

El desastre del Tercer Depósito, cien años después

The disaster of the Third Water Storage Deposit, one hundred years on

Antonio Burgos Núñez. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Ramos & Ramos Arquitectos, S.A. (Grupo Evemarina). aburgos@caminos.recol.es

Resumen: Al comenzar el siglo XX el hormigón armado estaba empezando a difundirse en España. Tras algunos años utilizándose en proyectos menores, parecía que había llegado su consolidación con la cubierta del Tercer Depósito del Canal de Isabel II en Madrid, importante obra con la que se pretendía acabar con los problemas de abastecimiento de agua de la capital. Sin embargo, parte de esta cubierta se hundió el ocho de abril de 1905, mientras se estaba construyendo. Muchas personas murieron en el desastre, que tuvo una gran repercusión en la convulsa sociedad española de la época. En el ámbito técnico su impacto no fue menor, pues dio lugar a que se cuestionara, tanto dentro como fuera de España, la validez del hormigón armado como material de construcción.

Palabras Clave: Madrid, Depósito, Hormigón armado, Desastre

Abstract: Spain saw the introduction of reinforced concrete at the start of the 20th century. After several years of use in small scale projects, reinforced concrete appeared to have been finally accepted when it was employed in the roof to the much needed Third Water Storage Deposit at the Isabel II Canal in Madrid which aimed to satisfy the water supply problems in the capital. However, part of the roof collapsed on 8 April 1905 while being built. Many people died in a disaster which shocked the Spanish public at the time. The disaster had a similar impact in technical terms as the use of reinforced concrete as a building material was subsequently questioned both inside and outside Spain.

Keywords: Madrid, Water Deposit, Reinforced concrete, Disaster

1. Introducción

El 8 de abril de 1905 se produjo el hundimiento de la cubierta del tercer depósito de aguas del Canal de Isabel II en Madrid.

Fue un terrible accidente, en el que perdieron la vida treinta trabajadores y más de cincuenta quedaron gravemente heridos. Provocó una gran conmoción en la opinión pública española, alimentando una polémica que duraría varios años.

No obstante, su repercusión aún fue mayor en el ámbito de la construcción, pues al ocurrir en una de las primeras grandes obras de hormigón armado de España, estuvo cerca de paralizar el desarrollo de este por entonces nuevo material de construcción en nuestro país.

El desastre ocurrió hace ahora cien años.

2. El tercer depósito para Madrid

Al empezar el siglo XX el abastecimiento de aguas de Madrid estaba garantizado con el Canal de Isabel II. Inau-

1. Introduction

The roof cover of the Canal de Isabel II third storage reservoir collapsed in Madrid on 8 April 1905.

It was a terrible accident in which thirty workers lost their lives and some fifty others were seriously injured. The incident shocked the Spanish public and gave rise to a controversy which would last for years.

However, the repercussions were even greater in the building industry as the accident affected one of the first large-scale reinforced concrete works to be carried out in Spain and almost led to the complete stoppage of, what was then, a fledgling construction material in the country.

The disaster happened just over one hundred years ago.

2. The third storage reservoir for Madrid

At the start of the 20th century the water supply to Madrid was guaranteed by the Canal de Isabel II water service. The system was opened in 1858 and was one of the

gurado en 1858, era una de las grandes obras de nuestra ingeniería civil decimonónica: una conducción de setenta y seis kilómetros de longitud, formada por canales, túneles, acueductos y sifones, que desde las presas de Navarejos, el Pontón de la Oliva y El Villar traía diariamente a la capital 140.000 metros cúbicos de agua del Lozoya (1).

Sin embargo, ya desde su puesta en servicio venía arrastrando el problema de la escasa capacidad de almacenamiento. Inicialmente se había construido un depósito de 58.000 metros cúbicos, dos veces y media el volumen diario estimado para una población de 250.000 habitantes con un consumo diario de noventa litros (2).

Pero el consumo real desde el primer momento estuvo por encima de esa cifra, dándose por otro lado un continuo aumento de la población. De tal forma que dos años después de su inauguración hubo de presentarse un proyecto para la construcción de otro depósito. Realizado por el ingeniero de caminos Juan de Ribera, por entonces director del Canal, contemplaba una capacidad de 180.000 metros cúbicos.

Las obras del que pronto se conocería como *Depósito Mayor* comenzaron en 1862, pero por diversos problemas se fueron prolongando (los trabajos de terminación todavía se estaban licitando en 1893 (3)). Mientras tanto, el consumo y la población no paraban de crecer, obligando a ponerlo en servicio aún sin estar concluido.

En 1877 era ya evidente que con el ritmo de crecimiento de la capital pronto no bastaría con los dos depósitos para asegurar su abastecimiento. Por otro lado, estaba el riesgo de que se produjera una avería seria en el canal que interrumpiese el servicio. En ese caso, con el agua acumulada sólo se podría atender el suministro de agua a Madrid unos pocos días.

Además estaba el problema de las turbias. En época de tormentas el agua del río llegaba al Canal arrastrando mucha tierra. Cuando llegaba la turbia se suministraba el agua clara almacenada en los depósitos, pero cuando esta se acababa (lo cual sucedía a menudo, dada la escasa capacidad) no había más remedio que dar el agua sucia conforme llegaba, con el consiguiente perjuicio para los consumidores.

Consciente de la gravedad del asunto, el gobierno, mediante Real Orden promulgada el primero de octubre de ese año, encargó que se hiciera el proyecto para construir un nuevo depósito, "que pudiera contener el volumen consumido por el vecindario de Madrid en un mes". La tarea fue encomendada a Serafín Freart, ingeniero jefe de caminos.

Don Serafín rápidamente se puso manos a la obra, empezando por determinar la capacidad que debería tener el nuevo depósito. Observando la evolución del consumo de agua y teniendo en cuenta el incremento probable de la población estimó en 40.000 metros cúbicos el volumen

greatest Spanish civil engineering works of the nineteenth century: stretching over seventy-six kilometres and formed by canals, tunnels, aqueducts and siphons which brought 140,000 cubic metres of Lozoya (1) water each day from the Navarejos, Ponton de la Oliva and El Villar dams.

The system was plagued by a lack of water storage capacity from the very time it was opened. The supply was initially served by a 58,000 cubic metre tank which was two and a half times over the estimated daily demand for a population of 250,000 people with a daily consumption of ninety litres (2).

However, real consumption far outstretched this figure from the very outset and the shortage was further heightened by continuous population growth. In response to these failings it was considered necessary to construct a new storage reservoir just two years after the opening of the service. The storage reservoir was designed by the civil engineer Juan de Ribera, the Canal's director at the time, and was planned to have a capacity of 180,000 cubic metres.

The work on what was soon to be known as the Deposito Mayor, began in 1862, but construction was handicapped by a number of problems (the finishing work still being tendered for in 1893(3)). However, the ongoing rise in both consumption and the population made it necessary to use the reservoir before it was completed.

By 1877 it was already clear that the two reservoirs would not meet future demand on account of the rapid growth rate in the capital's population. The canal also ran the risk of a serious breakdown which would interrupt supply. In the event of any such failure, the water stored in the reservoirs would only be able to supply Madrid for a few days. The supply also had a problem with turbid waters. In times of storms the river water would bring sediment into the Canal. When the silt arrived, the clear water stored in the tanks would first be supplied but when this was used up (as was often the case due to the scarce storage capacity) there was no other alternative but to employ the turbid waters as they arrived, to the detriment of consumers.

The Government were aware of the gravity of the situation and issued an Order in Council on the first of October of this year ordering a project to construct a new storage reservoir "which could hold a month's supply of water for the population of Madrid". The work was subsequently entrusted to the chief civil engineer, Serafín Freart.

Freart rapidly set to work and first attempted to establish the capacity required of the new reservoir. Studies were made of the development in water consumption and the predicted rise in population and it was, subsequently, estimated that the city would require 40,000 cubic metres of water to cover its daily needs. A further study was also carried out on the period of turbid waters and it was found

necesario para cubrir las necesidades de la Villa en un día. Por otro lado, también estudió la duración de las turbias, concluyendo que estas no pasaban de veinte días. Así pues, pudiendo acumular el agua necesaria para abastecer durante ese plazo a la población se solucionaba el problema, contando además con un margen razonable para hacer frente a una avería de importancia.

En consecuencia, determinó que había que conseguir una capacidad de almacenamiento del orden de 700.000 metros cúbicos. Como con los dos depósitos ya en servicio se podían almacenar 240.000, el *Tercer Depósito* debía tener una capacidad de 450.000 metros cúbicos.

El siguiente paso fue elegir el emplazamiento idóneo. Para ello tuvo en consideración tanto razones técnicas (altura del agua en la llegada al depósito, conveniencia de que el depósito estuviera enterrado, etc) como económicas (principalmente, el coste de los terrenos que habría que expropiar y las obras accesorias que habría que realizar). Tras analizar varias alternativas, decidió situar el nuevo depósito junto al primero que se construyó, en *"la extensión comprendida entre el acueducto de Villa, el camino de Amaniel y el de Aceiteros"*.

Una vez determinadas su capacidad y localización, quedaba el diseño del depósito propiamente dicho. Debiendo tener la misma altura que los anteriores (6,65 metros), se optó por una planta rectangular de 339 x 216 metros. Internamente no se dividiría en compartimentos.

Al estar el depósito completamente enterrado, el vaso se formaba con taludes inclinados a 45° y revestidos con fábrica de ladrillo y mortero hidráulico para evitar filtraciones. En el fondo se disponía una solera de hormigón de medio metro de espesor. Tanto para esta como para los revestimientos se prescribía el empleo de cemento natural de Zumaya.

La cubierta se resolvía con bóvedas de rosca de ladrillo de 28 cm de canto, recubiertas por una capa de hormigón de 10 cm de espesor, sobre la que se extendería una capa de tierra que sirviera de aislante térmico. Estas bóvedas quedarían apoyadas sobre arcadas formadas por muros de ladrillo de 76 cm de espesor, con vanos de aligeramiento. Se hicieron diversos estudios para determinar la luz de las bóvedas, teniendo en cuenta que en su construcción se emplearía el ladrillo tosco de Madrid, cuya mala calidad era por todos conocida. Los cálculos teóricos arrojaron un resultado de ocho metros como luz máxima, valor que fue contrastado mediante el ensayo de una bóveda de prueba.

El proyecto del *Tercer Depósito* fue finalmente presentado en julio de 1881. Se aprobó mediante Real Orden de 23 de noviembre del mismo año, aunque disponiendo que se construyeran dos muros estribos en el interior para formar tres compartimentos y que dos de los cerramientos exteriores se formaran con muros verticales. Con estas modifica-

that these did not tend to last more than twenty days. It was then considered that by storing the water necessary to cover supply over this period, this would solve the problem and would also provide a reasonable margin in the case of any serious leak or failure in the system.

On the basis of these studies, it was established that the city's water supply would need to have a storage capacity of some 700,000 cubic metres. The first two reservoirs could already hold 240,000 cubic metres and the Tercer Deposito or third storage reservoir would then need to have a capacity of 450,000 cubic metres.

The next step was to select a suitable location. The site has to meet technical requirements (water height at arrival to the reservoir, the need for a covered storage area, etc.) and be economically viable (mainly in terms of the cost of land requiring expropriation and the ancillary works required). After studying various alternatives it was decided that the new covered reservoir would be built alongside the first tank built on the "prolongation between the town aqueduct and the Amaniel and Aceiteros roads".

Once the capacity and location had been established it was then necessary to consider the design of the reservoir itself. As the tank had to be the same height as the other storage facilities (6.65 metres) a rectangular arrangement of 339 x 216 metres was selected with no internal compartments.

As the tank was completely buried, the basin was formed by 45° sloping banks lined with brickwork and hydraulic mortar to prevent leaks. The bottom of the basin was formed by a half metre thick concrete slab. Both the slab and the linings employed natural Zumaya cement.

The roof was to be formed by 28 cm thick brick arch vaults covered by a 10 cm thick concrete layer which would be covered by a further layer of earth which would act as insulation. These vaults would be supported on arcades formed by 76 cm thick brick walling with clearance spans. Various studies were carried out to establish the span of the vaults when considering that these would be built in rough Madrid brickwork which was known to be of very poor quality. The calculations showed that the maximum vault span should be no more than eight metres and this was duly verified by testing on a trial vault.

The design of the Tercer Deposito was finally presented in July 1881 and was approved by the Order in Council of 23 November of the same year. However, the Order stipulated that two abutment walls be built within the interior to form three compartments and that two of the external enclosures be formed by vertical walls. After these modifications had been made the final building estimate for the reservoir rose to 5,457,336.60 Pesetas.

However, the project was to be delayed for a long time as the construction of the second tank was encountering many difficulties.

ciones, el presupuesto de ejecución definitivo ascendía a 5.457.336,60 pesetas.

Sin embargo, el proyecto iba a quedar paralizado un largo tiempo, porque la construcción del segundo depósito estaba encontrando muchas dificultades.

Así pues, concentrados todos los recursos en el *Depósito Mayor*, el gobierno no retomaría la iniciativa hasta 1893, cuando, mediante Real Decreto de 12 de julio, convenía en llevar a cabo la construcción del *Tercer Depósito*. Por dificultades económicas se dejaba para más adelante la construcción de la cubierta, con lo que el presupuesto quedaba reducido a 2.860.504,35 pesetas (4).

Aprobado el convenio de expropiaciones y adjudicadas las obras en subasta pública (5) dieron comienzo los trabajos de excavación para la apertura del vaso, que se desarrollarían con normalidad en los años siguientes. En agosto de 1897 se aprobaba un presupuesto adicional de 43.974,16 pesetas (6).

Con el movimiento de tierras en marcha, el ingeniero Diego Martín Montalvo redactó un proyecto modificado, que incluía los cambios contemplados en la Real Orden de 23 de noviembre de 1881. Sometido al dictamen de la Junta Consultiva de Caminos, Canales y Puertos, fue devuelto con la orden de introducir algunas variantes en las obras auxiliares (acueducto de entrada, entronque de con la red de distribución, etc.). No se detuvieron ahí las observaciones, proponiéndose que se estudiara la posibilidad de hacer la cubierta con elementos metálicos (7).

Para atender las peticiones de la Junta Consultiva se recurrió al ingeniero de caminos José Nicolau. Este, tras estudiar diversas posibilidades, presentó un nuevo proyecto para el *Tercer Depósito*, que incluía significativas variaciones.

Entre las más destacadas estaba la utilización de cemento Portland en los morteros de revestimiento, en lugar del cemento natural previsto inicialmente. También dispuso la colocación de una capa de 10 cm de hormigón de cemento Portland sobre la solera, para la cual no modificó la prescripción inicial de hacerla con el cemento de Zumaya. Estas medidas mejorarían sustancialmente la impermeabilización del depósito (8).

