

Fig. 1
Depósito
de Souk-
el-Arba.

aplicación de las superficies cónicas a la construcción de depósitos elevados

581-19

JOSE ANTONIO TORROJA, *ingeniero de caminos*

sinopsis

Recientemente se han construido en Marruecos cuatro depósitos elevados, de hormigón pretensado en alguna de sus partes, de unos 30 m de altura sobre el suelo, de agradable aspecto exterior y de línea arquitectónicamente armoniosa.

Los cuatro depósitos son semejantes. Uno de ellos, por ejemplo, está constituido por un fuste esbelto que sirve de soporte a la copa superior. Los tres restantes se diferencian de aquél, principalmente, en que el número de soportes convergentes hacia la parte superior es distinto. El depósito de agua, propiamente dicho, se compone de ocho láminas de superficie cónica, invertida, de eje inclinado. Estas ocho láminas tienen forma de sector, en su proyección horizontal, lo que ha permitido emparejarlas en mutua correspondencia diametral. Las ocho superficies cónicas que constituyen el fondo del depósito se hallan separadas por otros tantos diafragmas o paredes verticales, pretensadas, formando los correspondientes alvéolos, convenientemente comunicados en su parte inferior para asegurar la igualdad de presiones en las dos caras de cada uno de los diafragmas. El conjunto de esta estructura adopta una forma geométrica de cuya sencillez y acierto dan clara prueba su estética y sutileza lineal.

La complejidad de su análisis ha exigido un cálculo aproximado, sencillo, pero ingenioso, para mantenerse siempre, en la superficie media entre caras externas de la lámina cónica, dentro de límites prudentes de la curva de compresiones. Pero la ambición ha sido aún mayor, pues se ha conseguido un estado tensional general en la lámina que asegura la compresión en dos direcciones y, con ello, una impermeabilización notable que alivia la necesidad y especial cuidado con que han de tratarse las juntas de construcción de los depósitos para agua, en los que la estanquidad adquiere la mayor importancia.

Los depósitos, actualmente en servicio, se han comportado en estrecha correspondencia con las características previstas en su cálculo, del que el autor justifica su análisis dentro de una aproximación, admisible sin necesidad de penetrar en un complejo campo riguroso de prolijas soluciones.

Descripción general

La reciente construcción en Marruecos de cuatro depósitos elevados para agua, ha permitido una aplicación práctica de las láminas cónicas a este tipo de estructuras según la disposición general que puede apreciarse en la figura 8.

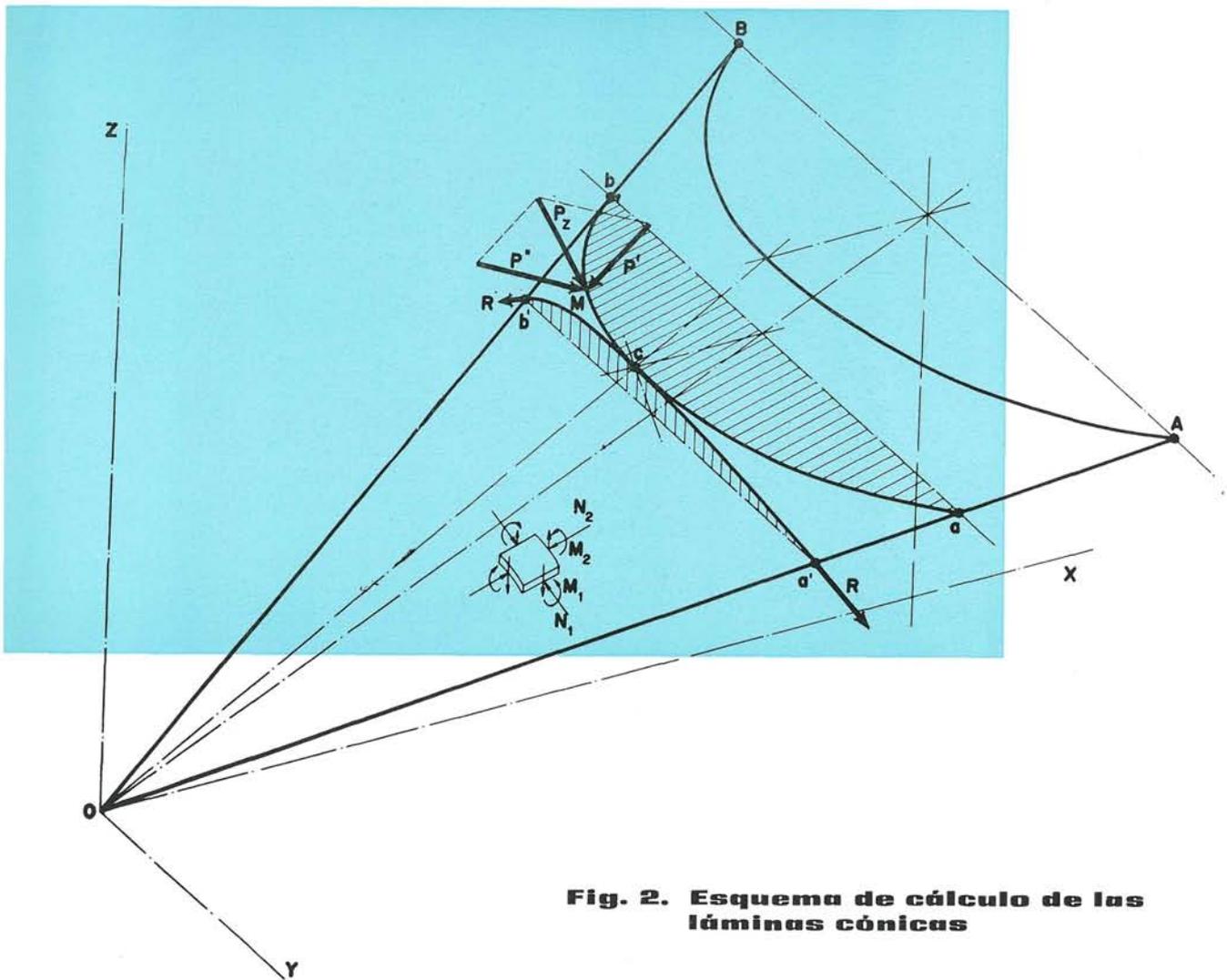


Fig. 2. Esquema de cálculo de las láminas cónicas

Estos cuatro depósitos corresponden a otros tantos concursos de proyecto y ejecución celebrados en Marruecos, dos de ellos convocados por la Régie d'Exploitations Industrielles (depósitos de Khemisset y Souk-el-Arba); el tercero, por la Régie Autonome de Distribution d'Eau et d'Electricité (depósito de Sidi-Bernoussi), y el último, por el "Office Cherifien des Phosphates" (depósito de Khouribga), estando esta última obra dirigida por los ingenieros de dicho organismo, Mr. Caillat, Mr. Loiselet y Mr. Launey. Todos estos concursos fueron ganados por la empresa Société Marocaine d'Exploitation des Entreprises Fernández, que llevó a cabo su construcción (figs. 6, 7, 17 y 18).

Para la descripción de la estructura de estos depósitos tomaremos uno de ellos como modelo, ya que los demás son esencialmente análogos. Sólo presentan pequeñas diferencias que se irán indicando a lo largo de esta exposición.

