



DEPÓSITO DE AGUA EN FEDALA, 1956 / LÁMINA PLEGADA EN LA UNIVERSIDAD LABORAL DE TARRAGONA, 1956

WATER TOWER AT FEDALA, 1956 / FLUTED ROOF ON THE VOCATIONAL TRAINING UNIVERSITY AT TARRAGONA, 1956

DEPÓSITO DE AGUA EN FEDALA

El problema funcional básico que se plantea a la hora de acometer el proyecto de un depósito de agua es asegurar su estanquidad. Este depósito, de 3.500 m³ de capacidad y 35 m de altura, estaba proyectado sobre un anillo de soportes de hormigón armado y en forma de cono truncado. Torroja proyectó una lámina de hormigón en forma de hiperboloide de revolución postensado a lo largo de las dos familias de generatrices rectas. Consegua de este modo una superficie de fácil moldeado continuo, un volumen relativamente pequeño de hormigón—debido al espesor reducido de la superficie— y de armadura, pero quedaba por resolver el problema del encofrado, especialmente costoso en superficies de doble curvatura, y recurrió a sus amadas bóvedas a la catalana de rasilla para solucinarlo en la superficie tórica del fondo del depósito y de la cubierta.

Así pues las armaduras de tesado se dispusieron según las líneas rectas que constituyen las dos familias de generatrices, de modo tal que esta distribución permite una fácil colocación en obra. El tesado de estas armaduras desde el borde superior del depósito produce un estado de bicompresión que contrarresta las tracciones debidas al agua, disminuyendo el peligro de fisuración y, por tanto, las pérdidas de agua.

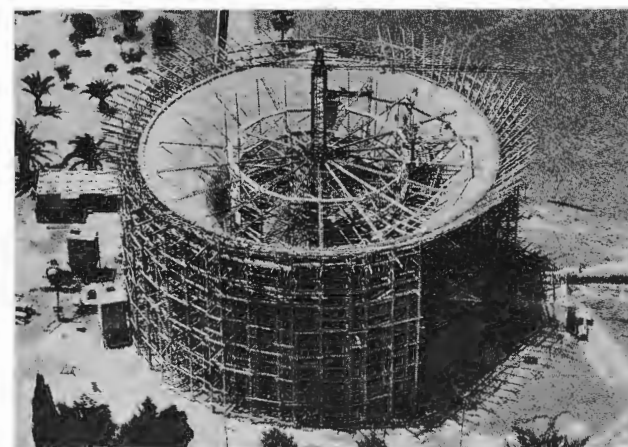
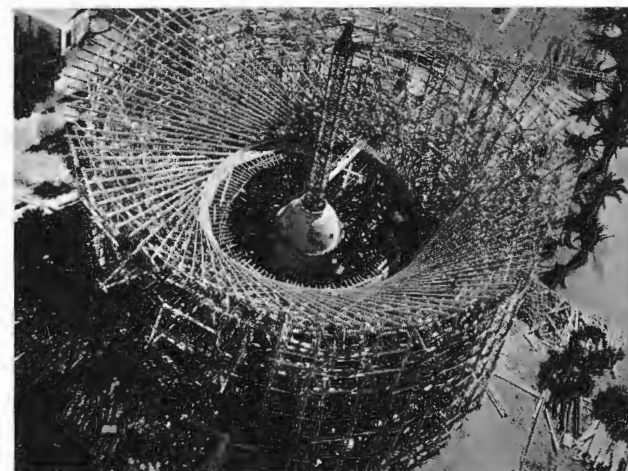
El fondo del depósito se acometió mediante la construcción de una bóveda tórica que apoya su contorno exterior sobre los soportes de hormigón existentes y el interior—situado en una cota inferior— sobre la chimenea central de acceso; el encofrado se montó sobre camones radiales de madera. En la unión de la circunferencia de la bóveda de fondo

