en los esfuerzos experimentados.

Esfuerzos en el depósito de 10m<sup>3</sup>

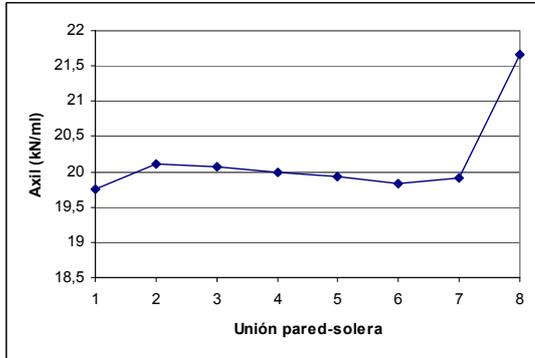


Gráfico A3.1.- N<sub>φ</sub> en el depósito de 10m<sup>3</sup>.

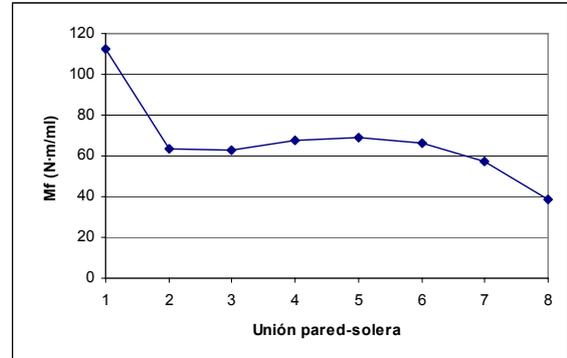


Gráfico A3.2.- M<sub>x</sub> en el depósito de 10m<sup>3</sup>.

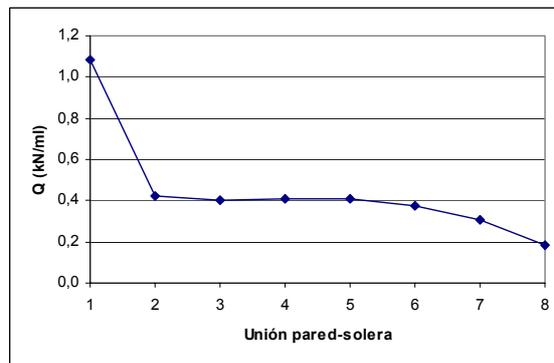


Gráfico A3.3.- Q<sub>x</sub> en el depósito de 10m<sup>3</sup>.

Esfuerzos en los depósitos de 50 y 150m<sup>3</sup>

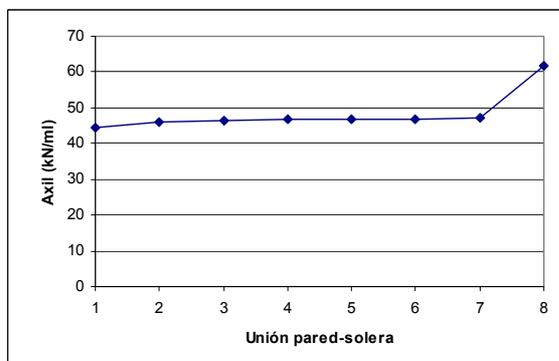


Gráfico A3.4.- N<sub>φ</sub> en el depósito de 50m<sup>3</sup>.