Excepto para el depósito de Khouribga, el soporte de la cuba está formado por un fuste hueco, que se prolonga por el interior de aquélla mediante una chimenea cilíndrica, de sección octogonal, de la que parten ocho diafragmas radiales de hormigón pretensado, en cuyos bordes exteriores apoyan otras tantas láminas cónicas, que cargan en su parte inferior sobre la propia chimenea central y que constituyen la pared exterior de la cuba. Cada uno de aquellos diafragmas presenta un amplio orificio en su parte inferior con objeto de evitar posibles diferencias de presión a ambos lados de los mismos.

La justificación de la elección de este tipo de estructura, para el caso concreto que nos ocupa, se basa en el deseo de obtener una cuba cuya pared exterior esté sometida a tensiones de compresión en dos direcciones, para evitar toda posibilidad de fisuración y, con ello, lograr una estanquidad suficiente para pequeños espesores de dicha pared. La solución generalmente utilizada para llenar estas exigencias está formada por una pared exterior en forma de superficie de revolución—cilíndrica en la mayoría de los casos—, pretensada circunferencialmente. Ahora bien, la gran curvatura impuesta a los cordones

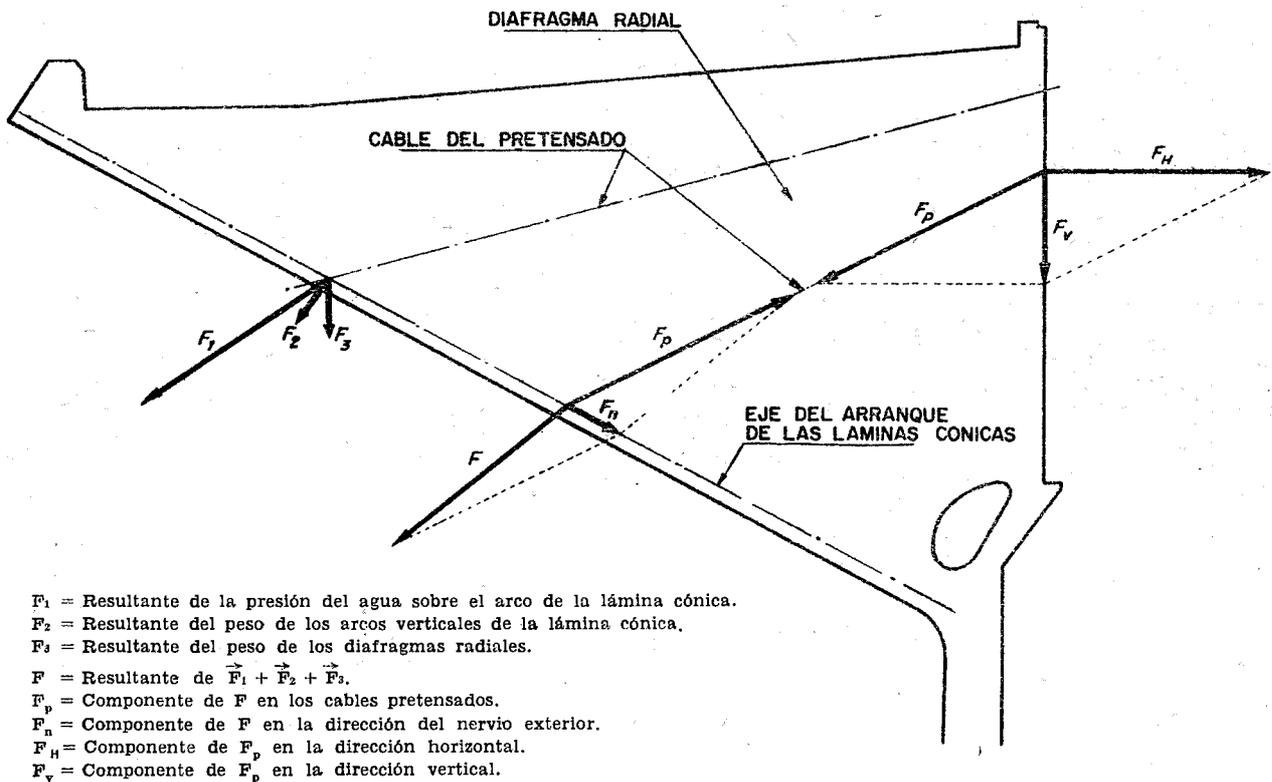


Fig. 3. Esquema de cálculo de los diafragmas radiales

circunferenciales de pretensado impone unos rozamientos de consideración sobre los alambres a tesar—hoy día reducidos sensiblemente mediante el uso de cables en lugar de alambres—, rozamientos que en el caso presente podían ser más de temer por utilizarse un procedimiento de tesado hilo a hilo, con el consiguiente peligro de que, al tesar los primeros alambres, éstos se compriman sobre los demás, aumentando considerablemente su fricción e impidiendo que la tensión se distribuya con suficiente uniformidad en toda la longitud del cordón en cuestión.

Por otra parte, una superficie de revolución presenta una seguridad a fisuración, frente a un posible aumento del nivel de agua, inferior a la que se obtiene con la estructura propuesta, como se verá más adelante.

adelante. Además, un posible fallo en el pretensado de estas pantallas radiales conduciría a un mayor desplazamiento de sus bordes exteriores, lo cual se traduce en la presencia de momentos flectores secundarios sobre las láminas cónicas, cuya influencia en la creación de tensiones de tracción es demasiado pequeña para comprometer la seguridad contra la fisuración, como se ha podido comprobar con los cálculos aproximados a que posteriormente nos hemos de referir. Por otra parte, dichos momentos no originan solamente tracciones, sino también compresiones, no pudiendo, en consecuencia, existir nunca tracciones en todo el espesor de la pared externa de la cuba.

— El pretensado de los diafragmas radiales es tal que asegura una pequeña compresión residual sobre éstos cuando el depósito se halla a plena carga, con lo que se logra una protección apropiada para las armaduras. Pero esta compresión residual no es tan importante como hubiera sido necesario para una superficie de revolución pretensada circunferencialmente, por las razones expuestas más arriba.

— El esfuerzo total de tracción transmitido por los diafragmas radiales es absorbido por las armaduras en forma de zuncho octogonal, situadas en la chimenea central (fig. 11). La tensión de trabajo de estas armaduras se ha limitado debidamente para evitar la fisuración de dicha chimenea.

El desplazamiento de los bordes exteriores de los diafragmas, al pasar la cuba de vacío a plena carga, se ha reducido a un mínimo al estar éstos constituidos por hormigón pretensado, ya que en este caso las deformaciones son debidas solamente a la decompresión del hormigón. Por otra parte, los alargamientos de los zunchos de la chimenea central son muy pequeños debido a su reducido diámetro y limitadas tensiones de trabajo. De esta forma, los esfuerzos secundarios originados por los desplazamientos de los soportes de las láminas cónicas se han reducido al mínimo.

Para dar mayor rigidez a la parte superior de las láminas cónicas—donde llegan a salvar luces de 11 m con 12 cm de espesor solamente—se ha hecho uso de la losa periférica de cubierta hormigonada "in situ" y rígidamente unida a dichas láminas. El resto de la cubierta está formado por pequeñas losas prefabricadas que descansan sobre una serie de viguetas que apoyan, a su vez, sobre los diafragmas radiales.

Los fustes que soportan los depósitos de Khemisset y de Souk-el-Arba son huecos, de sección cilíndrica, de superficie exterior lisa el primero, y con nervios de rigidez proyectados hacia el exterior el segundo.

