

# REVISTA DE OBRAS PÚBLICAS

PUBLICACIÓN TÉCNICA DEL CUERPO DE INGENIEROS DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS

DIRECTOR

D. MANUEL MALUQUER Y SALVADOR

COLABORADORES

LOS INGENIEROS DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS

SE PUBLICA LOS JUEVES

Dirección y Administración: Plaza de Oriente, 6, primero derecha.

## HUNDIMIENTO DEL DEPÓSITO DE MADRID

POR EL

DOCTOR FRITZ VON EMPERGER, DE VIENA (1)

### I.—Pruebas del Depósito de Gijón.

Para poder bien penetrarse de las explicaciones que vamos á dar, conviene describamos previamente las pruebas que hizo el constructor del Depósito de Madrid, Sr. Ribera, con motivo de una obra anterior en Gijón, y cuyos resultados le indujeron á aplicar igual sistema en bóvedas á la gigantesca cubierta de Madrid, después de haber construido otros 25 Depósitos más pequeños.

Conviene hacer este examen para descubrir las razones que impulsaron al constructor á seguir esa disposición, que desde luego podemos adelantar, no fué sugerida por un afán de lucro, sino por un razonamiento digno de ser estudiado, á pesar de su aparente fracaso.

En vista de la importancia de la cuestión, me propuse desentrañarla sobre el terreno, aprovechando un viaje á España, porque de otra manera, discurrendo lejos de la ocurrencia, sin haber visto las cosas con sus propios ojos, se incurre fácilmente en el error, y en todo caso, la opinión que uno se forma es siempre influida por las opiniones ajenas.

El natural propósito de los contratistas de aplicar soluciones económicas es un móvil legítimo, y en la mayor parte de las obras se ve coronado de éxito, pero en este caso particular debemos investigar si las disposiciones adoptadas en Madrid deben ser imitadas, en parte, por lo menos.

Reproduzcamos, pues, y ante todo, las pruebas verificadas en el Depósito de Gijón (2).

.....  
Como se ve (sigue diciendo el Doctor Emperger), el acta de estas pruebas, redactada por el Ingeniero Sr. Luiña y firmada por muchos Ingenieros del Estado que asistieron á todas estas experiencias, ha proporcionado al Sr. Ribera una base autén-

(1) Recordarán nuestros lectores que este eminente Ingeniero austriaco, Director de la acreditada revista *Beton & Eisen*, que es una autoridad en hormigón armado, vino á España para visitar las obras del Sifón del Sosa y del Depósito de Madrid.

Con este motivo ha publicado en los números de Septiembre, Octubre y Febrero de la citada revista una serie de artículos, que creemos de interés y oportunidad traducir.

(2) El Doctor Emperger ha reproducido casi íntegra el acta de las pruebas que publicó en el núm. 1.635 del 24 de Enero pasado de la REVISTA. Por esta razón creemos innecesario reproducirla aquí.

tica para los cálculos que juzgó necesarios para la construcción segura de la cubierta de Madrid.

### II.—Historia del hundimiento.

Aunque el hundimiento fué ya descrito en los números V y VII de 1905 de *Beton & Eisen*, creemos conveniente ampliarlo con nuevos datos.

El estado de adelanto de la obra en el día 5 de Abril de 1905 se representa en la figura núm. 1.

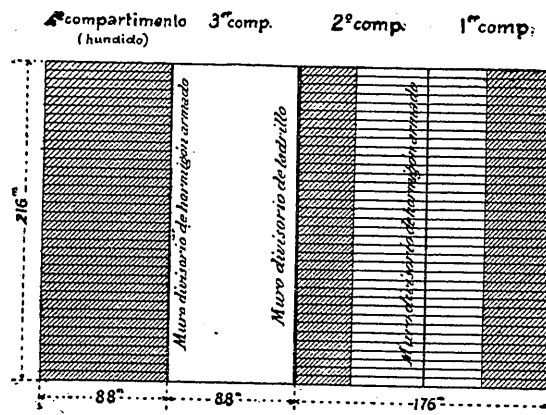


Fig. 1.ª

La superficie total de la cubierta es aproximadamente de 80 000 m<sup>2</sup>, dividida en cuatro compartimentos.