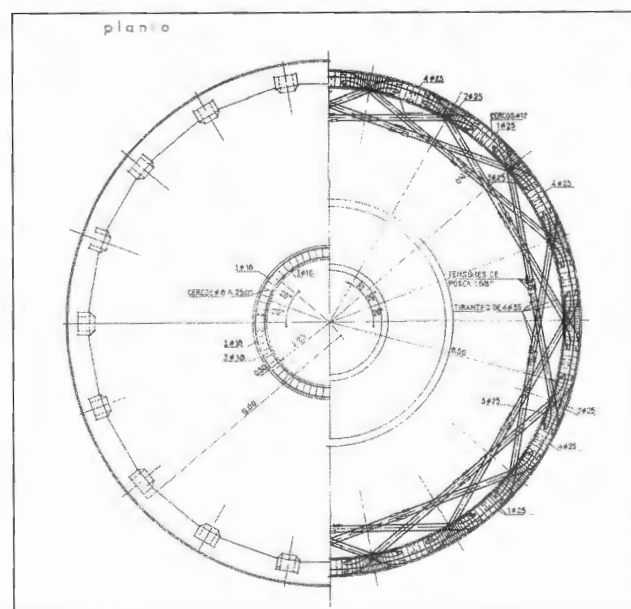
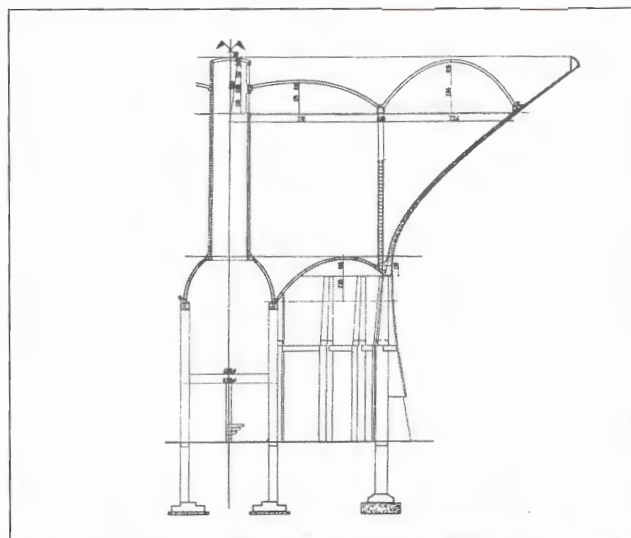
WATER TOWER AT FEDALA

The chief functional problem posed in water deposit design is water-tightness. In essence, this 35-m high tower, with a capacity of 3,500 m³, is an upside-down blunt cone resting on a ring of reinforced concrete supports. Torroja designed the concrete shell in the form of a hyperboloid of revolution, post-tensioned along the two families of straight generatrices. The resulting surface was not only well suited to continuous pouring but, in light of the minimal thickness of the shell, required relatively small quantities of concrete and reinforcing steel. The problem posed by the formwork, however, a particularly costly item for structures with double curvatures, remained to be solved. Torroja resorted to the hollow brick vaulting of which he was so fond to solve this problem in the toroid surfaces on the floor and roof of the tower.

The tower, then, was engineered to have tension reinforcing bars along the straight lines constituting the two families of generatrices, an arrangement readily implemented on the work site. Tensioning these bars from the top of the deposit induced a state of biaxial compression intended to offset the tensile stress caused by the water, reducing the danger or cracking and therefore of leaks.

The tower floor is a torus whose outer edge rests on the concrete supports mentioned above and the inner edge—designed to a lower elevation—on the central access shaft; it was built by mounting the formwork on radial wooden ribbing. A ring of horizontal post-tensioned tie rods absorbs the tensile stresses generated at the junc-





con el hiperboloide exterior aparecen tracciones, debidas a la dilatación del zuncho de hormigón que une ambos elementos, y para evitarlas se colocó un cinturón de tirantes postensados dispuestos en un plano horizontal. Éstos se sitúan perimetralmente según polígonos estrellados inscritos en la circunferencia inferior y anclados a las paredes mediante prolongación inclinada; cada tirante llevaba en su parte central los correspondientes tensores de rosca para darles la tensión adecuada.