El fuste del depósito de Sidi-Bernoussi está formado por ocho soportes-pantalla, arriostrados entre sí por una placa de hormigón de 10 cm de espesor cuya misión es la de evitar, por una parte, el pandeo de cada uno de estos soportes independientemente, y por otra, el pandeo por torsión del conjunto (figura 18).

Ya que interesaba conseguir un conjunto de gran unidad estética en el depósito de Khouribga, se decidió resaltar fuertemente los nervios exteriores de apoyo de la cuba, que de esta forma aparecen como prolongación de los propios soportes, dando fuerza y expresividad a la obra, como un todo. Debido a la gran rigidez que por esta causa adquirieron dichos nervios exteriores de la cuba, pudieron eliminarse los diafragmas radiales, que se sustituyeron por simples tirantes pretensados, de los cuales el superior sirvió como apoyo para las viguetas de la cubierta (figs. 5 y 17).

Proyecto y cálculo de los elementos estructurales de la cuba

Como ilustración de la estructura de la cuba de estos depósitos se incluye la correspondiente al de Sidi-Bernoussi (fig. 8), ya que las de Khemisset y Souk-el-Arba son análogas, presentando pequeñas diferencias el de Khouribga (fig. 7).

Elección de la forma de las láminas cónicas

Debido a la naturaleza altamente compleja del cálculo analítico de los esfuerzos en una lámina cónica de eje inclinado respecto a la vertical y sección recta no circular, sometida a carga hidrostática, se ha adoptado un método de cálculo aproximado, buscando una sección para la superficie cónica tal que la carga de agua produzca sobre ella esfuerzos de membrana exclusivamente. A continuación se indica someramente el procedimiento utilizado para llegar a esta forma.

Sea P_1 la presión normal sobre la superficie media de la lámina cónica en el punto M (fig. 2), pudiéndose descomponer en P' , dirigida desde M hacia el vértice O del cono, y en P'' , cuya dirección se obtiene mediante la intersección del plano definido por P_1 y P' con el horizontal que pasa por M . Las fuerzas P' se transmiten directamente por la lámina al vértice O , sin producir flexiones, y las fuerzas P'' , contenidas en un plano horizontal, se transmitirán sin flexiones hasta los apoyos laterales del sector cónico, siempre que la sección horizontal de este cono sea el antifunicular de dichas cargas P'' .

Para obtener la ecuación del cono que cumpla esa condición se partió de uno con sección horizontal circular, cuyo eje presentaba una inclinación tal que la pendiente máxima en cualquier punto de la zona de dicho cono a utilizar fuese inferior a 38° , con objeto de poder realizar el hormigonado sin necesidad de doble encofrado. Fijado este cono, se obtuvieron analíticamente los valores de P'' a partir de $P_1 = 1$, obteniéndose el antifunicular de las P'' mediante un dibujo a gran escala. Sobre esta curva obtenida gráficamente se encajó una parábola de cuarto grado, que se utilizó como sección horizontal de un nuevo cono, a partir del cual se volvió a obtener analíticamente una nueva serie de valores P'' para $P_1 = 1$, repitiéndose la operación gráfica de obtención del nuevo antifunicular. Mediante este proceso

iterativo se puede llegar a obtener la ecuación de la superficie cónica con gran precisión, aunque en la práctica bastó con la primera aproximación, ya que, debido a que sólo se utiliza un pequeño sector de la superficie cónica total, la semejanza, en esta zona, de la sección buscada con la sección circular, resultó muy estrecha.

La ecuación obtenida para la superficie media de la lámina se utilizó también para obtener analíticamente los datos necesarios referentes a la preparación del encofrado.

Cálculo práctico de esfuerzos y reacciones de las láminas cónicas. Cálculo de los diafragmas radiales

Inicialmente, se acepta que si la forma de las láminas cónicas es la obtenida por el procedimiento descrito anteriormente, no aparecerán flexiones siempre que los soportes laterales de aquéllas sean fijos y sea despreciable su deformación axil. Posteriormente, se indica el método aproximado seguido para obtener los momentos producidos por estos efectos.

El esfuerzo N_1 (fig. 2) se determinó, aproximadamente, dividiendo la lámina en fajas mediante planos $a'cb'$, normales al plano OAB , y obteniéndose los esfuerzos axiles en los arcos así definidos. El esfuerzo N_2 fue determinado a partir de las reacciones de estos arcos sobre las líneas de apoyo OA y OB , como se indica más adelante, admitiendo, por tanto, que las reacciones R de la lámina sobre estas líneas de apoyo son precisamente las reacciones de los arcos $a'cb'$.

Componiendo los empujes R correspondientes a arcos de dos láminas contiguas que inciden en el mismo punto de la línea común de apoyo, se obtiene la reacción F_1 total sobre el borde exterior del diafragma radial, fuerza debida a la presión de agua contenida en el mismo plano del diafragma.

Aunque la forma de la superficie cónica no se ha estudiado para soportar sin flexiones su propio peso, se ha observado que los arcos obtenidos mediante cortes de la lámina por planos verticales se separan relativamente poco de sus correspondientes antifuniculares, por lo que, debido a la poca entidad de estos pesos frente a la carga de agua, se han despreciado las flexiones producidas por el peso propio, teniendo en cuenta, además, que las zonas superiores de estas láminas, donde estos efectos serían máximos, quedan fuertemente rigidizadas por su unión con la losa perimetral de cubierta.

En estas condiciones, las reacciones sobre las líneas de apoyo, debidas al peso propio de las láminas cónicas, se obtienen mediante la composición de las reacciones de arcos verticales correspondientes a láminas contiguas, incidentes en el mismo punto de dicha línea de apoyo, obteniendo de esta forma las fuerzas F_2 contenidas asimismo en el plano del diafragma radial correspondiente.

Finalmente, se obtienen las fuerzas que inciden directamente en la parte superior de los diafragmas —pesos de la cubierta—, así como los pesos propios de estos mismos; fuerzas F_3 que son verticales y se supone se transmiten hasta el borde inferior del diafragma, donde son absorbidas por el pretensado correspondiente.

Las armaduras pretensadas de los diafragmas radiales se han calculado por un proceso de compensación de cargas. A tal efecto, la línea exterior de apoyo de las láminas cónicas OA se ha dividido en una serie de trozos, obteniéndose, para cada uno de ellos, las fuerzas F_1 , F_2 y F_3 que se combinan en resultantes F (fig. 3). Por otra parte, a cada trozo en que se ha dividido la línea OA corresponde una dirección media de los cordones de pretensado de los diafragmas, descomponiéndose F en las direcciones correspondientes a dicho cordón (F_p) y a la línea de apoyo, o nervio exterior OA (F_n). De esta forma, las cargas quedan equilibradas cuando el depósito está lleno, transmitiéndose la carga de los cordones de pretensado a los propios diafragmas radiales cuando está vacío. Con objeto de obtener una compresión residual en estos últimos se ha previsto un ligero exceso de las armaduras de pretensado.

Las componentes F_n , paralelas al nervio exterior del diafragma, dan lugar a esfuerzos de compresión N_2 que se distribuyen por las superficies cónicas. Estos esfuerzos sólo adquieren importancia en las zonas inferiores de las láminas, donde su desarrollo es pequeño y donde, además, se suman los efectos de todas las fuerzas F_n . Con objeto de que la compresión máxima debida a N_2 no pase de 60 kilogramos/cm², el espesor de la lámina es variable en su parte inferior, pasando de 12 a 18 cm en su unión con la chimenea central.