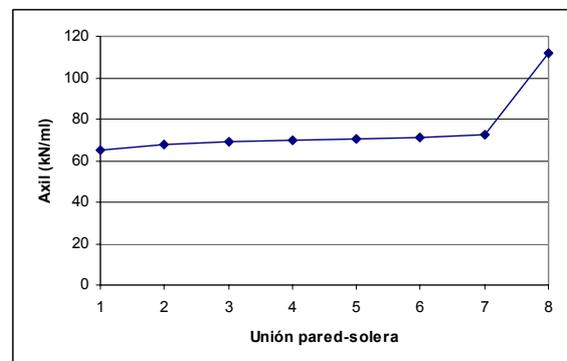
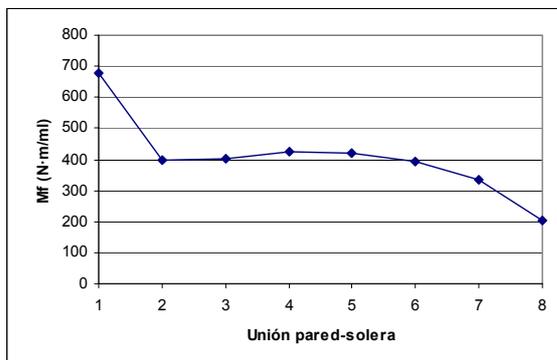
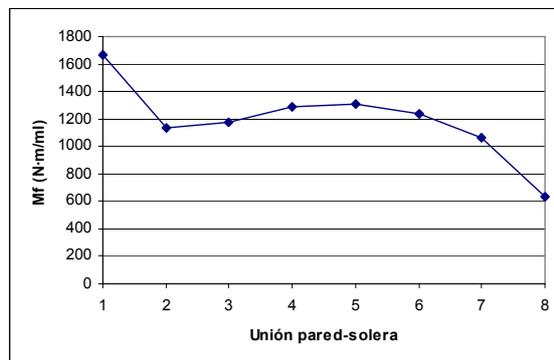
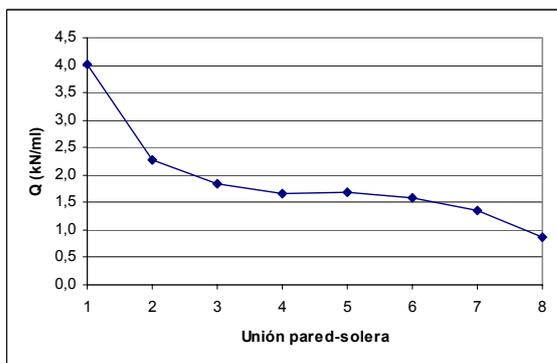
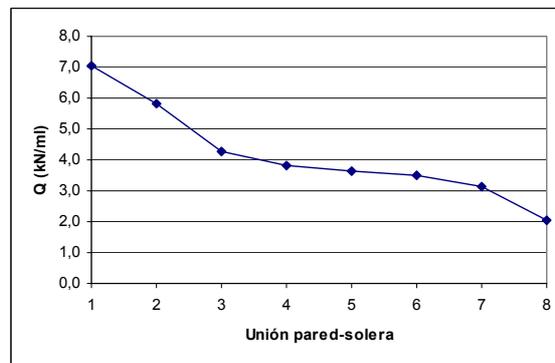


Gráfico A3.5.- N<sub>φ</sub> en el depósito de 150m<sup>3</sup>.

Gráfico A3.6.-  $M_x$  en el depósito de  $50\text{m}^3$ .Gráfico A3.7.-  $M_x$  en el depósito de  $150\text{m}^3$ .Gráfico A3.8.-  $Q_x$  en el depósito de  $50\text{m}^3$ .Gráfico A3.9.-  $Q_x$  en el depósito de  $150\text{m}^3$ .

### A3.4.- VALORACIÓN DE LOS RESULTADOS

En estos resultados hay dos situaciones que se pueden descartar:

- En el caso de tener un depósito pequeño ( $10\text{m}^3$ ) al cual se le puede aplicar la tecnología del ferrocemento (ver tabla 6.1, por ejemplo) no tiene sentido estudiar la base de la pared como empotramiento perfecto, pues se desprecia el carácter de lámina de la estructura, aumentando la flexión y por tanto serán necesarios espesores mayores, lo cual no es posible en ferrocemento. Queda pues descartado este tipo de unión en el caso del depósito de  $10\text{m}^3$ . Asimismo, si se considera una solera semiesférica las tracciones obtenidas aumentan excesivamente como se puede comprobar en el gráfico A3.1, lo cual tampoco nos interesa para el dimensionamiento. Luego descartando ambas opciones los resultados que se obtienen para el depósito de  $10\text{m}^3$  son los mostrados en los gráficos siguientes:

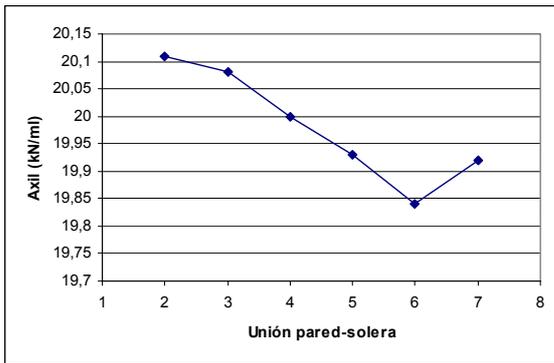


Gráfico A3.10.-  $N_{\phi}$  para  $\theta$  entre  $15^{\circ}$  y  $90^{\circ}$ .



Gráfico A3.11.-  $Q_x$  para  $\theta$  entre  $15^{\circ}$  y  $90^{\circ}$ .

Las soluciones más interesantes parecen la 6, la 7 o hasta la 5 que corresponden respectivamente a ángulos de  $30^{\circ}$ ,  $15^{\circ}$  y  $45^{\circ}$  respecto a la vertical. En el caso que nos concierne la opción de  $30^{\circ}$  proporciona un axil más pequeño lo cual nos va a permitir un espesor más pequeño. Ésta pues, parece la opción más interesante.

- En el caso de un depósito grande, en el cual sea necesaria la utilización de malla electrosoldada y por tanto ya no le sea aplicable la tecnología del ferrocemento en sentido estricto (ver tabla 6.1), si es posible la solución de empotramiento en la base, de hecho, ésta sería la función del anillo de cimentación ya planteado en el ejemplo 2 del capítulo 4 en el cual se describía la ejecución de un depósito de  $150m^3$ . Sin embargo la solución de una solera semiesférica queda nuevamente descartada porque tal como se puede ver en los gráficos A3.4 y A3.5 el esfuerzo axil producido es mucho mayor. Así, estudiando la respuesta del depósito sin considerar la opción de solera semiesférica obtenemos los gráficos A3.12-15 donde se puede ver claramente que las opciones más interesantes son la de solera recta (ángulo  $\theta = 90^{\circ}$ ) e incluso el de empotramiento perfecto, haciendo falta como ya se ha comentado antes disponer un anillo de cimentación. Esta última solución parece más adecuada en el caso de un depósito de  $150m^3$  en el que los esfuerzos son bastante importantes y resistirlos a través de la unión pared-solera resulta complicado, sin embargo, ejecutando un anillo de cimentación va a hacer falta más material pero resistirá mejor.

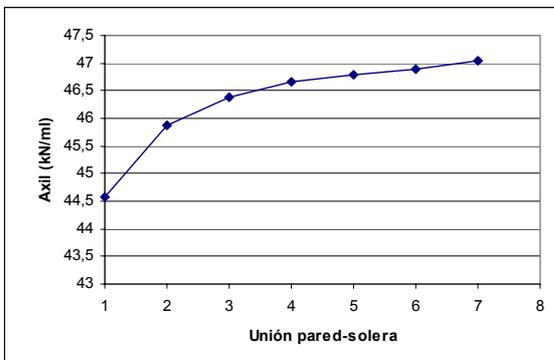


Gráfico A3.12.-  $N_{\phi}$  en el depósito de  $50m^3$ .

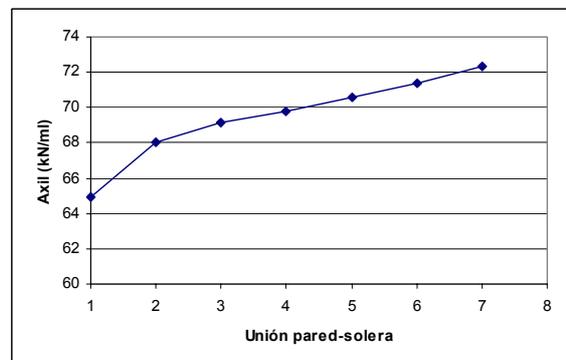


Gráfico A3.13.-  $N_{\phi}$  en el depósito de  $150m^3$ .