También era importante la introducción de un muro interior que dividía el depósito en dos compartimentos. Dicho muro era de sección triangular y se haría con fábrica de ladrillo, revestida de igual forma que los exteriores.

Pero la principal novedad de su proyecto estaba en la solución que proponía para la cubierta. Estudió diversas posibilidades (cubierta hecha sólo con elementos metálicos, cubierta de fábrica y columnas de fundición) para decidirse al final por una apuesta arriesgada: una cubierta de bóveda de ladrillo sobre jácenas metálicas y pilares de ladrillo. Lo novedoso de su propuesta radicaba en su sistema de aislamiento, ya que confiaba resolverlo construyen-

In this way and after focusing all resources on the second Deposito Mayor, the Government did not resume action until 1893 when Order in Council of 12 July for the construction of the Tercer Depósito. Due to financial restrictions the roof cover would not be built until a later stage and the budget was, subsequently, reduced to 2,860,504.35 Pesetas (4).

An expropriation agreement was approved and after the work had been awarded by public tender (5), excavation then began for the basin area and the work continued without incident over the following years. In August 1897 an additional budget of 43,974.16 Pesetas (6) was approved.

Once the earthworks were underway, the engineer Diego Martín Montalvo drafted a modified design which included the changes indicated in the Order in Council of 23 November 1881. The design was submitted to the approval of the Roads, Channel and Ports Consultation Board and was returned with the order to introduce various changes in the auxiliary works (entrance aqueduct, connection with the supply network, etc). However, the observations did not stop there and it was proposed that a viability study be made into the use of steel components (7) in the roof cover.

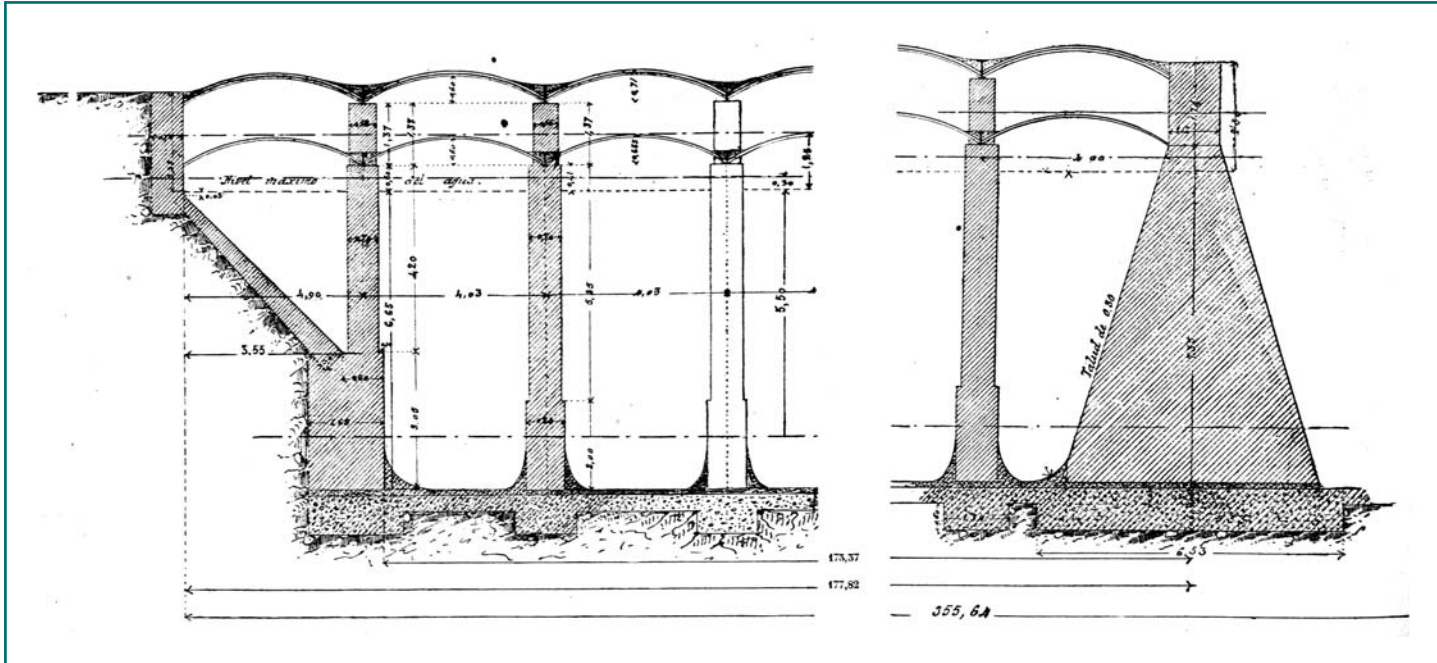
The civil engineer José Nicolau was approached in order to meet the requests of the Consultation Board. After studying various possibilities, the engineer presented a new project for the Third Storage Reservoir which included significant variations from the original design.

One of the most important changes was the use of Portland cement in the facing mortars instead of the natural cement originally specified. The engineer also considered laying a 10 cm thick layer of Portland cement based concrete over the base slab though this do not alter the original specification of the Zumaya cement base. These indications substantially improved the waterproofing of the reservoir (8).

Another important factor was the introduction of an internal wall which separated the basin into two compartments. The wall was to be triangular in section and formed in brickwork with the same linings employed in the external walls.

However, the main innovation of the project lay in the solution for the reservoir cover. After studying various possibilities (an entirely metal roof, brick covers and iron columns) the engineer finally opted for a somewhat daring proposal in the form of a brick shell cover set on iron girders and brick columns. The novelty of this proposal lay in the insulation system as it was decided to resolve this by constructing two superimposed shells with an intermediate air cavity.

In order to demonstrate the feasibility of his design, the engineer discovered that the system had already been



do dos bóvedas superpuestas, con una cámara de aire entre ellas.

Buscando argumentos que pudieran apoyar su diseño encontró que este sistema ya se había utilizado en un depósito de la India. Lo estudió detenidamente, comprobando que cumplía los requisitos de aislamiento para el clima de Madrid. Se decidió finalmente por él tras observar el comportamiento de un local para pruebas que mandó construir.

Con estas modificaciones y un ligero ajuste de las dimensiones primitivas, su proyecto fue aprobado por Real Orden de 20 de agosto de 1898, con un presupuesto de ejecución de 5.083.990,61 pesetas. El nuevo pliego de condiciones técnicas y económicas, también redactado por D. José, fue aprobado con otra Real Orden, de 17 de octubre del mismo año (9).

Un mes después tendría lugar la subasta para la adjudicación de las obras (10), con lo que parecía que por fin iban a solucionarse las graves deficiencias del abastecimiento de Madrid.

Y en efecto, las deficiencias eran serias. Sin resolver prácticamente desde la construcción del Canal, el problema había empeorado notablemente en los últimos años, por el gran crecimiento que venía experimentando la capital. Las frecuentes turbias y las dificultades para hacer llegar el agua a muchas zonas por falta de carga provocaban constantes quejas de los usuarios. Redundando en el descontento, la prensa puso en su punto de mira al Canal, destacando el diario *El Liberal* por la dureza de sus ataques. El deterioro del servicio llegó a provocar airadas intervenciones en el Parlamento, como la del diputado Ruiz Ji-

employed on a reservoir in India. Nicolau studied this design in detail and it was seen to meet the insulation requirements for a climate such as Madrid's. He finally opted for the system after observing the behaviour of a purpose-built pilot construction ordered by the engineer.

After these modifications had been made and with a slight adjustment to the originally specified dimension, the design was approved by the Order in Council of 20 August 1898 at an estimated construction cost of 5,083,990.61 Pesetas. The new specifications and estimate, which was also drafted by Nicolau, were approved by the Order in Council of 17 October of the same year (9).

The call for tender for the works was released one month later (10), and it appeared that this would finally overcome the serious water supply shortages in Madrid.

These shortages were, indeed, serious and had not been fully solved since the construction of the Canal. The situation had deteriorated considerably over latter years on account of the rapid growth of the capital. The frequency of turbid waters and the difficulties in supplying water to many areas due to lack of pressure had given rise to constant complaints by users. The discontent was heightened by the press of the day which kept the Canal in the firing line and this was particularly the case of the El Liberal newspaper which never lost an opportunity to ferociously criticize the Canal. The deterioration of the water service led to heated interventions in Parliament, such as those by the member Ruiz Jimenez, whose furious opinions were subsequently rebutted by this very same Revista de Obras Públicas (11).

Fig. 1. Proyecto de José Nicolau. Sección transversal con sistema de aislamiento de doble bóveda. Sección por muro divisorio. Publicado en la R.O.P./Design by Jose Nicolau. Cross-section with double shell insulation system. Dividing wall section. Published in the R.O.P.

ménez, cuyos acalorados juicios se encargó de rebatir la Revista de Obras Públicas (11).

Sin embargo, nuevas complicaciones iban a paralizar otra vez la construcción del *Tercer Depósito*. Esta vez se trataba de problemas relacionados con el terreno. Con las excavaciones en curso empezaron a producirse socavones y derrumbes, originados por la presencia de antiguas minas o galerías que cruzaban todo el subsuelo de la obra.

Para resolver este grave problema, se presentó un primer proyecto de consolidación del terreno, que fue aprobado mediante Real Decreto de 19 septiembre de 1900 (12). Al mismo tiempo se adjudicaban por administración las obras, que consistían básicamente en el macizado de los minados con fábricas de ladrillo y mortero hidráulico.

El avance de los trabajos revelaría la importante magnitud del problema, con galerías generalizadas, algunas hasta a 32 m de profundidad (13). Con el sistema de consolidación adoptado no se podía hacer frente a una operación de tal envergadura, por lo que hubo de plantearse su sustitución. Vino a añadir más leña al fuego una nueva polémica, relacionada con el efecto que sobre la salubridad de las aguas almacenadas podría tener la proximidad al antiguo cementerio de la Sacramental de San Martín.

Para disipar todas las dudas, el gobierno, mediante Real Orden de 10 de agosto de 1901, creó una comisión formada por cinco inspectores del cuerpo de ingenieros de caminos, con la misión de resolver "todas las incidencias relacionadas con la construcción del depósito" (14).

La comisión, presidida por el inspector jefe Rogelio Inchaurreandieta, se ocupó en primer lugar de atajar el problema de los minados. En enero de 1902 se aprobaban los ensayos para un nuevo sistema de consolidación (15), cuyo proyecto definitivo se aprobó mediante Real Decreto de 30 de enero de 1903 (16). Consistía el nuevo procedimiento en extraer el terreno movido hasta alcanzar el firme bajo las galerías, rellenando posteriormente el hueco con tierra apisonada. Los trabajos de consolidación se iniciaron con energía, de forma que seis meses después se habían extraído veinte mil metros cúbicos de tierras y macizado otros quince mil. Concluirían definitivamente a finales de 1903.

Con el problema de los minados en vías de resolverse, la comisión pasó a replantearse la solución del ingeniero Nicolau para la cubierta. Además de la poca confianza que inspiraba el sistema de aislamiento mediante cámara de aire, la construcción de las bóvedas de fábrica tradicionales hubiera dilatado la terminación del depósito un tiempo ya imposible de aceptar.

Por tanto, se decidió sustituirla por una cubierta de hormigón armado, por entonces novedoso material de construcción que, si bien no era la primera vez en nuestro país que se utilizaba en un depósito, nunca antes se había empleado en uno de tal envergadura. Poderosas razones de

However, further complications were to impede the construction of the Tercer Deposito once more. On this occasion the problems were related to the soil conditions as the initial groundworks had been handicapped by subsidence and collapses on account of the old mines and galleries which riddled the entire subsoil of the site.

A preliminary soil consolidation project was presented to overcome this serious problem and was duly approved by Royal Decree of 19 September 1900 (12). This same decree awarded the site management of these works which basically consisted of packing out the mined areas with brickwork and hydraulic mortar.

The scale of the problem was revealed as the work progressed with galleries being seen to cross the area with some going down to depths of 32 metres (13). The established soil consolidation system could not allow an operation of such scale and it was necessary to consider an alternative. Further fuel was added to fire a new controversy in the form of the salubrity of the stored waters in view of their proximity to the Cemetery of the Brotherhood of Saint Martin.

In order to remove any doubts, the Government, by Order in Council of 10 August 1901, created a commission formed by five inspectors from the engineers corps to resolve "all factors related to the construction of the storage reservoir" (14).

The commission, presided by the chief inspector Rogelio Inchaurreandieta, first considered the problem of the mine workings. In January 1902, tests were approved for a new consolidation system (15), and the final project for the same was approved by Royal Decree of 30 January 1903 (16). The new procedure consisted of removing the moved soil until reaching solid ground below the galleries and then backfilling the void with compacted soil. The consolidation works were started with a great deal of impetus and six months later some twenty thousand cubic metres of soil had been removed and a further fifteen thousand cubic metres compacted. The consolidation works were finally completed at the end of 1903.

Once the problems of soil compaction appeared to be solved, the commission then turned their attention to Nicolau's cover design. In addition to the small degree of confidence inspired by the air cavity insulation system, the construction of traditional brickwork vaults would further delay the completion of the reservoir beyond all acceptable limits.

The commission subsequently decided to replace the system by a reinforced concrete roof. Reinforced concrete was a relatively new building material in Spain at the time and, while this was not the first occasion in which it had been employed in a covered reservoir in Spain, it was certain the first time it had ever been considered on a work of such scale. There were very strong reasons of cost and schedule

coste y plazo de ejecución motivaron la adopción, por unanimidad de todos los miembros de la comisión, de tan trascendental decisión. Para el aislamiento se retomaba la idea inicial de una capa de tierra sobre la cubierta.

Este nuevo material de construcción llevaba quince años utilizándose regularmente en el extranjero. En España estaba empezando a difundirse, habiendo ya algunos constructores con experiencia. Se había empleado en edificación y obra civil, principalmente en fábricas y puentes. También se habían construido algunos depósitos, aunque no tan importantes como el de Madrid. En realidad, esta sería una de las más grandes obras de hormigón armado construidas hasta entonces en todo el mundo.

El concurso para la "construcción de la cubierta y pilares del tercer depósito del Canal de Isabel II, empleando hormigón o cemento armado" se autorizó mediante Real Orden de 10 de diciembre de 1901, fijándose el 13 de agosto de 1902 como fecha límite para admitir proposiciones (17).