Como se dijo anteriormente, las fuerzas tensoras producidas por los cordones de pretensado sobre la chimenea central son absorbidas por anillos octogonales formados por barras corrugadas de alta adherencia. Una de las condiciones necesarias para el dimensionamiento de estos anillos lo proporciona el criterio de equilibrio o compensación de cargas, que determina el esfuerzo total de tracción en cada anillo. Por otra parte, la gran rigidez de los diafragmas radiales en su plano, indica que sus movimientos son prácticamente equivalentes a un giro global. Esto quiere decir que la ley de deformación de los anillos de tracción de la chimenea central a lo largo de su altura es lineal y, por lo tanto, el mismo carácter lineal tendrá la ley de tensiones en las armaduras de dichos anillos. Fijando la tensión de trabajo del anillo más cargado, que es el correspondiente a la parte superior de la chimenea, y cuyo valor se limitó a 1.600 kg/cm², se pueden obtener las tensiones correspondientes a los demás anillos y determinar, en consecuencia, la cuantía de armaduras necesarias a todo lo largo de la chimenea central.

Este método de cálculo de los anillos de tracción octogonales conduce a un exceso de armadura respecto a la que se obtendría utilizando un método de rotura o agotamiento, ya que la tensión media resultante en las armaduras es muy baja—del orden de 900 kg/cm²—para la calidad del acero de las barras corrugadas. Sin embargo, y para este tipo de proyecto, no parece prudente adoptar un criterio de cálculo en rotura, ya que las condiciones de compatibilidad de las deformaciones del diafragma radial, junto con el método de equilibrio de cargas utilizado para dimensionar las armaduras de pretensado, hacen necesario absorber, en cada sección horizontal de la chimenea central, un esfuerzo determinado con una determinada deformación, razón por la cual se adoptó dicho procedimiento de cálculo.

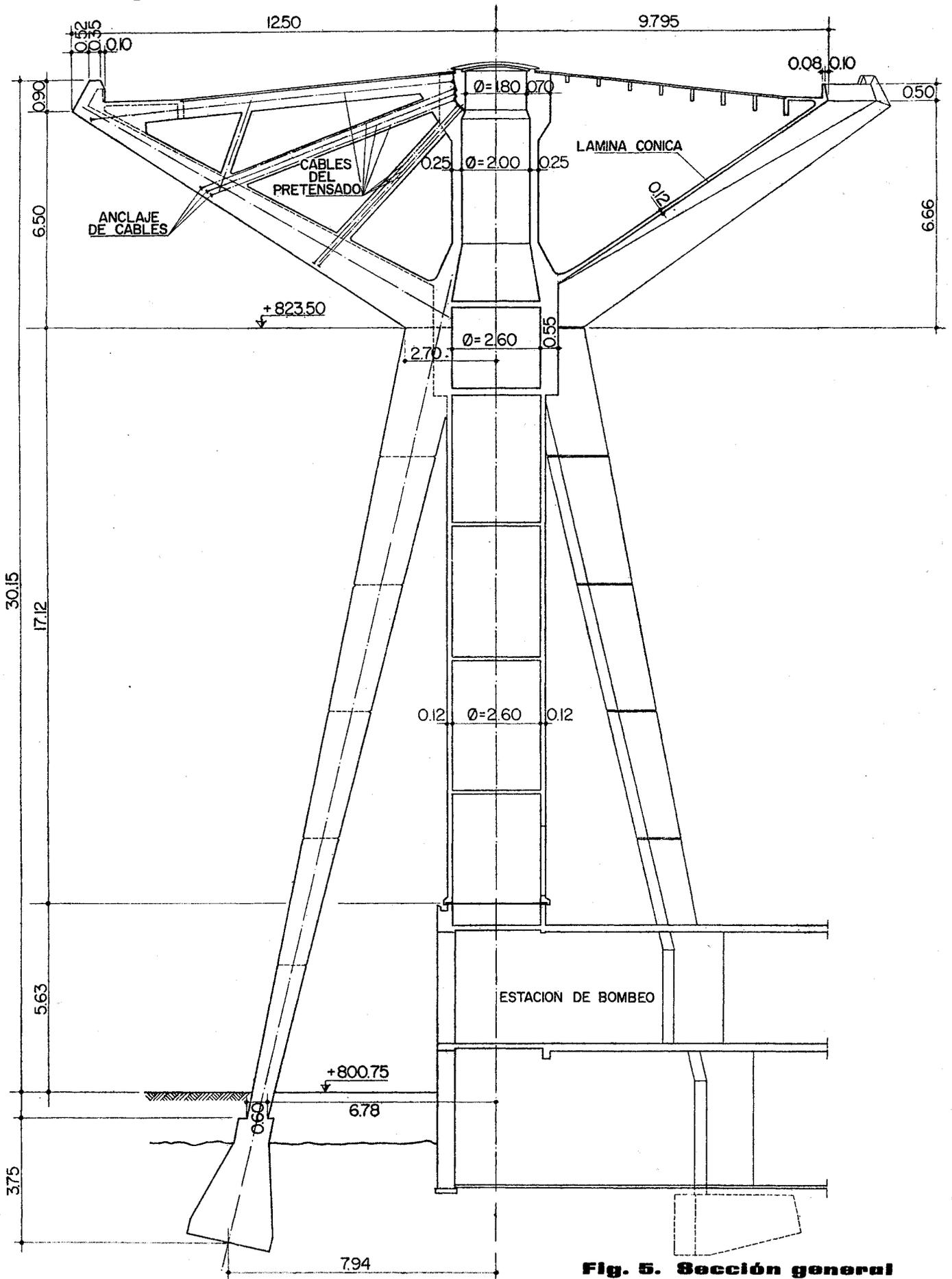


Fig. 5. Sección general

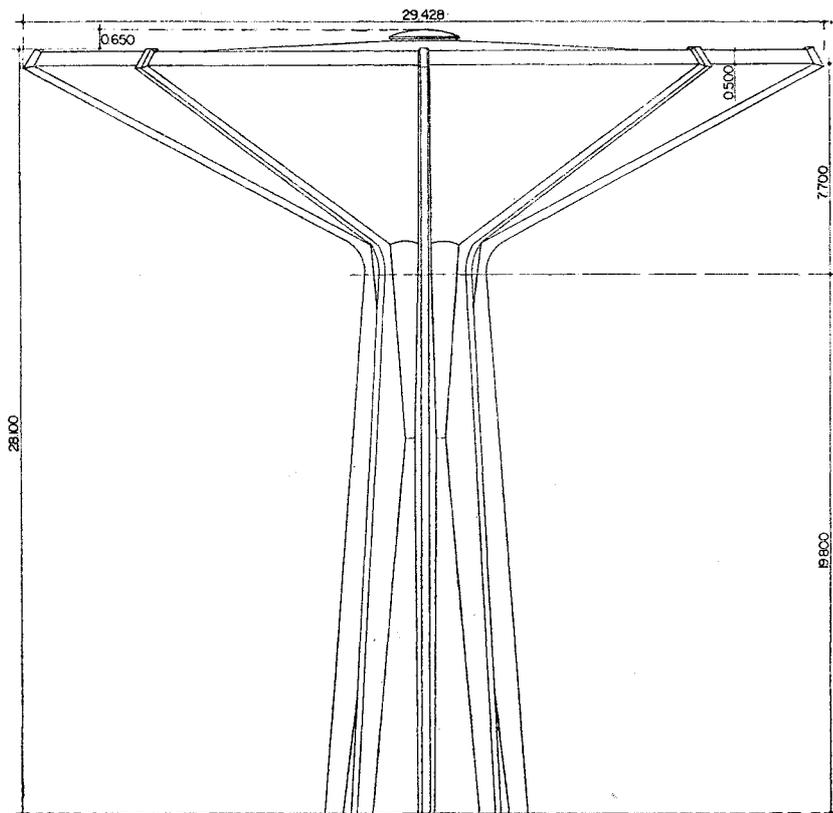


Fig. 6. Depósito de Sidi-Bernoussi-Alzado

El cálculo aproximado de las flexiones en las láminas cónicas se ha llevado a cabo de la siguiente manera:

1. Se ha admitido que los momentos M_2 son despreciables en toda la extensión de la lámina excepto en su parte superior, donde la losa de cubierta impide cualquier desplazamiento normal a la superficie media de aquélla. Para esta zona se ha supuesto que las flexiones M_2 son inferiores a las producidas en una lámina cilíndrica circular, de radio igual al radio medio de la sección horizontal superior de la superficie cónica, sometida a la acción de cargas hidrostáticas, y con corrimientos nulos en su borde superior. En consecuencia, se han calculado las flexiones en la lámina cilíndrica últimamente descrita, y se ha armado la parte superior de las láminas cónicas para absorber estos mismos momentos.

2. Para determinar las flexiones M_1 se han obtenido los desplazamientos de las líneas de apoyo OA y OB , teniendo en cuenta las deformaciones de los diafragmas radiales y las de los anillos de tracción de la chimenea central. Una vez conocidos estos desplazamientos, los momentos M_1 se supusieron iguales a los deducidos para arcos $a'cb'$ a cuyos apoyos se obliga a aceptar tales desplazamientos.

Como los corrimientos de las líneas de apoyo son muy pequeños por ser pre-tensados los diafragmas radiales, las flexiones M_1 que aparecen no llegan a producir tensiones de tracción, eliminándose cualquier problema respecto a la impermeabilidad de la pared de la cuba.

Construcción

La construcción de los cuatro depósitos, con procedimientos análogos para todos ellos, fue estudiada directamente por la "Société Marocaine d'Exploitation des Entreprises Fernández", que realizó las obras bajo el control del Bureau Securitas.

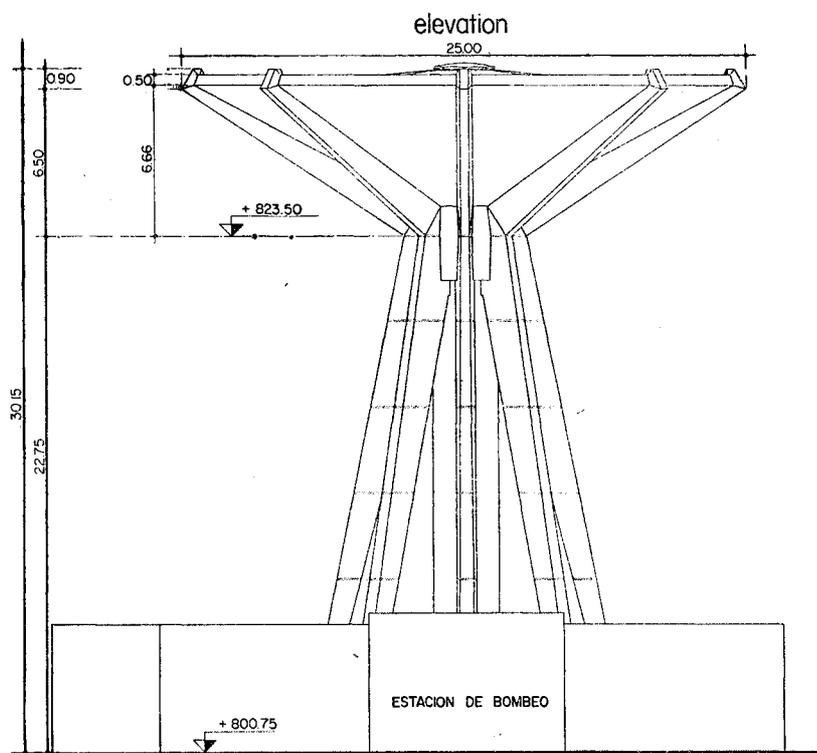


Fig. 7. Depósito de Khouribga - Alzado

Fig. 9. Chimenea central. Depósito de Souk-el-Arba.

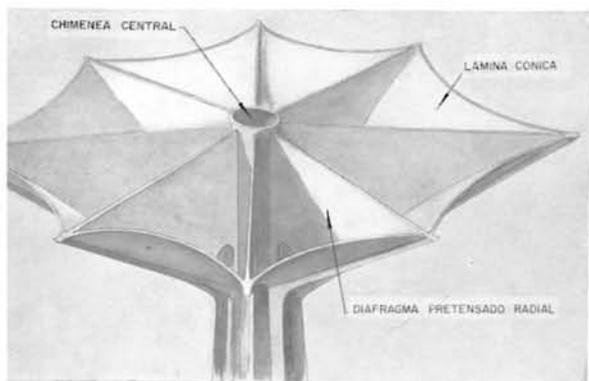


Fig. 8.

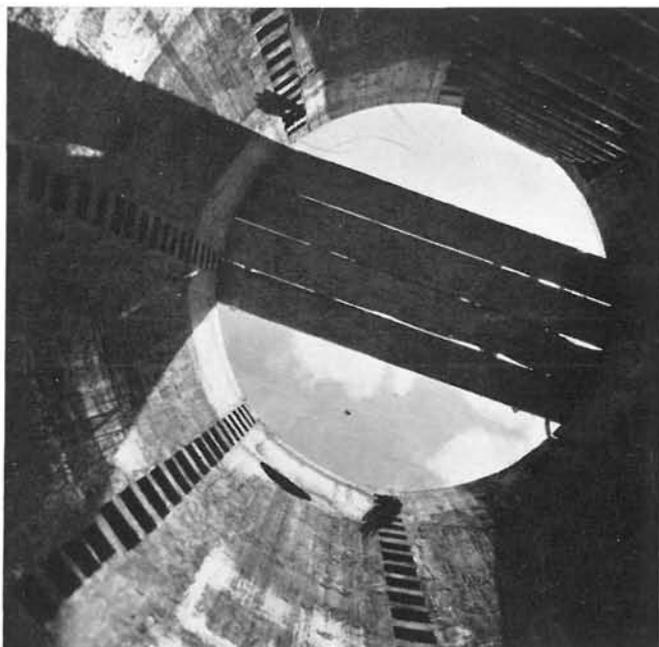


Fig. 10. Depósito de Souk-el-Arba. Preparación del encofrado interior de la chimenea central.