El muro divisorio central es de ladrillo; los otros dos de hormigón armado.

Estaba terminado el compartimento núm. 4, y en los 1.º y 2.º se habían ejecutado todos los pilares y vigas y principiadas las bóvedas, de las que una tercera parte próximamente estaban construidas, según se aprecia en el dibujo anterior.

Las fotografías núms. 2, 3 y 4 dan idea de la forma en que se llevaba este trabajo (1).

Se procedió entonces á hacer pruebas en el compartimento número 4.

Se efectuaron éstas sobre las 36 bóvedas de una fila. La sobrecarga de cálculo era de 700 kilogramos por m<sup>2</sup>, y se llegó á cargar con un espesor de 0<sup>m</sup>,80 de tierra, repartida con la mayor igualdad posible, equivalente á un peso de 1.050 kilogramos por m<sup>2</sup>, ó sea 1,5 veces la carga de cálculo.

(1) El Sr. Emperger publicó por inadvertencia una vista de la construcción del Depósito de Gijón, en el que se siguió la misma marcha que en el de Madrid; nosotros publicamos además dos vistas del Depósito de Madrid durante su construcción.

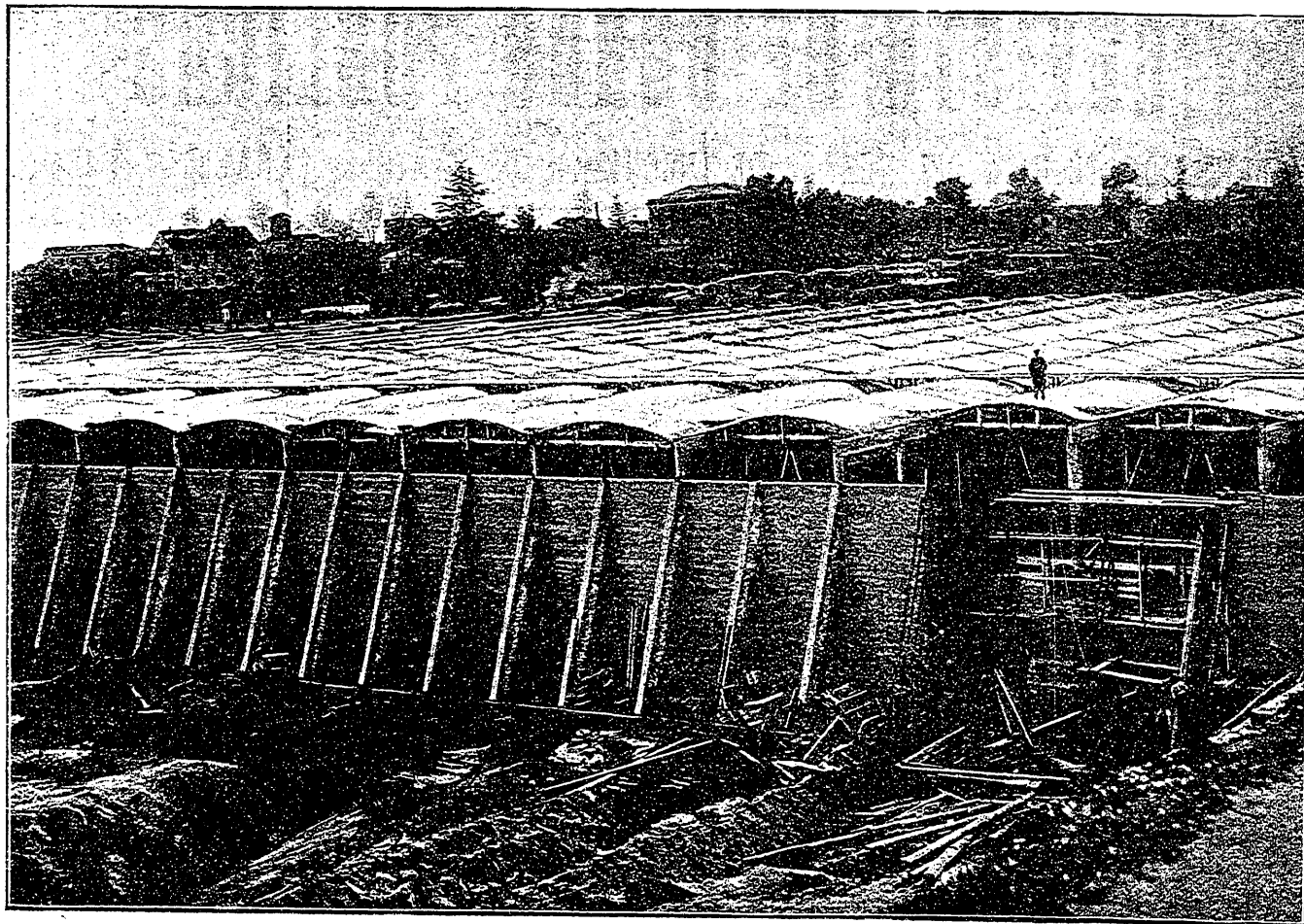


Fig. 2.º—Vista del 2.º muro divisorio y de la cubierta del 4.º compartimiento del Depósito de Madrid, que fué el derrumbado.