Mientras tanto, en octubre de 1902 se anunciaba un concurso para el suministro de "ladrillos toscos recochos destinados a las obras del tercer depósito" (18), prueba de que los cerramientos y el muro divisorio interior se estaban ejecutando conforme al proyecto de Nicolau. Más adelante (mayo de 1903) se decidió la construcción de dos nuevos muros divisorios interiores, pero esta vez de hormigón armado (19).

De este modo, el depósito estaba definitivamente conformado. Únicamente restaba la solución de la cubierta, la cual tendría que salir del concurso. Entre las empresas participantes, una de las que a priori tenía más posibilidades de salir vencedora era la que José Eugenio Ribera había creado seis años antes.

3. José Eugenio Ribera y el hormigón armado

Entre los ingenieros de caminos, el nombre de José Eugenio Ribera Dutaste infunde un merecido respeto. Muy justamente se le considera como uno de los mejores que hayan ejercido nunca esta profesión en nuestro país. Primero por su extensa lista de realizaciones, muchas de ellas referencia de la ingeniería civil española. Después, por su labor de divulgación y enseñanza. Pero a nivel general es más conocido por ser quien introdujo y más contribuyó a la difusión del hormigón armado en España, en las primeras décadas del siglo XX.

Nació en 1864 en Lisboa, donde su padre, también ingeniero, trabajaba en la construcción de ferrocarriles. En 1887 terminó la carrera, siendo destinado como ingeniero del Estado a Asturias.

Allí comenzó una fecunda trayectoria profesional. Trabajó en puentes (como el viaducto metálico de Ribadese-

behind this far-reaching decision which was unanimously adopted by all the members of the commission. With regards to the insulation, the commission returned to the original ideal of an earth layer over the roofing.

Reinforced concrete had been regularly employed abroad for fifteen years by this time and was becoming more wide-spread in Spain with a number of contractors already experienced in this new material. Reinforced concrete had been employed in building and civil works, mainly in factories and bridges. Several water deposits had been built in this material but none of these were as extensive as the Madrid reservoir. In all reality this was to be one of the largest reinforced concrete structures ever to be built in the world.

The call for tender for the "construction of a roof and columns for the third storage reservoir of the Canal de Isabel II using reinforced concrete or cement" was authorised by Order in Council of 10 December 1901, and tender proposals had to be in by 13 August 1902 (17).

In October 1902 a call for tender was announced for the supply of "rough, refired bricks for the work on the third water storage reservoir" (18), this being proof that the outer walls and the interior dividing walls were to be built according to Nicolau's design. Later on, in May 1903, it was decided to install a further two interior dividing walls, but this time in reinforced concrete (19).

The water storage tank was finally taking shape and the only outstanding aspect was that of the roof cover solution which was still pending tender submission. One of the bidding companies had been created by José Eugenio Ribera six years earlier and this company, at the outset, appeared to be the most likely successful bidder.

3. José Eugenio Ribera and reinforced concrete

The name of José Eugenio Ribera Dutaste inspires great respect among civil engineers and he is rightly considered to be one of the best engineers ever produced by Spain. This reputation is not only based on his extensive list of constructions, many of which serving as references in Spanish civil engineering, but also on his teaching and promotion work. However, at a more general level, he is more well known as the person who introduced reinforced concrete in Spain and who did more than anyone to encourage its use in the country over the early part of the 20th century.

Ribera was born in Lisbon in 1864, where his father, also an engineer, worked on the building of railways. He finished his studies in 1887 and was posted to the State of Asturias as an engineer.

There he began his prolific professional life, working on bridges (such as the Ribadesella steel viaduct) and diverse

lla) y diversas obras portuarias, dándose a conocer como un brillante ingeniero, con varios libros y artículos publicados.

Por entonces el hormigón armado estaba empezando a difundirse con gran éxito, sobre todo en Alemania y Francia. Varias empresas, cada una con su propia patente, se dedicaban a diseñar y construir obras con el nuevo material. En 1895, con ocasión de un viaje a Suiza, Ribera entró en contacto con la más activa de todas, la francesa Hennebique. Atraído por las ventajas de la nueva técnica constructiva, desde 1898 se convirtió en concesionario para España de la firma francesa, diseñando sus primeras obras con su patente.

En 1899 abandonó el servicio al Estado para convertirse con su propia empresa, "J. Eugenio Ribera y Cía", en contratista de obras de hormigón armado. Se lanzó a construir obras de todo tipo (puentes, fábricas, edificios públicos, depósitos...), principalmente en el Norte de España.

A partir de 1902, consagrado ya como constructor de prestigio, utiliza su propio sistema, que da a conocer en un libro (20). Recibe encargos muy importantes, como la cubierta del nuevo depósito de aguas de Gijón, de 5000 m², y se impone en concursos como el del puente de María Cristina en San Sebastián.

Arropado por el éxito, y con la confianza que le daba su ya dilatada experiencia, el futuro para el hormigón armado se le antojaba prometedor. De tal forma que en una conferencia pronunciada ese año en el Ateneo llegó a afirmar que "sería la base de la construcción en el siglo que empezaba" (21).

Ciertamente no le faltaba razón, pero antes de que eso sucediera el nuevo material tendría que hacer frente todavía a duras pruebas. El gran ingeniero no podía por entonces imaginar que muy pronto él se convertiría en protagonista de la más difícil de todas.

4. El concurso

La gigantesca obra de hormigón armado del *Tercer Depósito* atrajo la atención de muchas empresas, teniendo que ampliarse cuatro meses el plazo de admisión de proposiciones para dar tiempo a las empresas del extranjero (22).

En las bases del concurso apenas se condicionaba el diseño de la cubierta, dando libertad a los concursantes para proponer el sistema que considerasen más oportuno (tan sólo se fijaba la distribución de los pilares, 735 por compartimento). Los cálculos debían partir de dos premisas: la cubierta tendría que ser capaz de soportar una carga de 700 kg/m², además del peso propio; y los pilares no debían transmitir a la solera presiones superiores a 4,50 kg/cm². Por otra parte, en el pliego debían quedar reflejadas las condi-

port works and soon gaining a reputation as a brilliant engineer with various books and articles to his name.

At this time reinforced concrete was beginning to make a successful breakthrough particularly in Germany and France. Several companies, each with their own patents, were dedicated to the design and construction of works in this new material. In 1895 and coinciding with a trip to Switzerland, Ribera came into contact with the most active of these companies, the French firm Hennebique. Ribera was attracted to the advantages of this new construction technique and in 1898 became a concessionaire in Spain for the French company and designed his first works under their patent.

In 1899 he left the State service to start up his own business, "J. Eugenio Ribera & Co", as reinforced concrete contractor. His company built all manner of constructions (bridges, factories, public buildings, reservoirs...) mainly in the north of Spain.

As from 1902, and now established as a prestigious contractor, he began to employ his own system which was duly published in book form (20). He received very important contracts, such as the roof to the 5000 m² new storage reservoir in Gijon and he successfully bid for others such as the Maria Cristina bridge in San Sebastian.

Encouraged by success and with the confidence provided by his already long-standing experience, Ribera considered the future of reinforced concrete to be a promising one. In a conference given this same year to the scientific community, he stated that reinforced concrete "would be the basis for all construction in the new century" (21).

While he was certainly not wrong, reinforced concrete would have to go through a number of difficult challenges before this would happen. At the time of making these comments, the great engineer could not possibly envisage that he was soon to become the protagonist of the most difficult challenge of all.

4. The call for tenders

The vast reinforced concrete work of the Third Water Reservoir attracted the attention of many companies and the tender period had to be extended by four months to allow foreign companies to bid (22).

The tender conditions made few restrictions on the design of the roof cover and gave bidders a free reign to propose the system they considered most appropriate (the conditions only established the arrangement of the columns, with 735 being indicated for each compartment). The calculations had to be based on two premises: the roof cover would have to be capable of supporting a load of 700 kg/m² in addition to its deadweight; and the columns

ciones de los materiales, los procedimientos, las pruebas de carga y los plazos de ejecución (23).

Se presentaron catorce proposiciones, con grandes variaciones de presupuesto y plazo de ejecución entre ellas como se ve en el cuadro 1.

La elección correría a cargo del Consejo de Obras Públicas, previa consulta de diversos técnicos (24). Los ingenieros Carlos Santamaría, encargado de las obras, y Antonio Prieto, secretario de la comisión del tercer depósito, se encargaron de hacer el informe preliminar.

En primer lugar, desecharon la proposición del ingeniero italiano Parboni por no ajustarse a las bases del concurso, ya que se refería a la construcción del depósito completo. Además, no presentaba el proyecto y tenía un coste desorbitado.

También rechazaron la proposición de A. Matrai, ingeniero húngaro que había registrado algunos años antes una patente de construcción de hormigón armado. Su sistema de forjados, compuestos por un tejido de alambres embebido en losas de hormigón, había tenido cierta fortuna en Francia. Sin embargo, su utilización en la cubierta del depósito no convencía a Santa María y Prieto, para quienes con su propuesta no se garantizaba ni la impermeabilidad ni la capacidad de desagüe.

El resto de las proposiciones, que sí se admitieron a estudio, se repartieron en tres grupos, según su diseño estructural. En el primero estaban las de solución con cubierta plana (Jalvo, Odorico, Gabellini, Draguet y Sestao). Destacaba la propuesta de la *Compañía del Hormigón Armado de Sestao*, con una solución tradicional de losa de hormigón armado, sobre viguetas y jácenas del mismo material. Además de tener el presupuesto más bajo de este grupo, estaba avalada por el creciente número de obras que esta empresa, de capital y dirección franceses, estaba llevando a cabo por toda España.

El arquitecto Mauricio Jalvo también presentó una propuesta de cubierta plana apoyada sobre vigas y viguetas, aunque por su elevado presupuesto no tenía muchas posibilidades de resultar elegida. Este arquitecto, otro de los grandes pioneros del hormigón armado en España, tendría un papel destacado tras la catástrofe, actuando como perito del Ayuntamiento.

Las proposiciones del segundo grupo (Habrich y Hennebique) en lo sustancial diferían poco de las del primero. La empresa alemana Habrich presentó una cubierta de losas con pequeña curvatura, poco atractiva por su elevado presupuesto y su dilatado plazo de ejecución.

En este segundo grupo también se englobaron las dos proposiciones que hizo la firma francesa Hennebique. Siendo la principal empresa dedicada a la construcción con hormigón armado en todo el mundo, no podía dejar de presentarse a un concurso de tanta relevancia como el del *Tercer Depósito*.

Cuadro 1/Table 1

	Presupuesto (ptas.)	Plazo ejecución
1 Parboni	4.600.000,00	sin determinar
2 Jalvo	3.236.586,30	34 meses
3 Habrich	2.970.968,08	40 meses
4 Odorico	2.738.000,00	450 días
5 Gabellini	2.295.168,00	18 meses
6 Hennebique	2.251.783,20	24 meses
7 Hennebique	2.082.687,60	24 meses
8 Draguet	2.059.920,00	16 meses
9 Matrai	2.031.000,52	24 meses
10 Odorico	1.993.000,00	450 días
11 Cia. Sestao	1.901.602,61	24 meses
12 Zafra	1.720.061,43	14 meses
13 Zafra	1.600.889,14	20 meses
14 Ribera	1.562.845,10	12 meses

could not transfer loads of over 4.50 kg/cm² to the base. In turn, the bids were required to indicate material conditions, procedures, load tests and construction period (23).

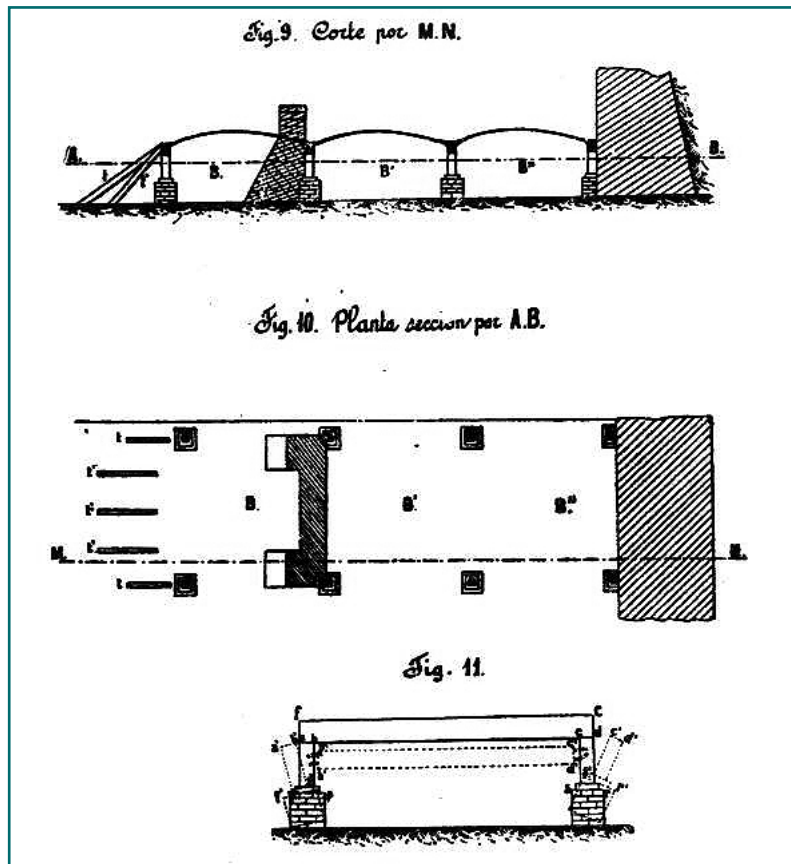
Fourteen tenders were received with large variations in terms of price estimate and constructions time (Table 1).

Awarding of the contract fell to the Public Works Council after prior consultation with several technicians (24). The engineers Carlos Santamaria, the project manager, and Antonio Prieto, the secretary for the assignment of the third water reservoir, were entrusted with the preparation of a preliminary report.

The proposal tendered by the Italian engineer Parboni was discarded as it did not meet the tender conditions and, instead, referred to the construction of the entire covered reservoir. This proposal also failed to present a design and the cost was considered to be far too excessive.

The council also rejected the tender by the Hungarian engineer, A. Matrai, who some years earlier had registered a reinforced concrete construction patent. His system of slabs, composed of a mesh of wires embedded in concrete slabs, had received certain renown in France. However, the use of this method in the reservoir cover did not convince Santa Maria and Prieto as they felt that the proposal did not guarantee waterproofing or drainage capacity.

The rest of the tenders admitted to study were divided into three groups according to structural design. The first group consisted of flat roof solutions (Jalvo, Odorico, Gabellini, Draguet and Sestao). The proposal made by the Compañía del Hormigón Armado de Sestao (Sestao Reinforced Concrete Company) stood out in this list with a traditional solution of a reinforced concrete slab set on reinforced concrete joists and beams. This was also the lowest estimate in the group and was backed by the growing number of works that this French financed and run company were carrying out all over Spain.