Por su parte, la cubierta está formada por dos bóvedas tóricas a la catalana de triple hoja: la exterior apoya sobre dos anillos de hormigón armado —el exterior colocado sobre la pared del depósito y el interior sobre los soportes radiales que, desde la base, atraviesan el depósito— y la interior, que es más rebajada, se apoya sobre el mismo anillo sobre los soportes radiales y en el interior sobre otro que actúa de zuncho para la chimenea central; ésta transmite los empujes de las bóvedas hasta la cimentación.

Con una pared de espesor de 20 cm en la que había que disponer todas las vainas además de la rejilla de acero normal para armar el hormigón, por las dos caras, y la dificultad en el borde superior en el que unos anclajes tropezaban con otros y apenas podían trabajar los gatos sin tropezarse, esta solución no dejaba tranquilo a Torroja. Así, sólo tres años más tarde y mostrando esa característica tan destacada de su forma de ser, criticaba la solución adoptada y planteaba alternativas para problemas similares.

Propuso en primer lugar un depósito a base de dos paredes concéntricas de ladrillo, con el espacio entre ambas relleno de grava, y apoyadas sobre una chimenea del mismo material.

La pared exterior iría armada con acero normal y enfoscada interiormente. Con el depósito lleno de agua se inyectaría el mortero que produciría una compresión en la pared interior que, una vez fraguado el material inyectado, queda comprimida y el hormigón entre las dos paredes no sufre tracciones por efecto del agua; de este modo se logra un efecto análogo contra la fisuración pero de forma más económica que la del pretensado clásico.

tion between the circumference of the floor dome and the outer hyperboloid due to the expansion of the concrete tie beam that joins the two members. These rods, which describe stellar polygons around the perimeter of the lower circumference, are attached to the wall with slanted extensions; each rod is fitted with a turnbuckle in the middle that was used during construction for tightening as needed.

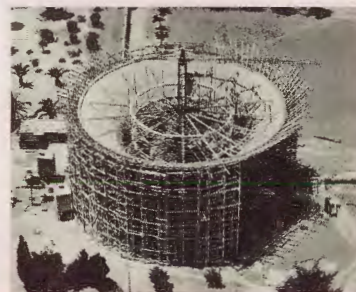
The roof, in turn, is designed around two concentric masonry tori with a structure consisting of three courses of hollow brick. The outer torus, which has a higher elevation, rests on two reinforced concrete rings —the outer-most of the two crowning the tower wall and the other, the internal ring, supported by radial uprights running from the base to the top of the tower. The inner, lower, torus rests externally on the same ring of radial supports, and internally on the ring beam circling the central shaft that transmits the thrust from the domes to the foundation.

After having to cope with housing both the ribs and the standard steel reinforcement for both sides of the concrete in a shell only 20 cm thick, and the contend with the difficulties encountered at the top of the tower where some of the anchorages were so tightly spaced that they interfered with one another and with the jacks, Torroja concluded that this solution was less than satisfactory. Just three years later, true to one of his more prominent personality traits, he openly criticized the solution adopted and advanced alternatives for similar situations.

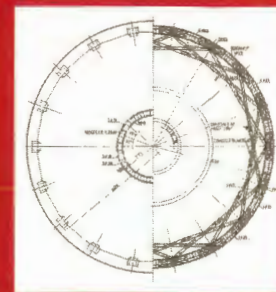
First he proposed a tower consisting in two concentric brick walls resting on a shaft also made of brick. The space between the two walls would be filled with gravel.

The outside wall would be reinforced with normal steel and rough-plastered on the inside. The mortar would be injected with the tower full of water. The compression induced in the interior wall, once the injected material should set, would prevent the concrete between the two walls from receiving tensile stress due to the action of the water. The anti-cracking effect achieved would be similar to but less expensive than in traditional prestressing.