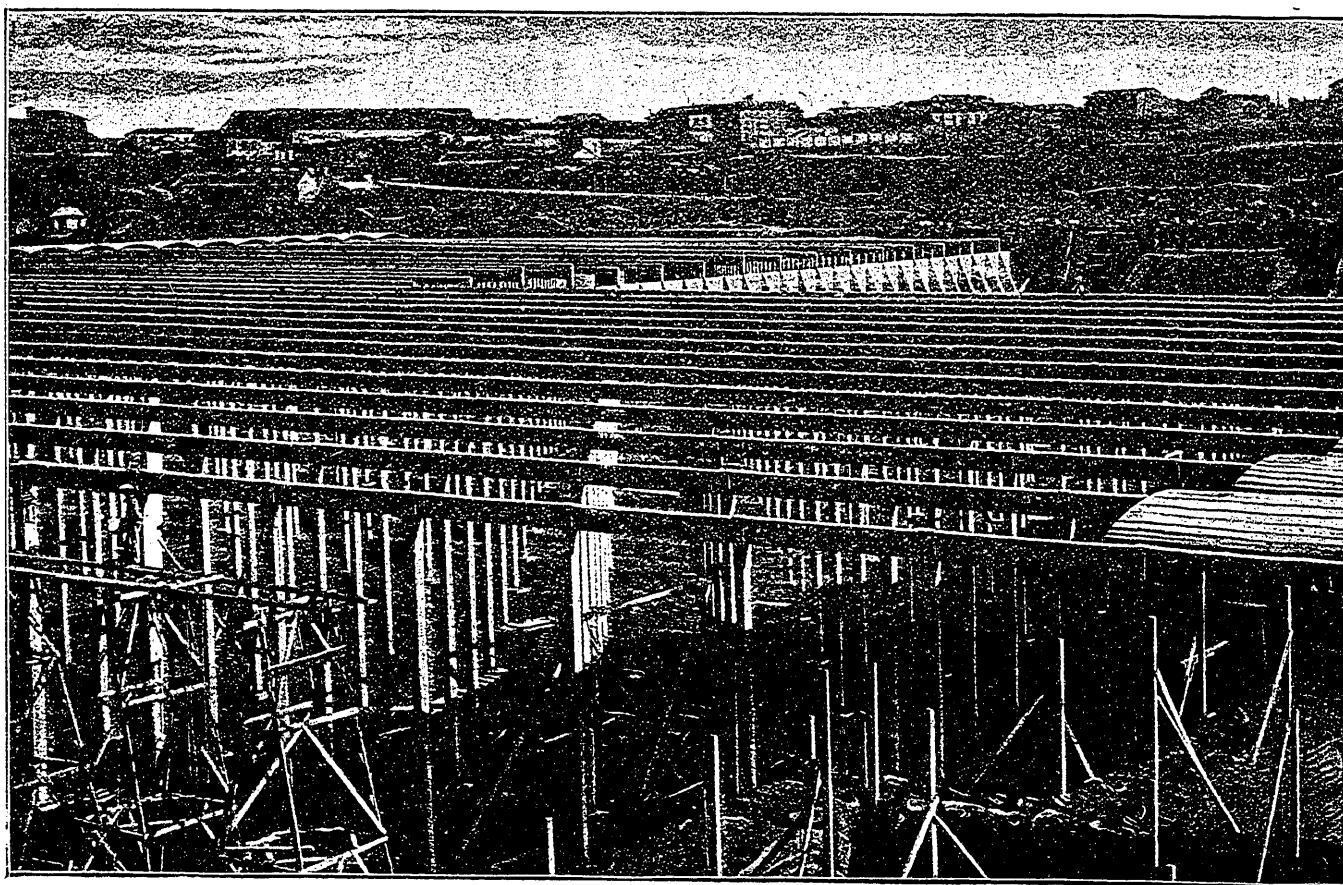


Fig. 3.º—1.º y 2.º compartimiento del Depósito de aguas en Madrid, durante la construcción.

Las flechas que se observaron en la clave de las bóvedas fueron de 3 milímetros, es decir,  $\frac{1}{2.000}$  de la luz de 5<sup>m</sup>,78, flechas inferiores á las observadas en los ensayos de Gijón, cuyos

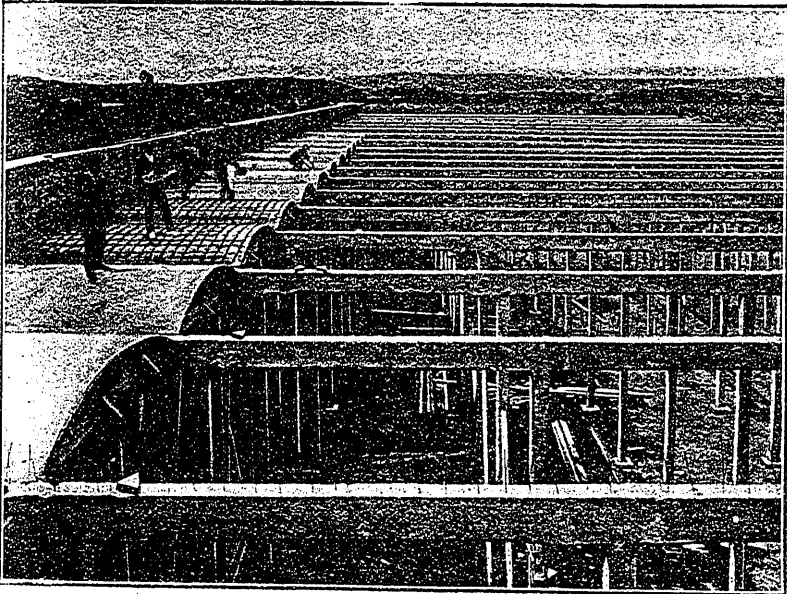


Fig. 4.ª—Depósito de aguas en Gijón, en construcción, por el mismo sistema que el depósito de Madrid.

detalles se describen en el capítulo I de este artículo. Así es que no pudieron menos de considerarse muy satisfactorios los ensayos hechos en el Depósito de Madrid.

Después de estas pruebas se procedió á cubrir aquel compartimiento con el espesor de 0<sup>m</sup>,25 de tierra que debía llevar.

Pero el 29 de Mayo del mismo año, y cuando se estaba procediendo á la investigación de las causas del accidente, ocurrió el segundo acto de esta tragedia, que sirvió de esclarecimiento á la Comisión técnica encargada del examen del ocurrido. Se había ya convenido en atribuir la culpa exclusiva á la deficiencia de los arriostramientos transversales, cuando pidieron la palabra las vigas del primero y segundo compartimiento, que aún no estaban cubiertas, según hemos dicho anteriormente.]