Fundada por François Hennebique en 1892, tenía concesionarios repartidos por más de treinta países, que se apoyaban en la oficina técnica central con sede en París. De esta forma, llevaba proyectadas y construidas más de siete mil obras en 1905.

Con el aval de su gran prestigio presentó dos proposiciones para la cubierta, resueltas ambas con una solución de bóvedas muy rebajadas y vigas arqueadas, ya empleada con éxito en el cubrimiento del ferrocarril des Moulinaux, en la Exposición Universal de París de 1900.

La organización Hennebique garantizaba su estabilidad para una sobrecarga de hasta 3500 kg/m². Con su conocida habilidad para la propaganda, sugería que incluso se podría construir "un jardín público sobre este tercer depósito, llevando el espesor de las tierras a un metro sin ningún inconveniente" (25).

En el último grupo se encuadraban tres proyectos que resolvían la cubierta con bóvedas. La casa Odorico, que también había hecho una propuesta de cubierta plana, presentaba otra, más económica, de bóvedas de arista apoyadas directamente sobre los pilares. Las otros dos eran propuestas de sendos ingenieros de caminos españoles, José Eugenio Ribera y Juan Manuel de Zafra.

El primero, como ya se ha comentado, era el gran especialista español del momento. Cuando se convocó el

Fig. 2. Esquema de las pruebas de carga en el depósito de Gijón. Publicado en "El Cemento Armado"/Arrangement of load tests on the Gijon water deposit. Published in "El Cemento Armado".

The architect Mauricio Jalvo also presented a proposal for a flat roof set on beams and joists, but its high price gave the project little chance of success. This architect was another of the leading pioneers in reinforced concrete in Spain and was to have a very important role in the wake of the disaster, acting in the capacity as a council expert.

The proposals of the second group (Habrich and Hennebique) differed slightly those of the first group. The German company Habrich presented a slab cover with a slight curvature but this was considered inappropriate on account of its high price and long construction period.

This second group included two proposals made by the French firm Hennebique. This company were responsible for reinforced concrete constructions throughout the world and they could not fail to take part in such a highly relevant call for tenders such as that of the Third Water Reservoir.

The company had been founded by François Hennebique in 1892 and had concessionaires in over thirty countries backed up by a central technical office in Paris. In this way the company had designed and built over seven thousand works in 1905.

On the back of their great prestige, the company presented two proposals for the cover, both employing a very flat arch solution with arched beams which had been successfully employed in the roofing to the des Moulinaux railway at the Paris Universal Exposition of 1900.

The Hennebique organization guaranteed the stability of the structure for live loads of up to 3500 kg/m². With their renowned ability for publicity, the company also suggested that it would be possible to build "a public park over the third water reservoir by raising the soil cover to one metre which would not pose any problems" (25).

The final group was formed by three tenders which all offered vaulted roof cover solutions. The Odorico company, which had also presented a proposal for a flat roof, tendered an additional and more economical solution with groin arches supported directly on columns. The other two proposals were by the Spanish civil engineers, Jose Eugenio Ribera and Juan Manuel de Zafra.

The first of these and as indicated earlier was the great Spanish specialist of the day. When the call for tenders went out, Ribera was building the Gijon water reservoir for which he had designed a vaulted roof set on beams which were, in turn, supported on columns. These 3.8 metre span arches flattened out by 1/10 were 6 cm thick at the key and 12 cm thick at the spring. They were designed in accordance with the Monier system with the reinforcement formed by round bars set in a rectangular grid.

The 20 x 30 cm beams and the 20 cm square section columns were to be formed in reinforced concrete, though on this occasion employing a system patented by Ribera.

Test roof arches were constructed to verify the stability of the design and these were subjected to load testing.



Fig. 3. Prueba de dos bóvedas para el depósito de Gijón. Publicada en "El Cemento Armado" y en la R.O.P. / Test of two arches for the Gijon water tank. Published in "El Cemento Armado" and the R.O.P.

concurso estaba construyendo el depósito de aguas de Gijón, para el que había proyectado una cubierta formada por bóvedas apoyadas en jácenas, las cuales descansaban a su vez sobre los pilares. Dichas bóvedas, de 3,80 metros de luz y rebajadas al 1/10, tenían un espesor de 6 cm en la clave por 12 cm en los arranques. Estaban diseñadas de acuerdo con el sistema Monier, con una armadura formada por barras redondas en retícula ortogonal.

Las jácenas tenían escuadrías de 20 x 30 cm y pilares de sección cuadrada de 20 cm de lado, realizados en hormigón armado, aunque esta vez del sistema patentado por Ribera.

Para comprobar la estabilidad del diseño se construyeron unas bóvedas de prueba, a las que se sometió a un ensayo de carga. Limitada la prueba a dos bóvedas, se fueron repartiendo uniformemente sacos de cemento sobre ellas, incrementando la carga hasta que se rompieran. Pues bien, agotada la provisión de sacos, las bóvedas aún seguían en pie sin mostrar síntomas de rotura (con una sobrecarga de 1600 kg/m², cuatro veces superior a la prevista).

Entonces se decidió continuar la experiencia descompensando la carga en las bóvedas. Se quitaron sacos de una para colocarlos en la otra, hasta que se produjo la rotura, para unos valores de la sobrecarga de 2200 kg/m² (cinco veces la carga de proyecto) y 1000 kg/m², respectivamente.

Los pilares también mostraron una resistencia excepcional en la prueba, siendo necesario un empuje horizontal de 5700 kg para romperlos. Esto condujo a Ribera a estimar que no hacían falta arriostramientos de las bóvedas en sentido transversal a las mismas.

Completamente satisfecho de su diseño, consideraba "que para vencer su resistencia y estabilidad sería necesario recurrir a una verdadera traición" (26). Así que lo adoptó también para el Tercer Depósito, aunque en este se arriesgó bastante más, ya que para unas luces mayores (seis metros frente a los cuatro de Gijón), utilizó bóvedas más livianas (5 cm de espesor en la clave y 10 cm en los arran-

Testing was limited to two arches and the idea was to evenly place sacks of cement on the same and to increase the load until the arches failed. However, they ran out of sacks while the arches were still standing and before they showed any sign of failure (with a live load of 1600 kg/m², which was four times the predicted load).

It was decided to continue the testing by redistributing the load on the arches. Sacks were removed from one arch and placed on the other until breaking point which finally occurred at live loads of 2200 kg/m² (five times the design load) and 1000 kg/m² respectively.

The columns also revealed excellent strength in testing and it was necessary to apply a 5700 kg horizontal force to break the columns. This led Ribera to the conclusion that it was not necessary to brace the arches in the transversal direction to the same.

Ribera was entirely satisfied with his design and considered "that it would be necessary to resort to insidious means to overcome their strength and stability" (26). He subsequently decided to employ this method in the Third Water Reservoir, though here he took even greater risks as, in spite of the greater spans (six metres as opposed to the four metre span arches in Gijon), he employed slimmer arches (5 cm thick at the key and 10 cm at the arch spring); 0.50 m thick and 4.03 m span trapezoidal section beams; and 8.40 m high by 25 cm wide square section columns reinforced with four 15 mm diameter bars.

While the design columns and arches were correctly dimensioned to withstand stress in the normal situation of the finished work (with static loads uniformly distributed over the vaults), they were not calculated to resist horizontal stresses which could appear in the case of decompensated loads. In the light of the test results obtained in Gijon, Ribera did not consider it necessary to do so and he trusted that all the components would act in unison to resist these stresses without affecting the assembly.

In this way Ribera obtained an economic structure which was easy to build as there was no cross bracing and the arches could be built with a slip form. For this reason, Ribera's proposal was the cheapest of all the tenders and the one requiring the shortest construction time.

However, Ribera's tender was very close to another arch roof project presented by Juan Manuel de Zafra. Cross bracing was provided for in this latter project and the estimate only rose an insignificant amount of Pesetas 38,000 over that of Ribera's. The project considered 4 cm thick curved plates set on a grid of parabolic intrados beams with a minimum depth of 40 cm and cruciform section columns. By incorporating bracing in two perpendicular directions, Zafra's project was safer than Ribera's but was more difficult to build and the scheduled construction time was, subsequently, eight months longer.

ques); jácenas de sección trapezoidal de medio metro de canto y de 4.03 metros de luz; y pilares de sección cuadrada de 25 cm de lado y 8,40 m de altura, armados con cuatro redondos de 15 mm de diámetro.

Correctamente dimensionados para resistir los esfuerzos originados en la situación normal de la obra terminada (con cargas estáticas uniformemente repartidas sobre las bóvedas), los pilares y bóvedas del proyecto no estaban calculados para resistir esfuerzos horizontales, que podían aparecer en caso de cargas descompensadas. A la vista de los resultados de los ensayos de Gijón, Ribera juzgó que no era necesario hacerlo, confiando en que todos los elementos actuando solidariamente podrían resistir dichos esfuerzos sin que el conjunto resultara dañado.

De esta forma conseguía una estructura económica y fácil de ejecutar, pues al no haber arriostramientos transversales, se podían ir construyendo las bóvedas con un encofrado deslizante. De esta forma, la proposición de Ribera resultó ser la más barata de todas y la de menor plazo de ejecución.

No obstante, en el presupuesto se quedó muy cerca del otro proyecto de cubierta con bóvedas, presentado por Juan Manuel de Zafra. Este, que sí tenía arriostramientos transversales, lo superaba por la insignificante cantidad de 38.000 pesetas. Consistía en placas curvadas de 4 cm de espesor, apoyadas sobre una cuadrícula de vigas de intradós parabólico con un canto mínimo de 40 cm y pilares de sección cruciforme. Al incorporar arriostramientos en dos direcciones perpendiculares, el proyecto de Zafra resultaba más seguro que el de Ribera, pero también más difícil de ejecutar, por lo que su plazo de ejecución era ocho meses mayor.

Además, por aquel entonces Zafra, que sería luego una de las grandes figuras del hormigón armado en España, estaba dando sus primeros pasos con el nuevo material y no podía presentar, como Ribera, una lista de realizaciones importantes que le avalaran.

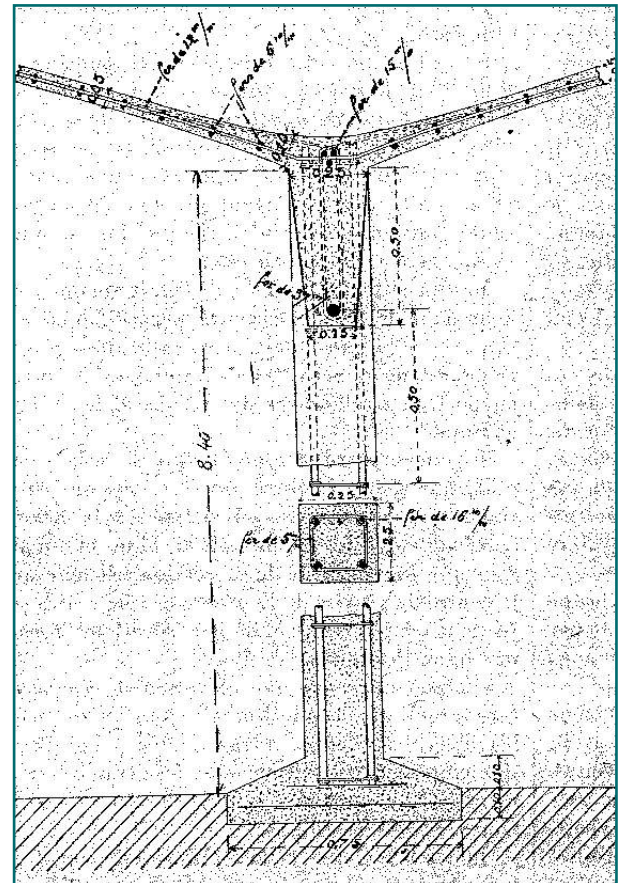
Los ingenieros Santamaría y Prieto estudiaron todas las proposiciones y se dispusieron a tomar una decisión.

En primer lugar descartaron las de Habrich y Draguet por no cumplir una de las bases del concurso, la limitación de la carga transmitida a la solera.

Analizando a continuación los cálculos de las proposiciones restantes, no encontraron ninguno que les conviniera. El hormigón armado lleva poco tiempo utilizándose y todavía no tenía una base teórica seria. Los diferentes sistemas estaban fundados en la experiencia, pretendiendo justificarse muchas veces con hipótesis dudosas, cuando no disparatadas. No pudiendo confiar en los cálculos, decidieron que la validez de cada proposición debería ser comprobada con procedimientos empíricos.

Vistas así las cosas, los aspectos económicos resultaban fundamentales para tomar una decisión. De acuerdo con

Fig. 4. Vista esquemática del diseño de Ribera para el Tercer Depósito. Publicado en "Le Béton Armé" (École Nationale de Ponts et Chaussées, France. Fonds anciens)/Diagram of Ribera's design for the Third Water Tank. Published in "Le Béton Armé" (École Nationale de Ponts et Chaussées, France. Fonds anciens).



Furthermore, at that moment in time Zafra, who was later to become one of the leading proponents of reinforced concrete in Spain, was still becoming initiated with the new material and could not present such an impressive curriculum as Ribera's.

The engineers Santamaría and Prieto studied all the proposals and prepared to come to a decision.

They first discarded the tenders of Habrich and Draguet as these did not comply with one of the tender conditions concerning the restriction of load transferred to the base.

After studying the calculations of the remaining proposals, they could not find one which convinced them. Reinforced concrete had only been employed for a relatively short time and a serious theoretical basis was yet to be prepared. The different systems were based on experience and on many occasions were justified on doubtful, if not totally ridiculous, assumptions. As they could not trust the calculations they decided to verify the validity of each proposal by empirical methods.

Under these conditions, economic aspects took on an essential role in the decision making process. In accordance with this criteria, arch solutions were preferable to flat roof solutions and here, on the same

este criterio, las soluciones con bóvedas eran preferibles a las planas. Y entre ellas, por el mismo razonamiento, la elección debía recaer en la propuesta de Ribera, la de menor presupuesto y más corto plazo de ejecución.

Sin embargo, su arriesgado diseño estructural suscitaba serias dudas. A pesar de que Ribera, apoyado en los resultados de sus pruebas de Gijón, garantizaba que era capaz de resistir los esfuerzos horizontales, Santamaría y Prieto no estaban tan seguros. Sobre todo temían que, al no haber arriostramientos perpendiculares a la dirección de las bóvedas, el fallo de una de ellas se transmitiera a las contiguas, provocando el colapso de toda la cubierta.