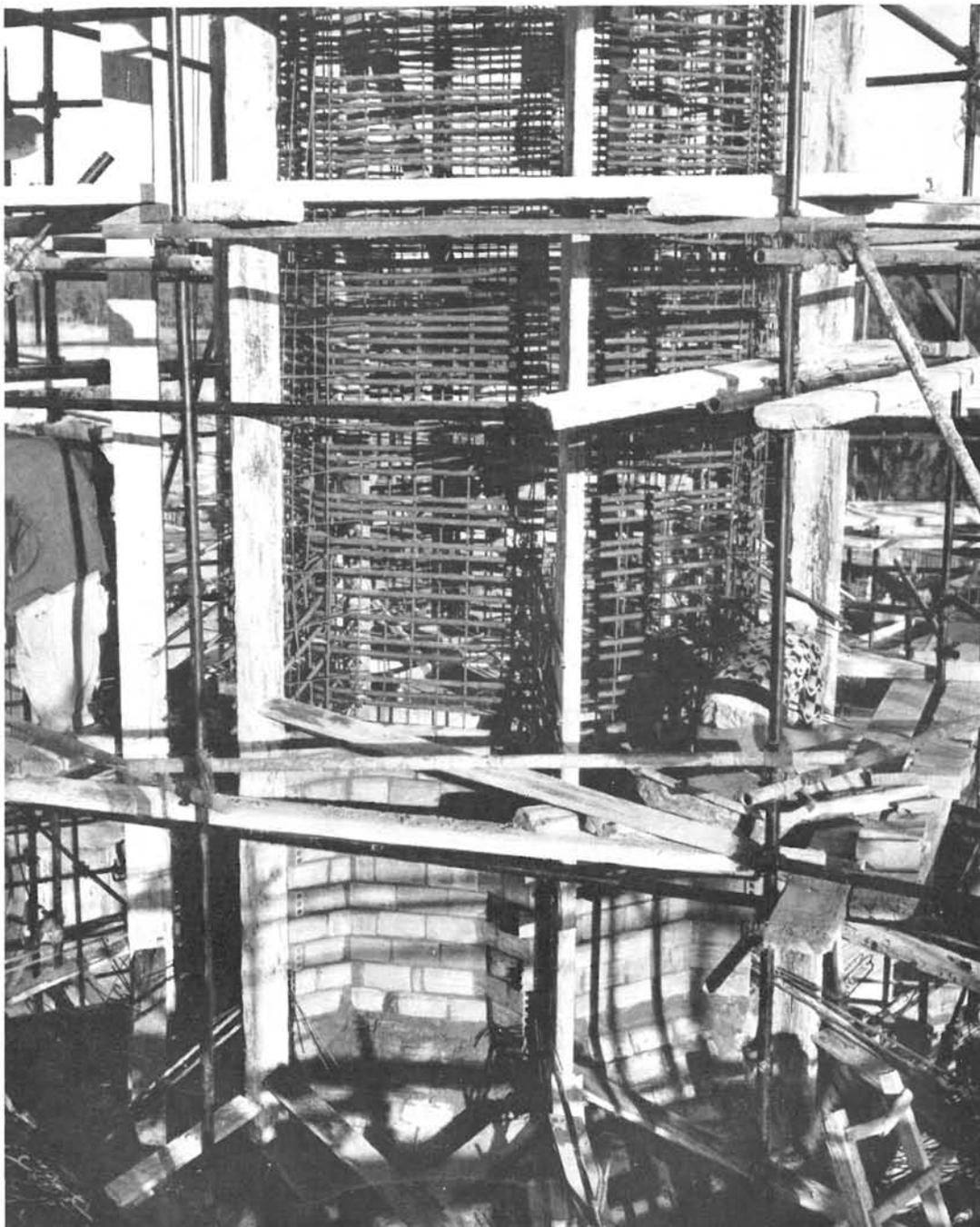


Fig. 11. Depósito de Souk-el-Arba. Armaduras de la chimenea central y encofrado exterior de ladrillo.

El fuste, diferente de unos depósitos a otros, fue construido de forma convencional mediante el uso de andamiajes tubulares y encofrados de contrachapado de marina de gran calidad, ya que en ningún caso debía aplicarse enlucido alguno a las superficies exteriores del hormigón, que muestran, de esta forma, su propia textura matizada con la impronta que en ella dejó el encofrado.

Sobre el fuste se construyó la chimenea central, interior a la cuba, utilizando un encofrado de madera por su paramento interior, y de ladrillo por el exterior (figs. 10 y 11). Para la construcción de la cuba propiamente dicha, se utilizaron dos juegos de encofrados de láminas cónicas y de pantallas radiales. Se empezó hormigonando dos pantallas diametralmente opuestas, y a continuación dos láminas cónicas adyacentes a dichas pantallas e igualmente opuestas. Las pantallas descansaban por su nervio exterior sobre el andamiaje metálico, con rigidez suficiente para absorber los empujes no equilibrados de las bóvedas cónicas conforme se iban desencofrando. A continuación se pasó el juego de encofrados a la posición contigua, procediéndose al hormigonado de un nuevo juego de pantallas radiales y láminas cónicas diametralmente opuestas. De esta forma se dieron cuatro utilizaciones al encofrado y, por lo tanto, se redujo su coste, el cual era muy elevado debido al hecho de que, con objeto de lograr un buen aspecto estético de los paramentos exteriores de las bóvedas, las tablas de encofrado no seguían las



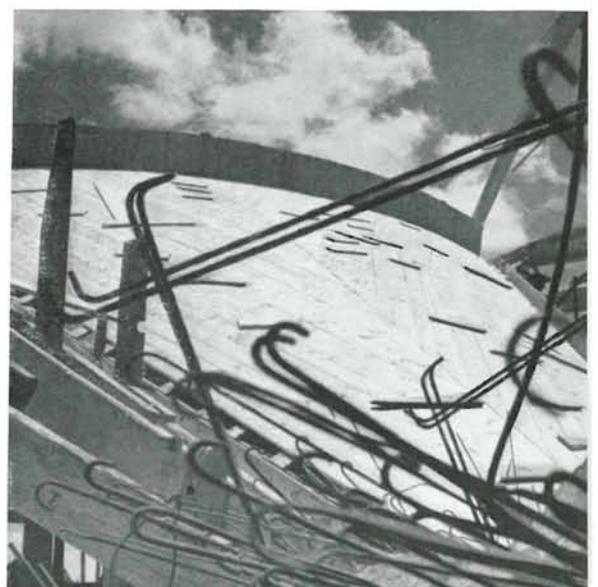
Fig. 12. Depósito de Souk-el-Arba. Anillos octogonales de la chimenea central y arranque del pretensado de los diafragmas radiales.