Dichas vigas sufrieron deformaciones, como las que representa la figura núm. 5.

Queda manifiesto que indudablemente las alteraciones en la temperatura han podido originar estas deformaciones, que siguieron aumentando con rapidez hasta ocasionar la rotura de una viga (6 de Junio), que al derrumbarse produjo la caída de casi todas las vigas y pilares que se encontraban aisladas. Este hecho demuestra sobradamente que ha predominado aquí un fenómeno de dilatación.

Ahora es cuando se han observado las temperaturas que reinaron en la época de los hundimientos, ofreciendo este estudio de la relación recíproca, el mayor interés.

Las vigas en los depósitos primero y segundo tenían una longitud total de 176 metros. Se había dado comienzo á las obras en la primavera de 1904, terminándose en invierno, á principios de 1905. En esta primavera se empezó á construir las bóvedas.

La oscilación de temperatura el día 26 de Mayo, tres días antes de observarse las deformaciones del primer compartimiento, alcanzó 38 grados entre las cinco de la mañana y las tres de la tarde. Como consecuencia de estas enormes oscilaciones pudo notarse que algunas vigas llegaron á tener una flecha de 70 centímetros.

Hay que observar que estas deformaciones no se presentaron

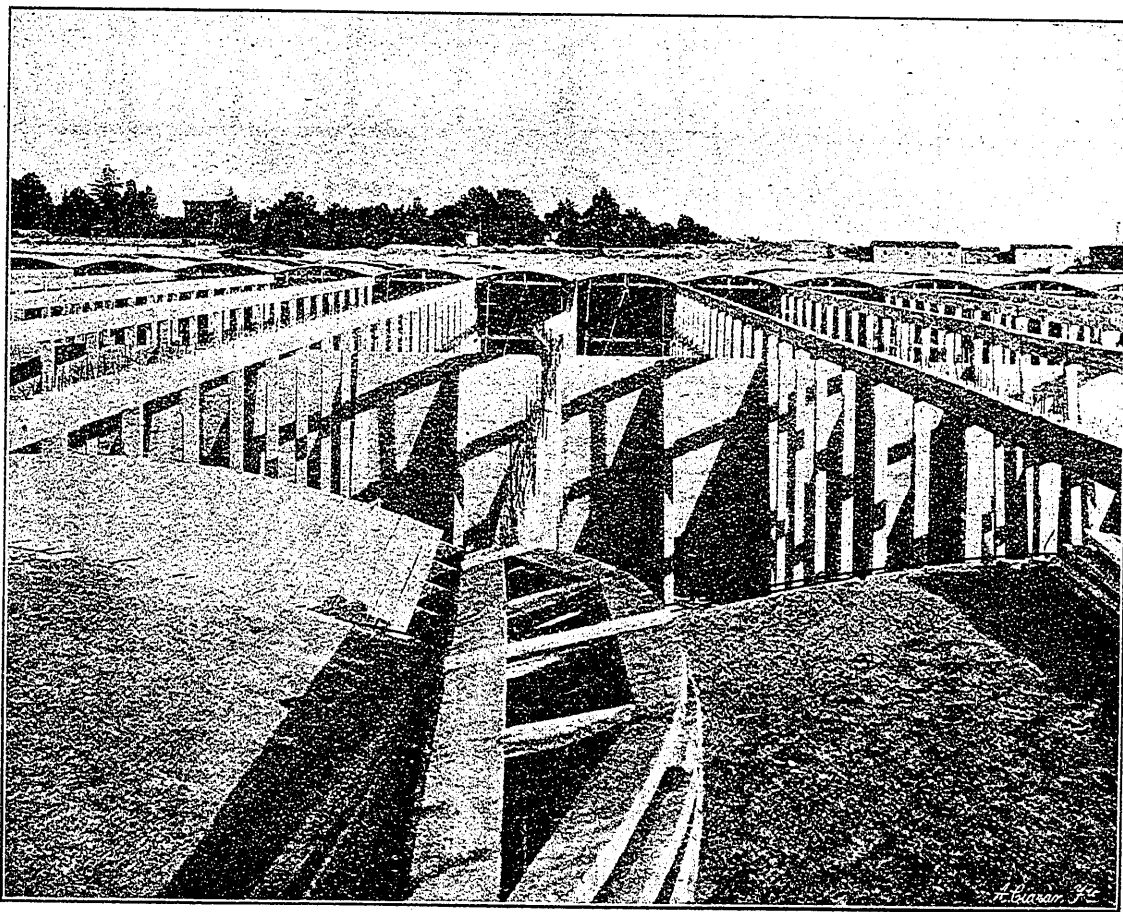


Fig. 5.ª—Vista de la dilatación de una viga del primer compartimiento á consecuencia de la temperatura.

Habiase llegado á la mitad de este trabajo, cuando de repente, el 8 de Abril, se desplomó toda la cubierta, ocasionando la muerte de 29 obreros y saliendo heridos otros 46.

con igualdad en todas las vigas, sino que fueron presentándose sucesivamente y en las horas de más calor y se pudo evitar á tiempo el acceso á estos compartimientos, mientras se iban ob-