En su informe, hicieron constar claramente que el proyecto de Zafra, que sí tenía el doble arriostramiento, garantizaba mejor la estabilidad frente a esfuerzos horizontales y evitaba la propagación de un fallo parcial.

Pero al final se inclinaron por la propuesta de Ribera, si bien se debía confirmar su estabilidad mediante ensayos. Si estos no resultaban satisfactorios, debía considerarse la propuesta de Zafra como segunda alternativa. En caso de que la estabilidad de esta tampoco quedara contrastada en las pruebas, habría que recurrir a construir una cubierta plana, siendo en este caso la propuesta de la Compañía de Sestao la opción preferente.

De este modo, las conclusiones quedaban inequívocamente vinculadas a la realización de dos pruebas, compacidad de los hormigones y resistencia general de la cubierta. Si bien la primera no ofrecía ninguna dificultad, no ocurría lo mismo con la segunda, pues exigía la construcción de un trozo de cubierta y someterlo a cargas hasta provocar su rotura.

Una vez emitido el informe preliminar de Santamaría y Prieto, correspondió informar al Ingeniero Jefe de obras públicas, Alfredo Álvarez Cascos. Este, no teniendo nada que añadir, suscribió íntegramente el informe de aquellos.

A continuación, llegó el turno del momentáneamente Director del Canal, Rogelio Inchaurrendieta. Concentrando su atención en las propuestas de Ribera y Zafra, hacía suyas las conclusiones de Santamaría y Prieto, asumidas también por el Ingeniero Jefe Álvarez Cascos. Sin embargo, discrepaba en cuanto a la conveniencia de hacer la prueba de estabilidad que aquellos proponían.

Consideraba en su informe que con el diseño de Zafra quedaba descartada la posibilidad de transmisión de una avería local, por lo que las pruebas no serían necesarias. Sin embargo, con el de Ribera, que no incorporaba arriostramiento transversal, existía un riesgo cuya importancia habría que determinar mediante los ensayos.

Ahora bien, el ensayo de unas cuantas bóvedas no serviría para reducir la incertidumbre en ese sentido. Como acertadamente reflejaba en su informe, para obtener resultados concluyentes habría que probar un número elevado de bóvedas, en un tiempo también largo. De este mo-

reasoning, the selection had to fall to Ribera's proposal which offered the lowest cost and construction time.

However, his daring structural design gave rise to serious doubts. Even though Ribera based his design on the Gijon test results and guaranteed that this was capable of resisting horizontal loads, Santamaría and Prieto were not so sure. They were particularly wary of the fact that in view of the lack of bracing perpendicular to the arches, any failure of the same would transfer to the adjacent arch and lead to the collapse of the entire roof.

In their report they clearly indicated that Zafra's project, with its double bracing system, guaranteed greater stability against horizontal stress and prevented the propagation of a partial failure.

However, they finally inclined towards Ribera's proposal though they considered it necessary to confirm design stability by testing. If these tests did not prove satisfactory they would then consider Zafra's proposal as the second alternative. In the case that the stability of this latter also failed in testing, they would then have to resort to a flat roof solution and, in this case, the Sestao company proposal was the favoured option.

The outcome subsequently depended on the results of the two tests concerning the compactness of the concretes and the general strength of the roof cover. While the first test did not present any difficulties, this was not the case of the second, as it required the construction of a section of roofing and subjecting this to destructive testing.

Once the preliminary report by Santamaría and Prieto had been issued, they then had to report to the Chief Engineer of Public Works, Alfredo Álvarez Cascos. Cascos had nothing further to add and entirely endorsed their report.

The selection process passed to the then Director of the Canal, Rogelio Inchaurrendieta, who focused his attention on the proposals of Ribera and Zafra and approved the conclusions of Santamaría and Prieto which had been similarly endorsed by the Chief Engineer Álvarez Cascos. However, the Director differed with regards to the stability tests proposed by Santamaría and Prieto.

In his report, Inchaurrendieta considered that Zafra's design eliminated the possibility of transfer of local failure and the tests were, therefore, unnecessary. However, with regards to Ribera's proposal which did not include cross bracing, the director considered that there was a certain degree of risk which would have to be verified by testing.

However the testing of a certain number of arches does not reduce the element of doubt in this regard. As correctly indicated in his report, it would be necessary to test a large number of arches over a large period of time in order to obtain conclusive reports. This then offset the

do, quedarían contrarrestadas las ventajas que en cuanto a presupuesto y plazo de ejecución presentaba la opción de Ribera frente a la de Zafra.

Cuestionaba por tanto la realización de las pruebas, transmitiendo al Consejo de Obras Públicas la idea de que tendría que decidir sobre la estabilidad de la propuesta de Ribera en función de las justificaciones, empíricas y razonadas mediante cálculos, que este exponía en su proyecto.

En su informe lo exponía nítidamente de esta manera: *"dadas las condiciones del proyecto del Sr. Ribera, debe estimarse por apreciación colectiva (la del Consejo de Obras Públicas) si el peligro que puede temerse de una improbable, pero posible avería local, merece el aumento de tiempo y dinero que exige la proposición del Sr. Zafra respecto a la del Sr. Ribera. Si se cree que puede propagarse la ruina, no debe admitirse; pero si se entiende que las condiciones del hormigón armado no hacen verosímil ese riesgo, o se estima que da tiempo al remedio y reparación, debe aceptarse sin esos ensayos tan delicados"*.

El Consejo de Obras Públicas, finalmente, decidió fallar a favor de Ribera, sin considerar necesario que se realizaran las pruebas de carga. La opción de Zafra se reservaba por si aquel se negase a aceptar las condiciones administrativas del fallo del concurso.

5. Hacia el desastre

A principios de 1904 estaban terminados los trabajos de consolidación de los minados y se habían ejecutado los revestimientos laterales y el muro divisorio central de fábrica de ladrillo. Las obras de la cubierta, con Ribera como contratista, empezaron en primavera, continuando los ingenieros de caminos Alvarez Cascos al frente de la dirección facultativa y Santamaría como inspector directamente encargado de la obra.

En el plan de trabajo ideado por Ribera se construían en primer lugar los pilares y las jácenas, para después, con un encofrado deslizante, terminar las bóvedas.

La obra comenzó por el cuarto compartimento, desarrollándose con normalidad según el esquema previsto. La ejecución se ajustaba a las cláusulas del contrato de concesión, sin que se registrara mayor incidente que un ligero agrietamiento observado en algunas vigas en su unión con los pilares, defecto que fue oportunamente subsanado. En cuanto a los materiales, los utilizados se ajustaban escrupulosamente a las condiciones del contrato.

De este modo, al empezar el mes de abril de 1905, el cuarto compartimento estaba completamente cubierto y en el primero y segundo, con todos sus pilares y jácenas construidos, se estaban empezando a ejecutar las bóvedas (27).

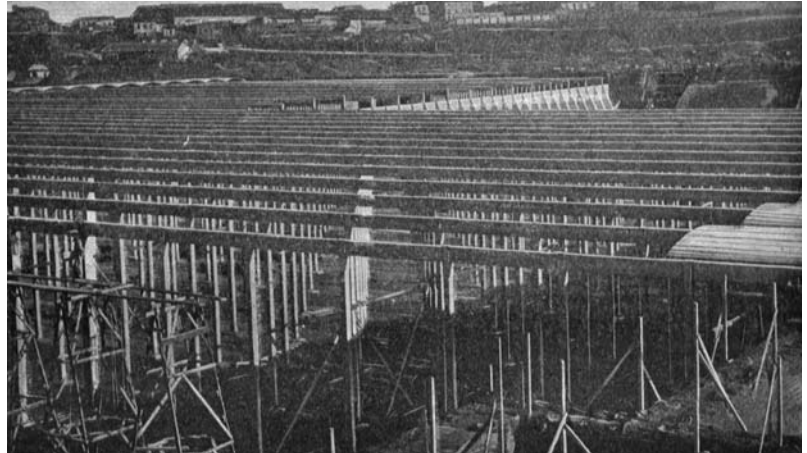


Fig. 5.
Compartimentos
1º y 2º en
construcción.
Publicado en la
R.O.P./First and
Second
compartments
under construction.
Published in the
R.O.P.

advantages in terms of budget and construction time offered by Ribera's option over that of Zafra.

After questioning these tests, the Public Works Council were informed that it was necessary to come to a decision regarding the stability of Ribera's proposal in accordance with the empirical and calculation based justifications indicated in his tender.

In his report this was clearly laid out in the following manner: "given the design conditions proposed by Sr. Ribera, it should be jointly considered (by the Public Works Council) whether the danger posed by an improbable, but possible local failure, merits the increase in time and money required by Sr. Zafra's proposal over and above that of Sr. Ribera. If it is considered that this may lead to collapse, then it should be rejected; but if it is felt that the conditions of reinforced concrete make this risk unlikely or if it is felt that there would be time to remedy and repair the same, this should be accepted without these extremely delicate tests".

The Public Works Council finally opted in favour of Ribera without considering it necessary to carry out the load tests. Zafra's option was held in reserve in case Ribera refused to accept the administrative conditions in the award of contract.

5. The build up to the disaster

By early 1904 the soil consolidation works were complete and the brick side linings and central dividing wall had been constructed. The roof works began in Spring, with Ribera as contractor and the civil engineers Alvarez Cascos and Santamaria occupying their posts as project and site managers respectively.

According to the work programme established by Ribera, the columns and beams would be built first and the arches would then be completed using slip forms.

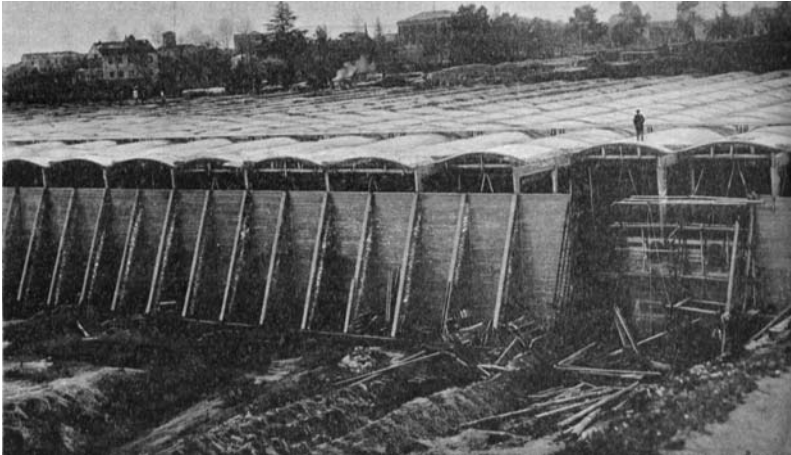


Fig. 6. El cuarto compartimento poco antes del hundimiento. Publicado en la R.O.P./ The fourth compartment shortly before collapse. Published in the R.O.P.

Sobre toda la cubierta de este compartimento, con excepción de una pequeña zona al norte, había una capa de tierra de 10 cm de espesor, que se había ido extendiendo a medida que se construían las bóvedas. Desde el ocho de febrero se trabajaba en completar esta capa hasta alcanzar los 25 cm prescritos en el proyecto como aislante. La tierra era transportada con carretillas que los obreros desplazaban rodando directamente sobre las bóvedas.

El día cinco de abril, con esta operación realizada aproximadamente en la mitad de la cubierta, por iniciativa de la contrata se decidió hacer una prueba de solidez, que consistió en cargar con una capa de tierra de 80 cm (1050 kg/m², una vez y media la sobrecarga de proyecto) una faja de bóvedas en todo lo largo del compartimento. La tierra se tomó de las bóvedas vecinas, las cuales quedaron al descubierto.

Mientras se realizaban las pruebas el tiempo fue muy caluroso, con unas temperaturas anormalmente altas para esa época del año y grandes oscilaciones diarias (28).

Las pruebas se terminaron el seis de abril, con resultados satisfactorios. El siete de abril se retomaron las labores de distribución de las tierras, desde los acopios exteriores y redistribuyendo las que se habían utilizado para el ensayo.

El día ocho de abril por la mañana, en medio de este trajín del reparto de tierra, se vino abajo la cubierta, con gran pérdida de vidas humanas.

6. Primeras reacciones.

El estruendo del hundimiento, que se produjo sobre las siete y cuarto de la mañana, sobresaltó al cercano barrio de Cuatro Caminos (29). Enseguida una gran multitud se congregó en las inmediaciones del tercer depósito. Entre los primeros en llegar estaban los guardias civiles Delgado y Albornoz, que rápidamente informaron a las autoridades de la magnitud del desastre.

Work began with the fourth compartment and closely followed the established programme. The building work followed the specified terms of contract and the only incident of note was the slight cracking of certain beams where they joined the columns and this defect was suitably remedied. The materials employed on site all scrupulously conformed to that established in the specifications.

By the beginning of April 1905 the fourth compartment was entirely covered and all the columns and beams were in place in the first and second compartments were ready to receive the arch work (27).

With the exception of a small area to the north, the entire roof of this compartment was covered by a 10 cm thick layer of soil which was spread out as the vaults were completed. From 8 February onwards the soil layer was raised to the 25 cm specified in the design as insulation material. The soil was transported by wheelbarrows with the workers moving freely over the vaults.

On 5 April and with approximately half of the soil in place, the contractor decided to carry out a stability test by loading a line of vaults throughout the entire compartment with an 80 cm thick soil layer (1050 kg/m², one and a half times the design live load). The earth was taken from the adjacent vaults which then remained exposed.

The tests were carried out in very hot weather with abnormally high temperatures for the time of year and large variations throughout the day (28.)

Testing was completed on 6 April and proved satisfactory. On the following day work resumed to spread the soil from the outer piles and to redistribute the soil used in the tests.

In the morning of 8 April and while the soil was still be spread out, the roof caved in with a great loss of human life.

6. First reactions

The roar of the collapsing roof and soil, at quarter past seven in the morning, startled the neighbouring district of Cuatro Caminos (29) and a large crowd of onlookers immediately gathered at the site of the reservoir. The Civil Guards Delgado and Albornoz were among the first on the scene and immediately informed the authorities of the scale of the disaster.

The crowd and those workers who had been unharmed raced to help those trapped in the rubble. Students from the nearby College of Mining Engineers rushed to the area and tried to be of assistance. One of those who arrived on the scene was later to describe the image in his memoirs: "(crushed skulls and bloodied limbs

Desde el primer momento los vecinos y los obreros que no habían sido afectados intentaron auxiliar a sus compañeros atrapados por los escombros. Rápidamente acudieron en su ayuda los alumnos de la cercana Escuela de ingenieros de Minas. Uno de ellos recordaría más tarde en sus memorias lo que vieron al llegar: “(...) *asomaban entre los escombros cráneos aplastados, miembros ensangrentados (algunos separados del tronco al que pertenecían) y se oían lamentos de dolor, angustiosas llamadas de auxilio*” (30).