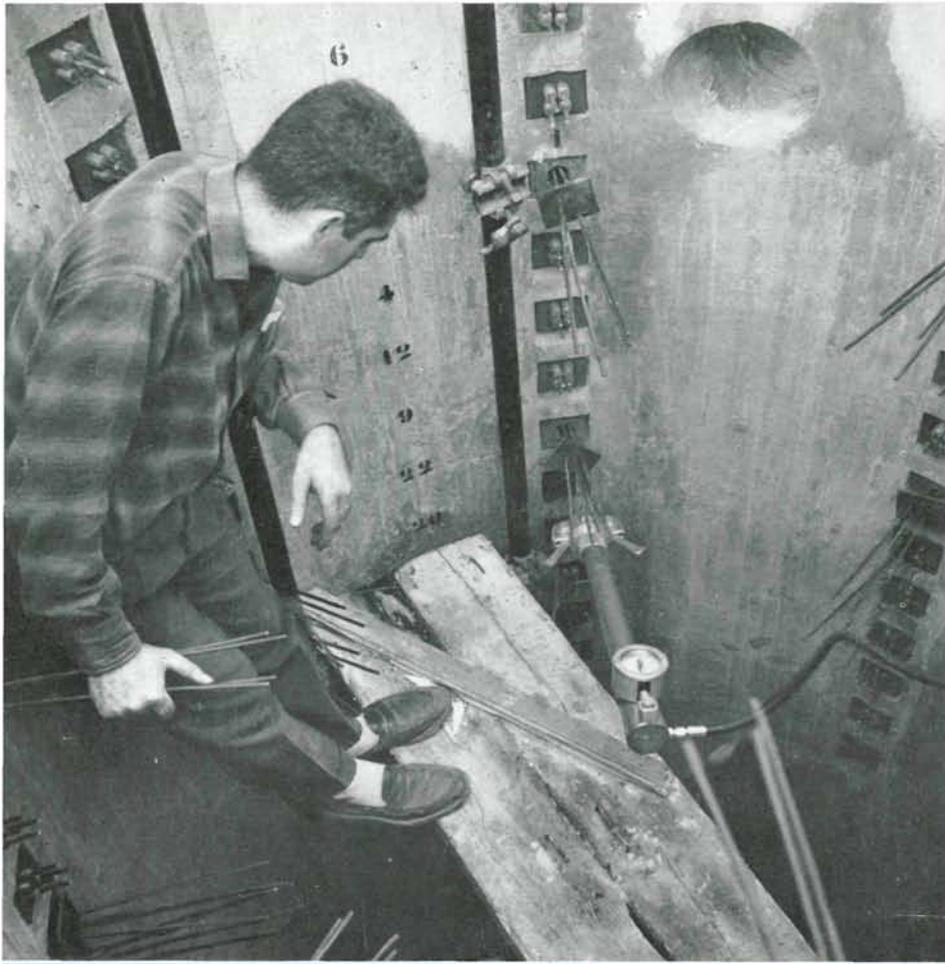


Fig. 13

generatrices del cono, sino que quedaban inclinadas respecto a su eje, siendo, por lo tanto, curvas y encareciendo considerablemente su ejecución. Una vez hormigonadas todas las pantallas y láminas cónicas, se procedió a la construcción de la losa perimetral de cubierta y del murete que remata el depósito por su parte superior, procediéndose, seguidamente, a realizar las operaciones de tesado de los alambres de pretensado.

La construcción de los depósitos se terminaba con el hormigonado de las viguetas entre diafragmas radiales, y la colocación y rejuntado de las losas de cubierta sobre las que se extiende la correspondiente impermeabilización y aislamiento térmico mediante plancha de aluminio.





Figs. 14 y 15. Pretensado de los diafragmas radiales.

Este procedimiento constructivo, que presenta la ventaja de no necesitar un encofrado completo para toda la cuba, tiene, por otra parte, la desventaja de requerir un gran número de juntas de construcción, juntas que siempre representan un peligro de fugas. Se confió, sin embargo, en que la compresión normal a estas juntas producida por la propia carga hidrostática, con un valor medio de 30 kg/cm^2 , sería suficiente para hacer innecesario el uso de cualquier sistema especial de impermeabilización. En el primero de los depósitos construidos, no se sometieron estas juntas a ningún tratamiento especial, y apareció al exterior una línea de humedad según la junta de hormigonado entre la bóveda cónica hormigonada últimamente y la primera pantalla. Pasados unos días desapareció esta humedad sin que desde entonces haya vuelto a aparecer. En el resto de los depósitos se trataron las juntas con chorro de arena, con lo que se consiguió eliminar por completo esta dificultad.

Temiendo que pudiese aparecer alguna fisura en la chimenea central, al entrar el depósito en carga, se previó un nervio en su parte inferior (fig. 4), sobre el que, caso de que ocurriese tal contingencia, se levantaría un muro cilíndrico de ladrillo para dejar una cámara hueca entre dicho muro y la propia chimenea central que se inyectaría con mortero, manteniendo el depósito en carga. De esta forma dicho cilindro de mortero quedaría pretensado al vaciar la cuba, quedando sometido a tensión nula para el estado de plena carga, evitándose su fisuración y asegurando la estanquidad. Sin embargo, en ninguno de los cuatro depósitos ha sido necesario utilizar este dispositivo, ya que no se ha constatado ninguna mancha de humedad por el paramento interior de la chimenea central.



Fig. 16. Depósito de Sidi-Bernoussi.

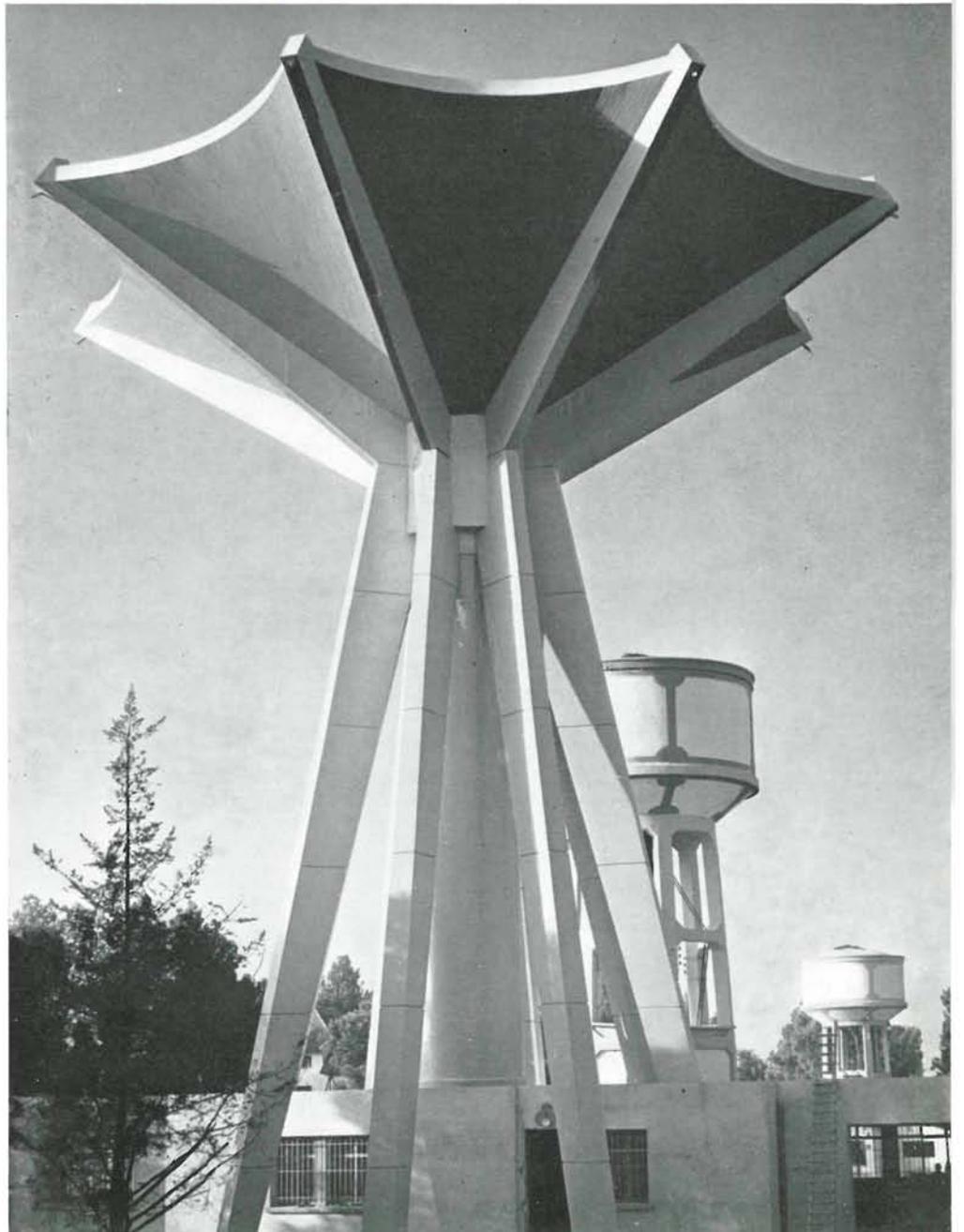


Fig. 17. Depósito de Khouribga



Fig. 18. Depósito de Sidi-Bernoussi.