UNIVERSIDAD LABORAL DE TARRAGONA 1956



DEPÓSITO DE AGUA EN FEDALA 1956



«La nave es de forma rectangular, con 57.60 x 20 m de luz libre. Se trata de una cubierta plana, plegada, constituida por una serie de placas triangulares de 12 cm de espesor, alternativamente inclinadas en uno u otro sentido, y cuyas líneas de intersección forman las correspondientes limatesas y limahoyas. Las limatesas son horizontales, pero no normales a los planos de fachada. Las limahoyas, contenidas en planos perpendiculares a las fachadas, tienen una determinada pendiente que facilita la evacuación de las aguas pluviales. Dada la igualdad de todos estos triángulos y su desarrollo plano, el encofrado de la lámina resulta muy sencillo. La rigidez del conjunto se consigue mediante el enlace entre los sucesivos elementos triangulares.

Cada uno de estos elementos lleva una armadura de pretensado, constituida por diez grupos de tres alambres de 5 mm de diámetro de carga de rotura. Estos alambres de acero especial van colocados en el centro del espesor de la placa y con el trazado conveniente para transformar la flexión longitudinal en un esfuerzo uniforme de compresión. Sus anclajes se sitúan, los de un extremo sobre la arista que constituye la limatesa, y los del otro, sobre la arista de fachada.»

Además de esta armadura de pretensado, cada placa lleva también otra armadura, sin tesar, constituida por alambres de 5 mm de diámetro, de acero ordinario, agrupados formando mallas de 10 x 30 cm de luz. Esta armadura, destinada a resistir la acción de los momentos flectores transversales de la placa, se distribuye en dos capas: como la cubierta, en su conjunto, es una superficie desarrollable, la colocación de esta armadura resulta muy sencilla.»

«Para construir la cubierta se empleó un encofrado independiente de los muros de fachada, colocado sobre unas bielas o aparatos provisionales de apoyo. De esta forma, al no existir coacción exterior alguna, la cubierta puede acortarse libremente bajo la acción del esfuerzo de pretensado, y la introducción de este esfuerzo en la armadura principal puede realizarse sin temor a que se originen tensiones secundarias perjudiciales. Una vez fraguado y suficientemente endurecido el hormigón, se efectuó el tesado de esta armadura principal, durante el cual la estructura se despegó, automáticamente, de su encofrado.»



«El principal problema durante el diseño de este depósito de 3.500 metros cúbicos de capacidad era encontrar un método de impermeabilización satisfactorio. Para ello, se modificó la forma inicial (un cono truncado) optando por un hiperboloide de revolución, que permite un doble pretensado según sus dos familias de directrices rectas. De este modo toda la pared queda en bicompresión y se evita el peligro de fisuración bajo la acción centrífuga de la presión hidrostática.»

«El espesor de la cuba, de 28 cm en su base, se reduce gradualmente hasta llegar a 17 cm a la altura superior de la lámina de agua; el resto, hasta la coronación mantiene un espesor constante de 10 cm.

El fondo está formado por una bóveda tórica, apoyada exteriormente en el anillo de soportes e interiormente en la chimenea central de acceso. Para disminuir el coste del encofrado, éste se substituyó por una bóveda a la catalana de triple hoja, montada sobre simples camones radiales de madera.»

«Para evitar la dilatación del anillo exterior, zunchos de la bóveda tórica en su unión con la superficie del hiperboloide, se dispuso una serie de armaduras que por debajo del fondo forman un polígono estrellado. Un simple tensor de rosca en cada barra permite su tesado, fácilmente regulable.»

«La cubierta está formada por dos bóvedas a la catalana, de triple hoja, de forma tórica, que se apoyan sobre tres anillos concéntricos de hormigón armado: uno central, que zuncha la chimenea; otro intermedio, apoyado en una serie de soportes que, en prolongación a los de la base, atraviesan la cuba; y el tercero, alojado en la pared exterior del vaso.»

«Esta construcción es un buen ejemplo de las posibilidades formales y estructurales del hormigón pretensado. Su original silueta campaniforme, destacándose sobre el horizonte, constituye un punto dominante sobre la línea de cornisa y viene a ser como un símbolo del dominio de la técnica en beneficio de las condiciones de vida de un pueblo.»

«A continuación, mediante la acción de unos gatos hidráulicos, se elevó toda la cubierta unos centímetros para colocar los rodillos metálicos que constituyen sus apoyos definitivos, y sobre éstos se situó finalmente la cubierta al descender y retirar los gatos.