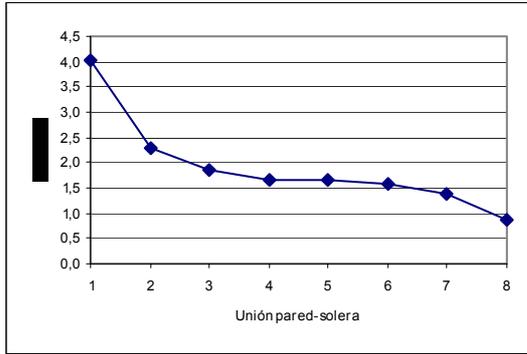


Gráfico A3.14.-  $Q_x$  en el depósito de  $50m^3$ .



Gráfico A3.15.-  $Q_x$  en el depósito de  $150m^3$ .

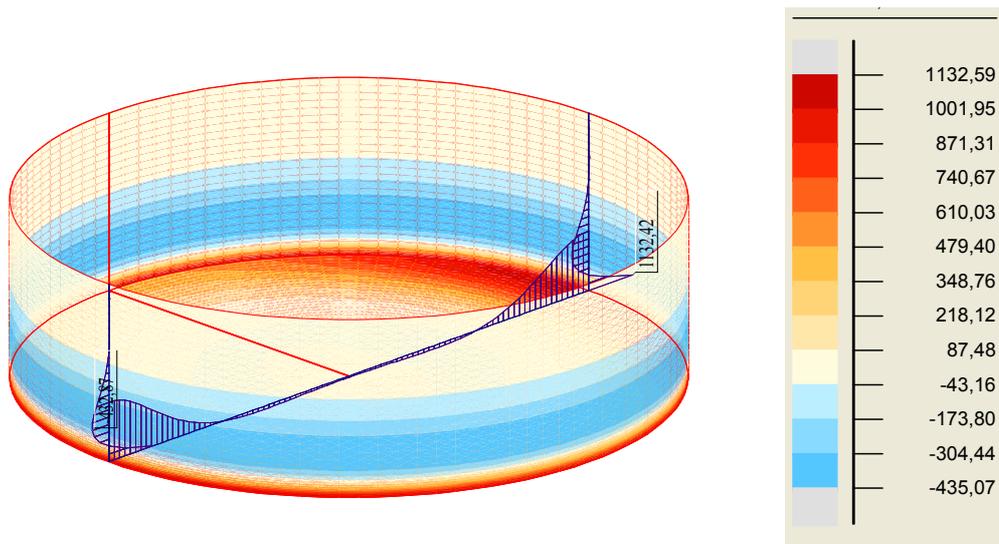


Figura A3.4.- Momento flector  $M_x$  (N·m/m) obtenido para el depósito de  $150m^3$  (ángulo  $\theta=90^\circ$ ).

### A3.5.- CONCLUSIONES

Para el diseño de la solera, se concluye que:

En el caso de *depósitos pequeños* en los que les sea aplicable la tecnología del ferrocemento estrictamente hablando según lo descrito en el apartado 3.2.2 (esto supone en definitiva depósitos de hasta 10-15m<sup>3</sup> de capacidad según tabla 6.1), es interesante una solera con una curvatura importante tomando, por ejemplo, un ángulo de 45° a 15° en el borde de la solera con respecto de la vertical (figura A3.5), pero sin llegar al extremo de un casquete semiesférico.

Esto favorece el comportamiento de lámina de la estructura, aspecto importante de cara a la optimización de los materiales.