Evidentemente, los procedimientos que se han utilizado para la determinación de los esfuerzos en los diferentes elementos que constituyen las cubas de los depósitos anteriormente descritos, son meramente aproximados. Sin embargo, los resultados prácticos muestran que el comportamiento del conjunto debe ser muy parecido al calculado, especialmente en lo referente al cálculo de la forma de las láminas cónicas. Aun en las juntas de hormigonado en los arranques de las bóvedas, donde pueden aparecer las máximas flexiones, no ha aparecido fisura de ninguna clase con la única precaución de tratarlas con chorro de arena, lo cual demuestra que las humedades aparecidas en el primer depósito se debieron a una falta de adherencia entre el hormigón fresco de la última lámina construida y el viejo y curado de la primera pantalla radial.

Châteaux d'eau à parois de voiles coniques

J. A. Torroja, ingénieur.

Au Maroc ont été récemment construits quatre châteaux d'eau, en parties en béton précontraint, d'environ 30 m de haut, d'aspect extérieur agréable et de ligne architecturale harmonieuse.

Les quatre réservoirs sont semblables. L'un d'eux est constitué par un fût élancé qui sert de support à la cuve supérieure. Les trois autres se différencient, principalement, parce que le nombre de supports convergents vers la partie supérieure est différent. Le château d'eau, proprement dit, est composé de huit voiles de surface conique, dont l'axe est incliné. Ces huit voiles ont une forme de secteur dans leur projection horizontale, ce qui a permis de les assembler en mutuelle correspondance diamétrale. Les huit surfaces coniques qui constituent le fond du réservoir sont séparées par des cloisons verticales, précontraintes, formant des alvéoles correspondants, mis en communication entre eux, à leurs bases, de façon à assurer des pressions égales sur les deux faces de chacune des cloisons. L'ensemble de cette structure a une forme géométrique dont la simplicité est clairement démontrée par sa ligne d'une esthétique originale.

La complexité de son analyse a exigé un calcul ingénieux, mais approximatif, pour se maintenir toujours, sur la surface moyenne entre faces externes du voile conique, dans des limites prudentes de la courbe de compressions. Mais l'ambition a été plus grande encore, parce que l'on a obtenu un état de contrainte général dans le voile qui assure non seulement la compression dans les deux directions, mais encore une étanchéité qui soulage la nécessité du soin spécial avec lequel doivent être traités les joints de reprise de bétonnage des châteaux d'eau, pour lesquels l'étanchéité est essentielle.

Le comportement des réservoirs, actuellement en service, confirme les caractéristiques prévues dans les calculs dont l'auteur justifie l'analyse par une approximation que l'on peut admettre, sans nécessité de pénétrer dans de rigoureux développements mathématiques.

Elevated tanks with conic shell walls

J. A. Torroja, engineer.

In Morocco, recently, four elevated water tanks have been constructed, which are about 30 ms above ground level. Parts of them are in prestressed concrete. Their aspect is pleasant, showing a harmonious outline.

The four water tanks are fairly similar. One of them has a slender trunk, supporting the upper container. The other three differ from this one mainly in that the number of supporting columns which converge towards the top varies in each one. The water tank itself is made up of eight inverted conically shaped shell surfaces. They are paired symmetrically in four couples. These eight conical surfaces which constitute the bottom of the tank are separated from each other by vertical diaphragms or partitions. These are prestressed, but the compartments resulting from these partitions are connected at the bottom to ensure equal pressure on each side of the diaphragms. The structure, as a whole, constitutes a geometrical pattern whose simplicity and effectiveness can be easily appreciated from its subtle external beauty.

Because of the complexity of analysing the strength properties of this structure with precision, an approximate method has been adopted, which is simple but ingenious. It is based on assuming a compression funicular of forces which is the mean of the external surface of the conical shells and provides a prudent margin of safety. The designer has also succeeded in inducing such a state of stress on the shell care to the concrete joints, as is the case in conventional concrete water tanks.

These tanks, which are at present in service, have performed very closely as anticipated from the theoretical estimates. This has justified the author in his approximate calculation methods, which appear to be fully acceptable, and avoid the need of undertaking arduous mathematical operations.

Erhöhte Behälter mit Wänden aus kegelförmigen Schalen

J. A. Torroja, Ingenieur.

Kürzlich hat man in Marokko vier erhöhte Behälter, zum Teil aus Spannbeton, in etwa 30 m Höhe über dem Boden erbaut; ihr äusseres Aussehen ist angenehm und ihre architektonische Linie harmonisch.

Die vier Behälter sind einander ähnlich. Zum Beispiel wird einer von ihnen aus einem Körper oder schlanken Schaft gebildet, der als Stütze für den oberen Becher dient. Die drei übrigen unterscheiden sich von jenem in der Hauptsache dadurch, dass die Anzahl der nach oben hin zusammenlaufenden Stützen verschieden ist. Der eigentliche Wasserbehälter setzt sich aus 8 Schalen mit umgestellter kegelförmiger Oberfläche geneigter Achse zusammen. Diese 8 Schalen haben in ihrer waagerechten Projektion die Form eines Sektors, was gestattete, sie in gegenseitigem diametralen Wechsel zusammenzufügen. Die 8 kegelförmigen Oberflächen, welche den Boden des Behälters bilden, sind durch ebenso viele Membrane oder senkrechte Wände getrennt, welche vorgespannt sind und die entsprechenden Zellen bilden; in ihrem unteren Teile sind sie gebührend verbunden, um den Druckausgleich auf beiden Seiten einer jeden Membrane zu verbürgen. Die Gesamtheit dieses Gefüges nimmt eine geometrische Form an; von ihrer Einfachheit und ihrem Erfolg geben die Statik und lineare Feinheit einen klaren Beweis.

Die Vielgestaltigkeit seiner Analyse hat eine annähernde einfache, aber sinnreiche Berechnung erfordert, um stets auf der mittleren Oberfläche der Aussenseiten der kegelförmigen Schalen und innerhalb der vernünftigen Grenzen der Druckkurve zu bleiben. Der Ehrgeiz ist aber noch weiter gegangen, denn man hat einen allgemeinen Spannungszustand in der Schale erreicht, welcher den Druck in zwei Richtungen und damit eine bemerkenswerte Undurchlässigkeit gewährleistet, diese entlastet die notwendige und besondere Sorge, mit der man den Beton und die Fugen der Wasserbehälter, bei denen die Undurchlässigkeit von grösster Bedeutung ist, zu behandeln hat.

Die sich gegenwärtig im Betrieb befindenden Behälter haben sich in enger Uebereinstimmung mit den rechnerisch vorgesehenen Kennzeichen verhalten, womit der Verfasser seine Analyse der Annäherung, welche zulässig ist, rechtfertigt, ohne in ein vielgestaltiges, unerbittliches Gebiet umständlicher Lösungen eindringen zu müssen.