En la colocación de la cubierta en su posición definitiva se invirtió, únicamente, una semana.»

«Para el proyecto de esta estructura, se ha desarrollado, en el Laboratorio Central de la Escuela de Ingenieros de Caminos de Madrid, un estudio experimental sobre un modelo a escala 1:15.»





Otra solución, a base de un depósito tronco cónico presentaba el problema de construir un cono de modo que la pared interior esté comprimida. Para ello proponía hacer la sección horizontal dividida en sectores —en lugar de hacerla circular— y disponer armadura sin pretensar en la cara exterior. Para conseguir que la pared en contacto con el agua esté en compresión, «basta hacer cada sector con un radio de curvatura mayor que el de la circunferencia final, con objeto de que, al venir la presión del agua, los lleve a la curvatura final.

Así, el sector se dobla; la armadura exterior entra en tracción, y la pared interior queda en compresión automáticamente: es cuestión de estudiar cuáles son los radios de curvatura que hay que dar para que pase eso al llegar al final». Se puede hacer por llenado de agua con lo que quedaría más compresión en la parte central de cada sector que en los bordes en la zona de las juntas, pero, alternativamente, también se puede conseguir abriendo las juntas mediante gatos aplicados excéntricamente; la acción de los gatos y las reacciones de las armaduras que atraviesan las juntas producen un momento flector constante de junta a junta y, por tanto, la compresión de la pared será también constante a lo largo de toda la circunferencia.

No obstante sus críticas, la solución adoptada para el depósito en Fedala satisfacía a Torroja desde el punto de vista estético: «Su original silueta campaniforme, destacándose sobre el horizonte, constituye un punto dominante sobre la línea de cornisa y viene a ser como un símbolo de la técnica en beneficio de las condiciones de vida de un pueblo».

Another solution —for a truncated cone tower— posed the problem of building a cone with a compressed interior wall. The solution proposed by Torroja was to divide the horizontal section into sectors —instead of taking the circle as a whole— and placing non-prestressed rebar on the outer face. For the wall in contact with the water to be compressed, «all it would take is to build all the sectors with a greater radius of curvature than the final circumference so they would be forced into the final position by the water pressure.

This would make the sector bend; the external reinforcing steel would receive its tensile loading and the interior wall would automatically be compressed: the question, then, is to determine the radii of curvature needed for all this to happen». Filling the tower with water would apply greater compressive stress on the central area of each sector than on the edges where the joints are located, but this same effect could be achieved by jacking the joints open with eccentric forces: the action of the jacks and the reaction of the reinforcing steel running across the joints would generate a constant bending moment from joint to joint; the compression on the wall would, therefore, also be constant around the entire circumference.

Despite his own self-criticism, Torroja found the overall design of the Fedala water tower to be attractive. «Its distinctive bell-shaped silhouette stands out against the horizon, towering over the cornice line, a veritable symbol of how technology can serve the interests of a town and enhance the standard of living of its people».

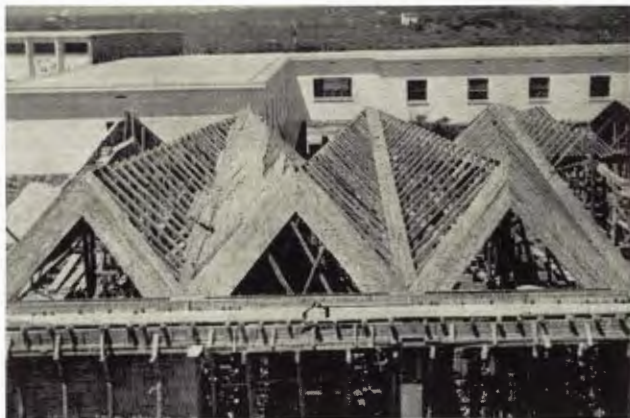


LÁMINA PLEGADA EN LA UNIVERSIDAD LABORAL DE TARRAGONA

La cubierta proyectada en hormigón pretensado por Torroja cubre una nave rectangular de 57,60 m x 20 m de luz, y está constituida por una serie de placas triangulares de 12 cm de espesor colocadas alternativamente inclinadas en sentidos opuestos. Esta disposición produce en las intersecciones de las placas las correspondientes limatesas y limahoyas, de modo que aquéllas son horizontales pero no normales a los planos de fachada, y las limahoyas, que