Inmediatamente acudieron el gobernador civil de Madrid, el ministro de la Guerra y el alcalde, encontrándose con el terrible espectáculo. Entre los bomberos, las fuerzas de seguridad y una compañía de zapadores llamada por el ministro se organizó el rescate de los obreros atrapados.

El rey Alfonso XIII se presentó a media mañana. Después de recorrer las ruinas acudió al Hospital de la Princesa, adonde habían sido trasladados los heridos, muchos de ellos en las mismas carretas usadas para distribuir la tierra

A la conmoción de los primeros momentos sucedió un sentimiento de indignación entre las clases populares de Madrid, alimentado por parte de la prensa madrileña. Entre los periódicos más agresivos destacaba “*El Liberal*”, que desde el primer momento empezó a propagar la idea de que el desastre se debía a un comportamiento ilícito del contratista, que habría estado escatimando en los materiales sin importarle la seguridad de los trabajadores.

En la tarde del día siguiente, domingo nueve de abril, se produjo una concentración no autorizada en los alrededores de la plaza de Cuatro Caminos, en protesta por lo sucedido en el *Tercer Depósito*. Ante los ánimos exaltados de los concentrados, la policía recibió la orden de disolverla por la fuerza, originándose graves disturbios, tiroteo incluido, con el resultado de un muerto y numerosos detenidos.

Los funerales se celebraron el martes once. El mismo día se produjo otra concentración, esta vez sin incidentes. Para entonces, la noticia había trascendido con una gran repercusión en toda España. Intentando atenuar el malestar, el consejo de ministros promovió una suscripción entre todos los funcionarios de la Administración para socorrer a las víctimas (31).

Al mismo tiempo creaba, por Real Orden de 8 de abril de 1905, una comisión para investigar lo sucedido. Estaba formada por los ingenieros militares José Marv y Francisco Pérez de los Cobos, los arquitectos Rafael Cerero y Federico Aparici y los ingenieros de caminos José Arenas y Antonio Arévalo. El Ayuntamiento de Madrid, por su parte, también encargó al ingeniero militar Eduardo Gallego y al arquitecto Mauricio Jalvo, dos de las mayores autoridades españolas en hormigón armado del momento, que actuaran como sus peritos para dilucidar las causas que habían producido el hundimiento.

Las diligencias judiciales empezaron inmediatamente. Fueron encausados Alfredo Alvarez Cascos, como director



Fig. 7. Tras el desastre (Institut Français d'Architecture. Direction des Archives de France. Cit de l'architecture et du patrimoine. Centre d'archives d'architecture du XXe siècle) /After the disaster (Institut Français d'Architecture. Direction des Archives de France. Cit de l'architecture et du patrimoine. Centre d'archives d'architecture du XXe siècle).

(some torn from the body) appeared within the rubble and one could hear cries of pain and anguished calls for help” (30).

The Civil Governor for Madrid, the War Minister and the Mayor immediately went to the area and were met by a terrible scene. The fire brigade, police forces and a company of sappers called by the Minister were organized to rescue the trapped workers.

King Alfonso XIII arrived at midday and after inspecting the area then visited the Hospital de la Princesa where the wounded had been taken, many of whom being transferred in the very same wheelbarrows used to spread the soil.

The initial commotion was followed by a feeling of indignation among the working classes of Madrid which was partly fired by the local press. One of the most caustic newspapers was the “El Liberal”. The paper started the rumour that the disaster had been caused by the underhand behaviour of the contractor who had scrimped on materials without caring for the safety of the workers.

In the afternoon of the following day, Sunday 9 April, there was an unauthorized gathering around the plaza at Cuatro Caminos in protest for the events at the Tercer Deposito. The crowd were very agitated and the police received the order to break up the protest by force. This then deteriorated into serious disturbances with shots being fired and resulting in one death and numerous arrests.

The funerals were held on the following Tuesday and were marked by another protest, though on this occasion without incident. By this time the news had spread and there was widespread feeling of discontent throughout Spain. In an attempt to mitigate this bad feeling, the Council of Ministers asked civil servants to contribute to a relief fund in support of the victims (31).

del Canal (había sucedido a Inchaurrandieta) y Carlos Santamaría, director del obra del *Tercer Depósito*. Por parte de la contrata, José Eugenio Ribera, en un gesto de honradez, asumió toda la responsabilidad, a pesar de no ser él quien se encargaba directamente de las obras (el jefe de obra era el ingeniero de caminos Mariano Luiña).

7. Polémicas tras la catástrofe

El desastre del tercer depósito tuvo un gran impacto sobre la opinión pública. En los meses siguientes a la catástrofe aparecieron todo tipo de comentarios en la prensa, alimentando una polémica que tenía una doble vertiente.

Por un lado, había un amplio sector de la prensa, indignado por el alto número de víctimas, que señalaba como principales culpables a los técnicos y, sobre todo, al contratista. Con *"El Liberal"* a la cabeza, este sector abundaba en la creencia popular, muy extendida, de que empresarios y técnicos estaban conchabados para lucrarse a costa de la obra, sin importarles ni la seguridad de los obreros ni que la construcción quedara defectuosa.

Estas insinuaciones tenían su razón de ser, pues no faltaban ejemplos de esta deplorable actitud en la España de principios del XX. Sin embargo, eran especialmente injustas en esta ocasión, pues se hacían sobre un hombre que se había distinguido por su honradez en los años que llevaba como contratista.

También salieron a relucir todas las vicisitudes que venía sufriendo la construcción del tercer depósito desde hacía ya más de treinta años. Y, sin dejar de atacar en esta dirección, al mismo tiempo se empezó a poner en entredicho la competencia de los ingenieros que habían participado en su proyecto y construcción, atreviéndose algunos a extender esta idea a la mayoría de los técnicos españoles.

Pero, tras la cautela de los primeros momentos, se alzaron muchas voces en defensa de Ribera y los demás encausados. Las páginas de *"La Energía Eléctrica"*, *"Madrid Científico"*, la *"Revista Minera Metalúrgica y de Ingeniería"* se llenaron de pronunciamientos a favor de su honradez y aptitud. Hubo incluso quienes, como Mauricio Jalvo, no dudaron en apoyar a Ribera a pesar de ser su competidor en el terreno empresarial (32).

La catástrofe trascendió enseguida más allá de nuestras fronteras, siendo también objeto de controversia. El hundimiento de una construcción tan significativa restó crédito al hormigón armado, cuya validez como material de construcción no estaba todavía definitivamente consolidada.

Aunque hubo quienes aprovecharon el desastre para dar por muerto al hormigón armado y celebrar sus funerales (33), la actitud de técnicos prestigiosos como el ingeniero vienés Fritz Von Emperger contribuyó a despejar las in-

At the same time and in response to an Order in Council of 8 April 1905, a commission was established to investigate the incident. The commission was formed by the military engineers Jose Marva and Francisco Perez de los Cobos, the architects Rafael Cereo and Federico Aparici and the civil engineers Jose Arenas and Antonio Arevalo. The Madrid City Council also entrusted the military engineer Eduardo Gallego and the architect Mauricio Jalvo, two of the leading specialists in reinforced concrete at the time, to act as experts to investigate the causes for the collapse.

Legal proceedings began immediately and charges were brought against Alfredo Alvarez Cascos, the director of the Canal (after taking over from Inchaurrandieta) and Carlos Santamaria, the project manager of the third tank. For his part, Jose Eugenio Ribera, in a gesture of honesty accepted all responsibility even though he was not directly in charge of the works (the contractor's site manager was the civil engineer Mariano Luiña).

7. Controversy after the disaster

The disaster of the third reservoir had a great impact on public opinion. All manner of comments appeared in the press over the months following the accident, firing a controversy on two fronts.

A large sector of the press, infuriated by the high number of victims, considered the main culprits to be the technicians and, particularly, the contractor. With "El Liberal" at the forefront, this sector reiterated the very widespread public belief that the contractors and administration were in cahoots to make money at the expense of the contract with little concern for the safety of the workers or the defective state of the construction.

These insinuations were not entirely implausible as Spain had experienced several cases of this deplorable practice at the beginning of the 20th century. However, these accusations were particularly unfair in this case as they were aimed at a person who had shown utmost integrity and honesty throughout his time as a contractor.

This same press were only too keen to reveal all the problems that had handicapped the construction of the third water reservoir for over thirty years and, while not easing in their attacks, they also began to question the capacity of the engineers who had intervened in the design and construction, with some sectors of the press inferring that this failing applied to the majority of Spanish technicians.

However, after initial caution many voices began to be raised in defence of Ribera and the others who had been charged. The journals "La Energía Eléctrica",

certidumbres que planeaban sobre él. Con los artículos publicados en su revista *"Beton und Eisen"*, empezó a arrojar luz sobre las verdaderas causas del accidente (34).

En España, desde la Revista de Obras Públicas también se trabajaba en esa dirección, aunque no sin dar crédito a alguna que otra hipótesis aventurada, como que el hundimiento se debía a pequeños movimientos sísmicos (explicación que el catedrático de Geología Francisco Vidal y Careta propuso en "El Heraldo de Madrid") (35).

No obstante, sería un nuevo accidente en el depósito, esta vez sin consecuencias, lo que aportaría la explicación definitiva. En los primeros días de junio, estando las temperaturas en torno a los cuarenta grados, varias vigas de los compartimentos primero y segundo empezaron a romperse, no sin antes experimentar grandes deformaciones. Para la Revista de Obras Públicas, la cosa estaba clara: la ruina de estas vigas confirmaba que *"la causa determinante de la caída de las bóvedas el 8 de abril fue debida a la dilatación de las vigas del cemento armado producida por la elevada temperatura de aquellos días"*.

De esta forma, había encontrado lo más parecido a una causa de fuerza mayor, justificando que no se hubiera tenido en cuenta porque *"al tratarse de un material relativamente nuevo en España se consultó el caso a eminencias extranjeras, las cuales aconsejaron dar muy poca importancia a tal clase de esfuerzos"* (36).

Sin embargo, la comisión mixta encargada de esclarecer las causas del desastre no estaba tan convencida. De acuerdo con su dictamen, emitido algunos días antes, *"la intervención de fuerzas diferentes de las verticales, engendradas por la distribución de tierras sobre las bóvedas"* había causado la rotura de alguna de ellas o de los pilares, transmitiéndose después al resto de la cubierta del cuarto compartimento, que no estaba organizada para resistir fuerzas horizontales. La mayoría de los miembros se reafirmaron en sus conclusiones aún después de suceder la rotura de las vigas de junio, haciéndolo constar claramente en un añadido al dictamen: *"los que suscriben, sin negar la influencia destructora que en determinadas condiciones y circunstancias tienen sobre las obras de cemento armado los continuos y grandes cambios de temperatura, creen más aplicable el principio del hundimiento por las causas a que dio lugar la distribución de tierras sobre las bóvedas"*.

Por su parte, Arenas y Arévalo, los dos ingenieros de caminos de la comisión, emitieron un voto particular, haciendo hincapié en que la rotura se produjo por tres causas: 1) dilataciones producidas por el calor, 2) diferencia de carga de tierra en bóvedas contiguas y 3) choques, vibraciones y empujes producidos por el movimiento de operarios y carretillas.

La trascendencia que estaba alcanzando el desastre del *Tercer Depósito*, hizo reaccionar a la organización Henebique, temerosa de que pudiera afectar al crédito del

"Madrid Científico" and *"Revista Minera Metalúrgica y de Ingeniería"* all ran articles supporting Ribera's honesty and capacity. There were others, such as Mauricio Jalvo, who did not hesitate to support Ribera even though they were business competitors (32).

News of the disaster immediately spread abroad and was also subject to heated debate. The collapse of such a significant construction discredited the use of reinforced concrete at a time when it still trying to establish itself as a building material.

While there were those who considered the disaster to be the death of reinforced concrete and who duly celebrated its demise (33), other renowned professionals, such as the Austrian engineer Fritz Von Emperger, helped clear doubts hovering over the technique. The articles published in his journal "Beton und Eisen" began to cast some light on the true causes of the accident (34).

In Spain, the Revista de Obras Públicas also worked in this direction, though not without first crediting other theories which had been put forward, such as the possibility that the collapse was due to small seismic movements (as proposed by the Professor in Geology Francisco Vidal Careta in "El Heraldo de Madrid") (35).

However, it would be a further accident at the water tank, though this time without consequences, that finally provided the true explanation. In early June and with daytime temperatures of around forty degrees, several beams in the first and second compartments began to break after showing serious deflection. The Revista de Obras Públicas considered the matter to be cut and dry and that the collapse of the beams showed that "the reason for the collapse of the vaults on 8 April was the expansion of the reinforced concrete beams on account of the high temperatures recorded at the time".

In this way the journal had found a reason which was one of extenuating circumstances and which, subsequently, justified why this had not been taken into account. The journal went on to say that "as this was a relatively new material in Spain, foreign experts had been consulted and these had indicated that it was not necessary to place too much importance on this type of stress" (36).

However, the joint commission entrusted with clarifying the causes of the disaster were not so sure. In the commission's findings, issued several days earlier, they stated, "the intervention of non-vertical forces, brought about by the soil distribution over the vaults", had led to the failure of a number of vaults or columns and this has then transferred to the rest of the roof to the fourth compartment which was not arranged to resist horizontal forces. The majority of the commission members stood by these conclusions even after the failure of the beams in June and explicitly referred to this event in an appendix

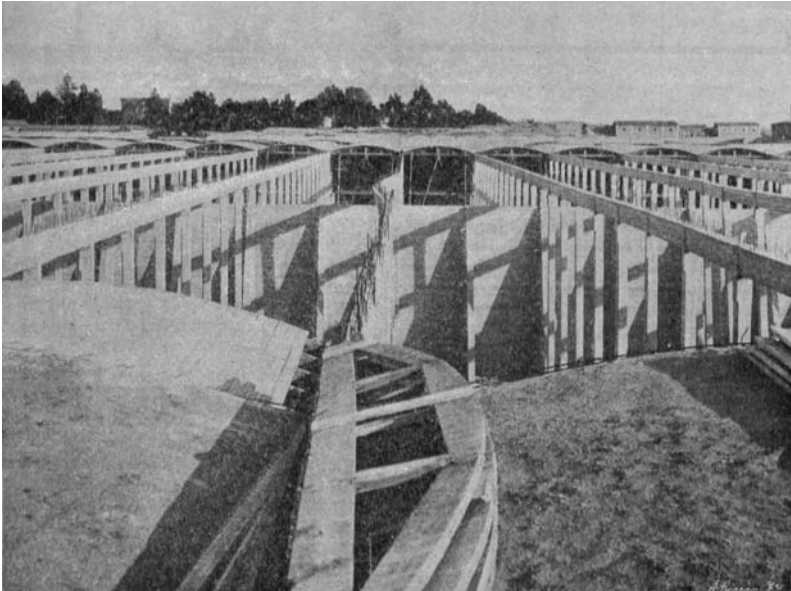


Fig. 8.
Deformaciones en las vigas del primer compartimento. Publicado en la R.O.P. / Deformation of beams in the first compartment. Published in the R.O.P.

hormigón armado en general. En su revista de difusión mundial "Le Béton Armé" quiso marcar distancias con lo sucedido en Madrid, dejando claro que en sus obras siempre había tenido en cuenta el efecto de las variaciones de temperatura y que por eso no se habían caído. Achacaba el hundimiento a "errores groseros de proyecto y graves deficiencias en la ejecución, además de una deplorable negligencia en la dirección de los trabajos". No contento con esto, atacó duramente a los técnicos que habían decidido el concurso, poniendo en duda su capacidad técnica y vertiendo serias acusaciones de amiguismo sobre la adjudicación a Ribera (37).