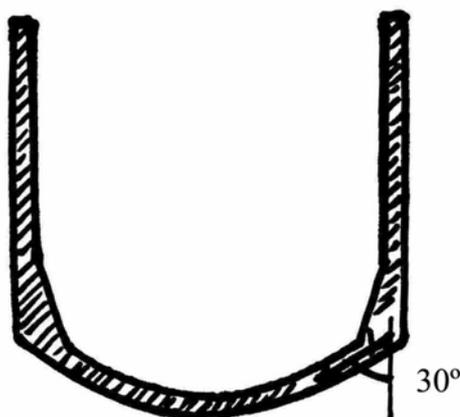


Fig.A3.5.- Solera planteada para un depósito de ferrocemento.

En caso de *depósitos mayores* en los que ya sea necesaria la utilización de malla electrosoldada como elemento de rigidización se pueden discutir dos situaciones:

- Una primera, consiste en una solera plana unida rígidamente a la pared. En este caso, el esfuerzo axial será proporcionalmente menor (ver gráficos A3.12 y A3.13) sin embargo, el cortante va a ser mayor (gráficos A3.8 y A3.9), con lo cual habrá que rigidizar la unión recreciendo el espesor de la base de la pared (ver figura A3.6). Esta alternativa es interesante para depósitos con capacidades de hasta 100m<sup>3</sup> aproximadamente (unos 4m de radio para H=2m).

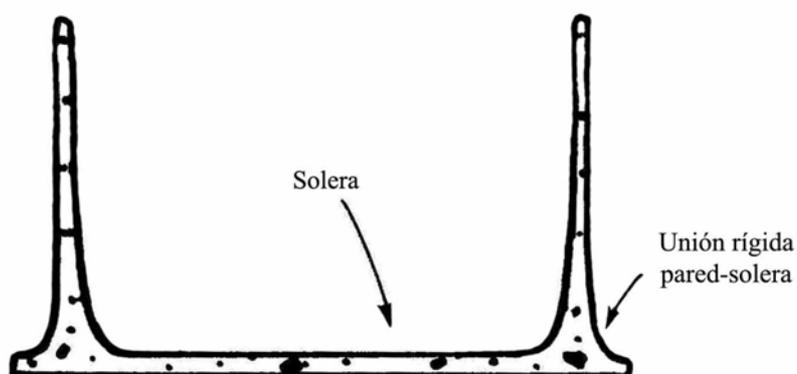


Fig.A3.6.- Solera planteada en este primer caso.

- La segunda posibilidad es la de plantear la pared como empotrada en la base. Ello se consigue mediante un anillo de cimentación (figura A3.7) como el descrito en el ejemplo 2 del capítulo 4 para depósitos grandes, en los que los esfuerzos en la base de la pared van a ser importantes (volúmenes de  $150\text{m}^3$  o más).

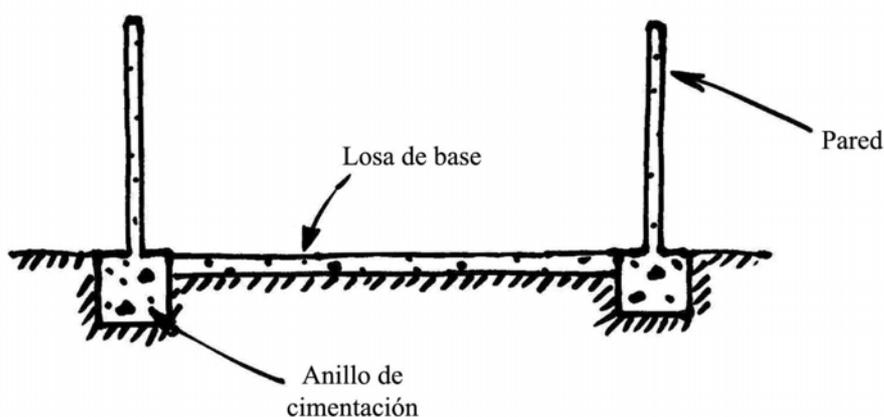


Fig.A3.7.- Solución más próxima al caso de empotramiento perfecto.

En cuanto a estas dos últimas soluciones hay que decir que la primera tiene una cierta limitación de tamaño pues conforme vamos aumentando el volumen de depósito mayores son los esfuerzos en la unión, cuya rigidez en cambio, vendrá dada por los espesores de pared y solera.