FLUTED ROOF ON THE VOCATIONAL TRAINING UNIVERSITY AT TARRAGONA

This pre-stressed concrete roof was designed by Torroja to cover a rectangular shell measuring 57.60 m x 20 m. It consists of a series of triangular plates 12 cm thick, alternately placed at opposite slants. This arrangement generates the respective hips and valleys at the intersections between plates. The former are horizontal but not normal to the planes of the facade, and the valleys, which lie on planes perpendicular to the



están contenidas en planos perpendiculares a las fachadas, presentan la pendiente adecuada para la evacuación de las aguas pluviales.

Dado que todas las piezas triangulares son iguales entre sí —limitadas por una limatesa, la limahoya adyacente y la intersección del plano definido por ambas con el plano de fachada— y presentan un desarrollo plano, el encofrado de la lámina resultó muy sencillo.

La rigidez del conjunto se confía al enlace entre los sucesivos elementos triangulares, dotados, cada uno de ellos, de una armadura de pretensado —a base de 10 grupos de 3 alambres de 5 mm de diámetro y de 150 kg/mm² de carga de rotura. El trazado de estos alambres es tal que transforma la flexión longitudinal, debida al peso propio, en un esfuerzo uniforme de compresión. Los anclajes se sitúan, en un extremo sobre la limatesa y en el otro sobre la arista de fachada.

Para resistir los momentos flectores transversales de la placa se dispuso otra armadura en dos capas —en las proximidades de ambas caras— a base de alambres de acero ordinario formando una malla de 10 × 30 cm; la colocación de estas armaduras resultaba muy cómoda debido a que la cubierta es una superficie desarrollable.

El encofrado de la cubierta, independiente del de los muros de fachada, se dispuso sobre unos aparatos de apoyo provisionales para permitir el acortamiento de la cubierta bajo la acción del pretensado. El tesado de la armadura provisional despegó la estructura de su encofrado y, además, mediante unos gatos hidráulicos se elevó ligeramente la cubierta para colocar los rodillos metálicos que constituyen los apoyos definitivos; éstos, situados sobre la coronación de los muros de la nave, están orientados para que las prolongaciones de sus ejes coincidan en un mismo punto para permitir la dilatación libre de la cubierta bajo los efectos de la temperatura o la humedad.

La estructura se estudió en modelo reducido en el Laboratorio Central de Materiales de la Escuela de Ingenieros de Caminos de Madrid.

facades, are sufficiently sloped to ensure rainwater drainage.

These arrangements, i.e., a series of flat and identical triangular elements bounded by a hip, the adjacent valley and the intersection of the plane defined by these two lines and the plane of the facade, greatly facilitated formwork design and placement.

The stiffness of the structure as a whole depends on the bonding between the successive triangular members, each of which is fitted with pre-stressed reinforcing steel, consisting of 10 sets of three 5-mm Ø wire with an ultimate load of 150 kg/mm². These wires are laid in such a way that longitudinal dead-weight bending is transformed into uniform compression stress. The points of anchorage are positioned on the hip at one end and on the edge of the facade at the other.

A further two layers of wire mesh reinforcement made of ordinary 10 × 30-cm steel were placed near the upper and lower surfaces to resist the transversal flexural moments on the plate. The singly periodic pattern of the roof surface simplified placement of this reinforcement.

The roof formwork, which was not the same as the falsework used for the facade walls, was laid on provisional supports to allow for roof shortening in response to pre-stressing. Tensioning of the provisional reinforcement loosened the formwork from the concrete. The roof was subsequently raised with hydraulic jacks to set the permanent supports —steel rollers— in place. Situated at the top of the facade walls, these rollers are positioned so that the extensions of their centrelines all converge at the same point to allow the roof to freely expand in response to temperature and humidity changes.

A scale model of this structure was studied in the Madrid School of Civil Engineering's Main Materials Laboratory.