Incierto se presentaba el panorama para el hormigón armado, pero pronto los ingenieros españoles irían despejando todas las dudas con notables realizaciones. Tan sólo ocho meses después del desastre se inauguraba el embarcadero de la Compañía de las minas de Cala en el Guadalquivir, la primera gran obra de Zafra. El espaldarazo definitivo llegaría el año siguiente, con las obras del Canal de Aragón y Cataluña, entre ellas especialmente el Sifón del Sosa, proyectado por Ribera y ejecutado por Mariano Luiña como jefe de obra.

El hormigón armado se abría paso en la construcción española, ya de un modo imparable. La empresa de Ribera empezaba a levantar el vuelo, sobreponiéndose a las dificultades. Sin embargo, todavía estaba pendiente el juicio, último acto de la catástrofe del *Tercer Depósito*.

8. El juicio

El primero de abril de 1907 comenzaba la vista oral en la Audiencia Provincial de Madrid (38). Presidía el tribunal

to their report, "while not rejecting the destructive influence that continuous and large changes in temperature may have on reinforced concrete under certain conditions and circumstances, the undersigned consider it more probable that the collapse was caused by the distribution of soil over the vaults".

Arenas and Arevalo, two civil engineers forming part of the commission, issued a particular vote indicating that the failure had been caused by three reasons: 1) thermal expansion, 2) difference in soil load on adjacent vaults and 3) knocks, vibrations and pressure caused by the movement of workers and wheelbarrows.

The outcry caused by the disaster of the Third Water Tank led to a reaction by the Hennebique organization, fearful that this could discredit the use of reinforced concrete. In their international journal "Le Béton Armé", the company attempted to distance themselves from the Madrid incident by claiming that they had always considered the effect of temperature variations in their work and for this reason, none of them had ever failed. The organization attributed the collapse to "gross design errors and serious construction deficiencies in addition to deplorable negligence in work management". The organization did not leave it there and heavily criticized the technicians that had awarded the contract, questioning their technical capacity and casting serious aspersions of manipulation in the awarding of the contract to Ribera (37).

The future for reinforced concrete was bleak but Spanish engineers soon began to clear up any doubts by a number of notable works in this material. Just eight months after the disaster, Zafra saw the opening of his first great work, a pier for the Cala Mines Company on the Guadalquivir. The final backing was to arrive the following year with the Aragon and Catalonia Canal works and particularly the River Sosa Syphon, designed by Ribera and with Mariano Luiña as site director.

Reinforced concrete was now making unstoppable headway in Spanish construction. Ribera's company began to raise its head and overcome past difficulties. However, the trial was still pending, and this was to be the final act in the disaster of the Third Water Reservoir.

8. The trial

The oral hearing began on the first of April 1907 at Madrid Provincial Court (38). The hearing was presided by Judge Higuera, with Antonia Matria de Mena acting as Chief Prosecutor. The accusation was also maintained by the State Attorney Monet and Abril Ochoa representing the Madrid Council which had entered a private accusation.

de derecho el magistrado Higuera, actuando Antonio María de Mena como fiscal. Sostenían además la acusación los letrados Moret, abogado del Estado, y Abril Ochoa, en representación del Ayuntamiento de Madrid, que se había personado como acusación particular.

Por parte de la Defensa, los abogados Díaz Cobeña, Bergamín y Melquiades Álvarez, representaban a Álvarez Cascos, Santamaría y Ribera, respectivamente.

La vista empezó con el dictamen de las acusaciones. El fiscal abundaba en la tesis de la comisión, según la cual el hundimiento se había originado por una incorrecta realización de las pruebas de carga. Estimaba que los tres acusados se habían comportado de modo imprudente, por lo que solicitaba para ellos penas de seis meses de prisión y les exigía el pago de cuantiosas indemnizaciones para las familias de los obreros muertos y para los heridos. La acusación particular elevó la pena hasta un año de prisión y solicitó mayores indemnizaciones.

El día siguiente se realizó una inspección ocular de las ruinas del *Tercer Depósito* y a continuación tuvo lugar la prueba pericial. El primero en declarar fue el ingeniero militar José Marvá, como perito de la acusación. Recalcó que el proyecto tenía serias deficiencias y se reafirmó en las conclusiones a las que había llegado la comisión que él había presidido: que los efectos atmosféricos no habían podido ser la causa principal del hundimiento.

La defensa de Ribera presentó como peritos a Antonio Arévalo y José Arenas, los dos ingenieros de caminos que habían emitido un voto particular en el dictamen de la comisión. Al contrario que Marvá, sostuvieron que "el calor extraordinario que se sintió sobre la cubierta" había provocado su destrucción. Arenas lo expuso muy gráficamente, expresando que la energía que se había originado por el calor sobre la cubierta sería suficiente para levantar treinta centímetros la Torre Eiffel.

Uno de los momentos decisivos del juicio tuvo lugar cuando Melquiades Álvarez lanzó la siguiente pregunta al perito de la acusación: "Aún suponiendo que el proyecto contuviese las deficiencias que ha señalado la mayoría de la Comisión; aún suponiendo que todo esto fuera dogmático, ¿puede decirse que una vez aprobado el proyecto, alcance alguna responsabilidad por imprudencia al contratista que lo llevó a efecto, al ingeniero que lo inspeccionó o al vigilante que lo vigiló?" El fiscal se opuso a la pregunta y Marvá trató de eludirla, pero al final no tuvo más remedio que admitir que esos técnicos "no podían cargar con responsabilidades ajenas". De esta forma quedaba abierto el camino para la absolución.

Al día siguiente declararon los peritos del Ayuntamiento, el arquitecto Mauricio Jalvo y el ingeniero militar Eduardo Gallego. Con sus intervenciones apoyaron la idea que el abogado de la defensa estaba intentando transmitir. Para el primero, lo que más había contribuido al hundimiento

The defence council was formed by the lawyers Díaz Cobeña, Bergamín and Melquiades Álvarez representing Álvarez Cascos, Santamaría and Ribera, respectively.

The hearing began with the reading of the charges. The prosecutor took on the findings of the Commission and indicated that the collapse had been caused by an incorrect method of load testing. The prosecutor considered that the three accused had acted negligently and called for prison sentences of six months for each of them and demanded the payment of significant compensation for the families of the dead workers and those injured in the incident. The private accusation called for a higher prison sentence of up to one year and greater compensation.

On the following day a visual inspection was made of the ruins of the Third Tank and this was then followed by the presentation of evidence. The first person to declare was the military engineer José Marva, acting in his capacity as expert for the prosecution. Marva stated that the project had serious defects and reiterated the conclusions made by the commission which he himself had presided and stating that the atmospheric effects could not have been the sole cause of the collapse.

Ribera's defence presented Antonio Arevalo and Jose Arenas as their expert witnesses. These being the two civil engineers who had issued an alternative vote in the commission's findings. As opposed to that held by Marva, the engineers maintained that "the extraordinary heat on the roof cover" had led to its destruction. Arenas demonstrated this very graphically by indicating that the energy caused by the heat on the roof would have been enough to raise the Eiffel Tower some thirty centimetres.

On of the most decisive moments in the trial took place when Melquiades Álvarez posed the following question to the prosecution witness: "Even in the case that the project had the deficiencies indicated by the majority of the Commission and even when taking this to be entirely dogmatic, is it possible to attribute any type of liability for negligence to the contractor making the design, the engineer inspecting the same or the site manager administering the same, once a design has been approved? The prosecutor opposed the question and Marva attempted to avoid it, but in the end had no alternative but to admit that these technicians "could not be held liable for the responsibility of others" which then left the door open for the dropping of charges.

On the following day statements were heard from the Council experts, the architect Mauricio Jalvo and the military engineer Eduardo Gallego. In these declarations they supported the idea that the defence lawyer had tried to convey. Jalvo considered that the lack of transversal supports had largely contributed to

fue la falta de arriostramientos transversales. Corroboraba esta opinión Gallego, para quien *"la causa esencial, determinante de la catástrofe, fue el haberse aceptado un proyecto falto de condiciones de viabilidad práctica por no ofrecer estabilidad en grado suficiente"*.

El momento culminante del juicio llegó con la comparecencia, como perito de la defensa, de José Echegaray. Este gran ingeniero de caminos, eminente matemático, político y dramaturgo estaba en 1905 en la cúspide de su fama, tras recibir el año anterior el premio Nobel de literatura. Había acudido en ayuda de Ribera, al que apenas conocía, y su intervención resultó determinante para resolver el juicio a su favor.

Con un brillante discurso dejó claro que el colapso de la cubierta se había originado por efecto del calor, que no se había contemplado en el proyecto porque antes del hundimiento *"era completamente desconocido o negado como influencia importante en esta clase de obras"*. Citó a los mejores especialistas en hormigón armado del momento en apoyo de esta afirmación que completó con una magistral explicación basada en la forma (*simétrica y orientada*) en que se había producido la rotura. Terminó su declaración entre aplausos, afirmando que *"el hundimiento del cuarto compartimento fue debido, como causa fundamental, a un exceso de temperatura, a una gran ola de calor, cuyos efectos ni prácticos ni teóricos se habían sospechado (...), todo lo cual constituye un caso de fuerza mayor"*.

Terminaba así la prueba pericial, teniendo que exponer a continuación los diferentes letrados sus conclusiones.

En vano apeló el fiscal a los miembros del jurado a que no temieran *"tener que condenar a alguien que tan alto está por encima de todos nosotros, el Sol"*, afirmando que *"en el banquillo hay verdaderos culpables que están por debajo del Sol y al alcance de vuestra justicia"*. Tampoco tuvieron más éxito el abogado del Estado y el del Ayuntamiento. Este último fue durísimo con los acusados, llegando a decir que habían actuado como *"el médico que al ligar una vena comete una imprudencia y deja desangrar al enfermo, o como el farmacéutico que al despachar una medicina delicada pone más gotas que las que recetó el médico y mata al enfermo"*. Intentó erigirse como representante de la opinión pública, que, azuzada por un amplio sector de la prensa, estaba en contra de los acusados.

Melquiades Álvarez, aun remarcando la gran categoría profesional de su defendido, Ribera, centró la atención en que había quedado exento de responsabilidades al ser aceptado el proyecto por las autoridades. Bergamiñ, defensor de Santamaría, alegó que este y Álvarez Cascos habían ejercido honrosamente sus funciones, habiendo previsto la catástrofe y señalado los defectos que tenía el proyecto. Indignado por las insinuaciones que sobre que la

the collapse and this opinion was corroborated by Gallego, who stated that "the main and determining cause of the disaster was the fact that a project was accepted which lacked practical viability as it failed to offer a sufficient degree of stability".

The key point in the trial came with the appearance of Jose Echegaray acting as witness for the defence. This great civil engineer, eminent mathematician, politician and dramatist was at the height of his fame in 1905 after having received the Nobel Prize for literature the previous year. He had come to the aid of Ribera, who he hardly knew, and his intervention was to prove essential to the outcome of the trial.

Echegaray gave a brilliant speech and made it clear that the roof had collapsed on account of the effects of heat. He stated that this had not been considered in the design as "this was not known or not considered to be an important influence in this type of works" prior to the collapse. Echegaray referred to the leading specialists in reinforced concrete of the day in support of his statement which he concluded with a masterly explanation of the (symmetrical and oriented) manner in which the collapse had occurred. He finished his intervention to great applause, stating that the collapse of the fourth compartment was essentially due to excessive temperatures, in the form of a long heat wave, and neither the practitioners or theorists could have envisaged the effects of the same (...) which all serves as a case of force majeure".

The hearing of evidence was then concluded and it was then left to the lawyers for the defence and prosecution to give their summaries.

The prosecutor appealed in vane to the members of the jury that they should not fear "convicting something so much higher than all of us, such as the Sun", and adding that "the true culprits were sitting on the bench, below the Sun and within the reach of your justice". The State Attorney and the Council representative similarly failed in their attempts to sway the jury in spite of a savage attack on the accused by Ochoa in which he compared them to "a doctor who negligently slits a vein and leaves the patient to die, or the pharmacist who adds more drops of medicine than prescribed by the doctor and who duly kills the patient". The council representative had attempted to appear as a representative of public opinion against the accused which had largely been fired up by a broad section of the press.

Melquiades Alvarez, acting for Ribera, underlined the high professional standing of his client, but focused his summary on the fact that the authorities had accepted Ribera's design and that he was subsequently devoid of responsibility. Bergamin, acting for

honradez de su defendido había hecho el abogado del Ayuntamiento, le recriminó que en vez de acusar estaba calumniando. Por su parte, Díaz Cobeña, abogado de Álvarez Cascos, destacó que su defendido “tenía facultades de inspección, pero no obligación de inspeccionar” y terminó pidiendo al jurado “que tuviera valor para dictar un veredicto que quizás no está en armonía con las exigencias de la opinión pública, pero que es verdaderamente justo”.

Los miembros del jurado le hicieron caso, declarando inocentes a los acusados.

9. Las lecciones del accidente.

Cien años después, circulan dos versiones sobre lo que ocurrió en el *Tercer Depósito*. Por un lado, todavía persiste la idea de que el desastre fue debido a corruptelas entre el contratista y la Dirección Facultativa, que habían menoscabado la calidad de la obra para lucrarse. Son los rescoldos de la campaña que la mayoría de la prensa del momento lanzó contra los técnicos que habían intervenido en el proyecto.

Ya se ha comentado, pero no huelga repetir aquí otra vez que esta acusación, además de falsa, es muy injusta. En el juicio quedó suficientemente claro que se utilizaron materiales adecuados, que el contratista no hizo modificaciones en perjuicio de la obra y que la Dirección Facultativa cumplió escrupulosamente con sus obligaciones. Cosa también corroborada, no obstante, por la trayectoria profesional de los implicados, en la que siempre dieron muestras de honradez.

Por otro lado, en las referencias procedentes de medios técnicos se hace hincapié en que, como quedó refrendado en el juicio, el hundimiento fue debido a causas de fuerza mayor. Pero no se deberían dejar de reflejar las equivocaciones que se produjeron en todo el proceso de construcción del *Tercer Depósito*, tanto en el proyecto como en el concurso y en la ejecución.

En primer lugar, el proyecto tenía el fallo de la ausencia de arriostramientos transversales. ¿Cabe pensar que el proyectista no había contemplado que se podrían producir esfuerzos horizontales? Tratándose de Ribera, la respuesta no puede ser más que negativa. Sabía que se podían presentar, pero confiaba en que sus bóvedas los absorberían sin que pudieran causar problemas. Es más, lo había comprobado experimentalmente, como era habitual en los inicios del hormigón armado. Sin embargo, se equivocó al no considerar que se podían producir esas acciones horizontales por efecto del calor, bien porque hasta el hundimiento nadie lo tenía en cuenta en los cálculos, bien porque hizo estos partiendo de la hipótesis de estar terminada la cubierta, no previendo que duran-

Santamaria, pleaded that both Alvarez Cascos and his client had performed their duties in an honest fashion and had foreseen problems and underlined the design faults. The defence council was angered by the insinuations made by the Council's lawyer in terms of his client's honesty and considered that these were not accusations but slander. Diaz Cobeña, acting for Alvarez Cascos, underlined that his client "had the authority to inspect but not the obligation to do so". The lawyer summed up by asking the jury "to be brave enough to issue a verdict which possibly went against public opinion, but which was truly fair".

The members of the jury took heed and declared the accused innocent.

9. Lessons from the accident

One hundred years on, there are two versions of the events at the Tercer Deposito. One version still clings to the idea that the disaster was caused by underhand dealings between the contractor and the authorities in an attempt to make money at the expense of the quality of the work. This being the remnants of the campaign launched by the majority of the press against the technicians working on the project.

It has already been noted, but does not go amiss to repeat, that this accusation is both false and unfair. During the trial, it was proved that the materials were suitable, that the contractor did not make modifications to the detriment of the work and that the Project Management scrupulously complied with their obligations. This was further corroborated by the professional conduct of the accused right up to the time of the incident and where they had always shown signs of honesty.

In the second version, and in accordance with references made in technical journals, it has been underlined that the collapse was caused by force majeure as duly indicated in the trial. However, one should not ignore the errors that occurred during the entire building process of the Third Water Reservoir, at the design, design award and construction stages.

In pride of place, the design was faulted by the lack of transversal bracing. Is it possible to believe that a designer could ignore the possibility of horizontal forces? This being Ribera, the statement could not be further from the truth. He was aware that this could occur but trusted that his arches would absorb the same without problems. He had even gone as far as testing for this eventuality as was frequently the case in the early days of reinforced concrete. However, he miscalculated by failing to consider that these horizontal stresses could be caused by heat, either because up to the time of the collapse nobody had

te la ejecución podía pasar por una situación más desfavorable, como efectivamente sucedió.

En segundo lugar, en la resolución del concurso quizás se actuara de un modo precipitado. No cabe duda de que había una gran presión para que se resolviera y se construyera el depósito cuanto antes, pero, a la vista de lo que sucedió después, la propuesta más apropiada era la de Zafra, que con arriostramientos transversales costaba prácticamente lo mismo que la de Ribera y no tenía un plazo de ejecución excesivamente mayor. Al final, en la decisión pesó más el prestigio y la gran experiencia de Ribera, a pesar de que ofrecía una solución mucho más arriesgada.

Por último, durante la realización de las pruebas de resistencia se quitó tierra de unas bóvedas para cargar otras. De este modo, las que quedaron descubiertas se encontraron sin protección frente al calor, lo que facilitó la aparición de acciones térmicas que las dañaron. Una vez más, el desconocimiento que hasta el momento se tenía de los efectos de las acciones térmicas sobre el hormigón armado, dio lugar a que se obrara de forma inadecuada.

10. Las víctimas

Los aspectos técnicos del accidente no deberían hacernos olvidar a los que perdieron la vida o quedaron heridos en él mientras trabajaban.

Las cifras oficiales de víctimas del hundimiento, según consta en la sentencia del juicio fueron de treinta obreros muertos y cincuenta y cuatro heridos, gran parte de los cuales quedaron inútiles para el trabajo.

Los afectados y sus familiares, además de las indemnizaciones fijadas por la ley, recibieron las ayudas de varias suscripciones que se promovieron ante la magnitud de la catástrofe.

Aunque por parte de particulares, como el diario *El Liberal*, se organizaron suscripciones solidarias, la más importante fue la que el gobierno promovió entre todos los funcionarios de la Administración.

Abierta hasta el 15 de julio de 1906, se recogieron 94.226 pesetas, de cuyo reparto quedó constancia en la Gaceta de Madrid (39). En el grupo de los más perjudicados, que recibieron 2700 pesetas, se encontraban personas como Atanasio Sánchez o Ricardo Escribese, padres de obreros fallecidos y que no habían recibido indemnizaciones por accidente. También recibió esa cantidad Leonor Hernández, viuda del obrero Melchor Moreno "con seis hijos menores y sus padres ancianos, a los que sostiene". Muchos obreros, como Antonio Ramón Pueyo o José Fariña, que quedaron inválidos recibieron 1250 pesetas, lo mismo que la mayoría de las viudas de sus compañeros. Los obreros que no quedaron inútiles para trabajar (como Julio Frei-

taken these calculations into account or on account of the fact that he had, indeed, made these calculations on the basis of the finished roof but did not foresee that a more unfavourable situation may arise during construction, as was effectively the case.

In second place, the contract was possibly awarded somewhat hastily. There is no doubt that there was a great deal of pressure to award the contract and construct the covered reservoir as soon as possible, but in the light of ensuing events it would have been more appropriate to select Zafra's proposal with transverse bracing which cost practically the same as Ribera's offer and would not take very much longer to build. In the end, Ribera's prestige and experience outweighed other arguments in spite of the fact that this was more of a risk.

Finally, during the strength test process, soil was taken off some vaults and placed on others. This meant that the vaults stripped of soil were left without protection against the heat and this facilitated the thermal action which, subsequently, damaged the vaults. Once more, the lack of any prior knowledge of the effects of thermal action on reinforced concrete gave rise to inadequate procedure.

10. The victims

The technical aspects of the accident should not overshadow the fact that many people lost their lives or were injured in the collapse.

According to the court judgement, the official number of victims of the roof collapse was thirty deaths and fifty-four injured, with many remaining permanently disabled.

In addition to the legal established compensation, the victims and their families also received aid from various funds established in the wake of the disaster.

Aid was raised in the private sector by papers such as the El Liberal, but the most sizeable fund was that collected by the Government from civil servant contributions.

A total of 94,226 Pesetas was collected by the fund up to 15 July 1906 and this was duly distributed among the victims as recorded by the Gaceta de Madrid (39). The most seriously affected group received 2700 Pesetas and these included people such as Atanasio Sanchez or Ricardo Escribese, the parents of workers killed in the accident who had not received compensation for the accident. This amount was also received by Leonor Hernandez, the widow of the worker Melchor Moreno "with six young children and her ageing parents to look after". Many workers like Antonio Ramon Pueyo or Jose Fariña who were disabled as a result of the collapse received 1250 Pesetas, the same amount as the majority of the widows of their fellow workers. Those injured workers who were able to take up work (such as Julio Freire, Mariano Martin, Salvador

re, Mariano Martín, Salvador Manzanares y muchos más) recibieron entre 750 y 600 pesetas.

Una vez efectuado el reparto se recibieron 11.594 pesetas, donativo de los españoles residentes en Argentina. El reparto de esta nueva cantidad se limitó "a los casos de situación más triste producida por la catástrofe", pudiéndose beneficiar de él "inútiles para el trabajo, huérfanos de padre y madre, padres de los fallecidos, hijos menores de catorce años y ascendientes y viudas sin hija".

Nota final: fondos consultados y procedencia de las ilustraciones

Para escribir este artículo he utilizado principalmente el archivo de la *Revista de Obras Públicas*, conservado en el Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.

Las revistas *Le Béton Armé* y *Beton und Eisen* se encuentran en la Colección de Fondos Antiguos de la École Nationale de Ponts et Chaussées de Francia. La fotografía del Tercer Depósito tras el desastre pertenece al Instituto Francés de Arquitectura. ♦

Manzanares and many more) received between 600 and 750 Pesetas.

Once the fund had been distributed a further 11,594 Pesetas was received in the form of a donation from Spanish residents in Argentina. This fund was distributed to those suffering "the most unfortunate situations as a result of the disaster" and went to "those unable to work, orphans, the parents of the deceased, children under fourteen years of age and heirs and widows without daughters".

Final note: Sources consulted and location of illustrations

This article is primarily based on information contained in the archives of the *Revista de Obras Públicas*, held at the Spanish Institute of Civil Engineers.

The journals *Le Béton Armé* and *Beton und Eisen* are held at the archives of the *École Nationale de Ponts et Chaussées* in France. The photograph of the Third Water Tank after the disaster belongs to the *Institut Français d'architecture*. ♦

Referencias/References:

- (1) Maluquer, Manuel: "Visita al Canal de Isabel II". *Revista de Obras Públicas*. Año XLVII, número 1302. Madrid, 8 de septiembre de 1900.
- (2) Freart, Serafín: "Proyecto de un tercer depósito para el abastecimiento de Madrid con las aguas del Canal de Isabel II". *Revista de Obras Públicas*. Año XXX, número 5. Madrid, 15 de marzo de 1882. (y números sucesivos)
- (3) *Gaceta de Madrid*, número 67, 8 de marzo de 1893.
- (4) *Gaceta de Madrid*, número 210, 29 de julio de 1893.
- (5) *Gaceta de Madrid*, número 211, 30 de julio de 1893.
- (6) *Gaceta de Madrid*, número 230, 18 de agosto de 1897.
- (7) Nicolau, José: "Tercer depósito de aguas de Madrid. Proyecto de las obras en construcción". *Revista de Obras Públicas*. Año XLVIII, número 1350. Madrid, 8 de agosto 1901.
- (8) "Construcción de un tercer depósito de aguas en Madrid". *Revista de Obras Públicas*. Año XLV, número 1207. Madrid, 10 de noviembre de 1898.
- (9) *Gaceta de Madrid*, número 310, 6 de noviembre de 1898.
- (10) *Gaceta de Madrid*, número 313, 9 de noviembre de 1898.
- (11) "El Canal de Isabel II". *Revista de Obras Públicas*. Año XLVI, número 1262. Madrid, 30 de noviembre de 1899.
- (12) *Gaceta de Madrid*, número 264, 21 de septiembre de 1900.
- (13) "Las obras del Canal de Isabel II". *Revista de Obras Públicas*. Año LI, número 1447. Madrid, 18 de junio de 1903.

- (14) *Gaceta de Madrid*, número 233, 21 de agosto de 1901.
- (15) *Gaceta de Madrid*, número 11, 11 de enero de 1902.
- (16) *Gaceta de Madrid*, número 32, 1 de febrero de 1903.
- (17) *Gaceta de Madrid*, número 347, 13 de 1901.
- (18) *Gaceta de Madrid*, número 284, 11 de octubre de 1902.
- (19) *Gaceta de Madrid*, número 134, 14 de mayo de 1903.
- (20) Ribera, José Eugenio: *Hormigón y cemento armado. Mi sistema y mis obras*. Madrid, Imprenta de Ricardo Rojas, 1902.
- (21) Ribera, José Eugenio: *Construcciones modernas de hormigón armado*. Conferencia en el Ateneo. Madrid, Establecimiento tipográfico Hijos de J.A. García, 1903.
- (22) *Gaceta de Madrid*, número 213, 1 de agosto de 1902.
- (23) Gallego Ramos, Eduardo: *Hundimiento del Tercer Depósito de aguas del Lozoya. Informe emitido por los peritos del Excmo. Ayuntamiento de Madrid Don Eduardo Gallego Ramos y Don Mauricio Jalvo*. Madrid, Imprenta de Antonio Marzo, 1907.
- (24) "Canal de Isabel II. Concurso para la cubierta y pilares del tercer depósito". *Revista de Obras Públicas*. Año LI, número 1444. Madrid, 28 de mayo de 1903.
- (25) "Le Réservoir de Madrid". *Le Béton Armé*. Año VIII, número 84. París, mayo de 1905
- (26) Ribera, José Eugenio: "Cubiertas para depósitos de agua, de hormigón armado, sistema Ribera". *El Cemento Armado*. Año III, número 2. Madrid, febrero de 1903.

- (27) Von Emperger, Fritz: "Hundimiento del depósito de Madrid". *Revista de Obras Públicas*. Año LV, número 1642. Madrid, 14 de marzo de 1907.
- (28) "Tercer Depósito". *Revista de Obras Públicas*. Año LIII, número 1550. Madrid, 8 de junio de 1905.
- (29) *El Liberal*. Varios artículos del número 9307. Madrid, 9 de abril de 1905.
- (30) Alfaro López, José: *Madrid, primera década del siglo XX*. Madrid, Editorial Magisterio Español, 1979.
- (31) *Gaceta de Madrid*, número 100, 10 de abril de 1905.
- (32) "El hundimiento del Tercer Depósito". *Revista de Obras Públicas*. Año LIII, número 1545. Madrid, 4 de mayo de 1905.
- (33) M. Laur en *L'Echo des Mines*. Citado en la *Revista de Obras Públicas* (ver nota 32).
- (34) "Der einsturz de wasserresevoirs in Madrid". *Beton und Eisen*, año IV. Berlín, 1905.
- (35) De Palau, Melchor: "El hundimiento del Tercer Depósito". *Revista de Obras Públicas*. Año LIII, número 1549. Madrid, 1 de junio de 1905.
- (36) "Tercer Depósito". *Revista de Obras Públicas*. Año LIII, número 1550. Madrid, 8 de junio de 1905.
- (37) "Encore le Réservoir de Madrid". *Le Béton Armé*. Año VIII, número 86. París, julio de 1905.
- (38) "El Tercer Depósito. Vista del proceso en la audiencia de Madrid". *Revista de Obras Públicas*. Año LV, número 1645. Madrid, 4 de abril de 1907.
- (39) *Gaceta de Madrid*, número 221, 9 de agosto de 1906.