servando las deformaciones, que terminaren con el derrumbamiento del 6 de Junio.

Aunque procuráramos explicarnos del mismo modo las causas del primer hundimiento, forzoso es objetar que las vigas del cuarto compartimiento se hallaban ya al abrigo de los rayos del sol por estar cubiertas las bóvedas; la influencia de la temperatura ha debido ser mucho menos eficaz, pero hay que calificarla, sin embargo, de bastante considerable, sobre las zonas de cubierta que no estaban protegidas por la capa protectora de tierra, puesto que tampoco existía por debajo la masa de agua, cuyo efecto compensador de la temperatura es bien conocido.

Para poderse bien penetrar de la causa de los fenómenos que se relacionan con las dilataciones de las vigas por efecto de la temperatura, hay que tener presente la gran sensibilidad elástica de las bóvedas, según lo demuestran los ensayos de Gijón.

En Madrid, las bóvedas tienen una luz de 5<sup>m</sup>,78 rebajadas al  $\frac{1}{10}$ ; están formadas por hormigón compuesto de 400 kilogramos de cemento por metro cúbico de arena y gravilla; tienen un espesor de 5 centímetros en la clave y 10 centímetros en los arranques y armadas con barras de 12 milímetros á 12 centímetros de distancia.

En el caso de que todas las bóvedas fuesen cargadas uniformemente y que los riñones de las mismas fueran estables, las dimensiones antedichas son suficientes.

Pero ¿cuál es el grado de sensibilidad respecto á la temperatura? Suponiendo que los estribos extremos sean rígidos, la fuerza expansiva se concentrará en la parte media, y la forma de las bóvedas se alterará de la manera representada por la figura núm. 6.

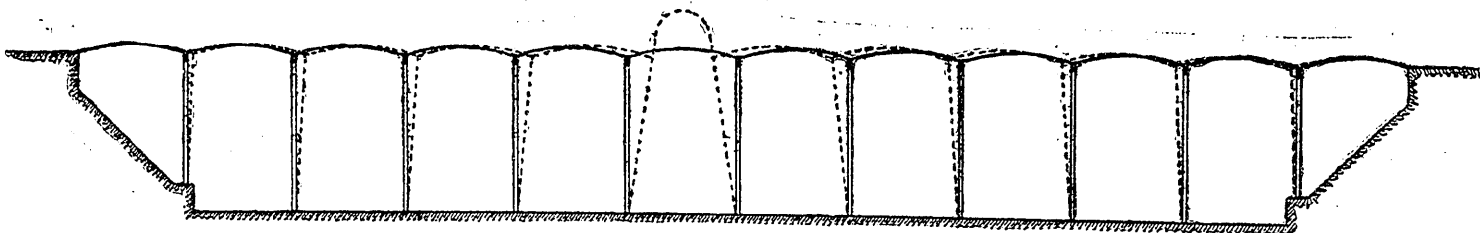


Fig. 6.<sup>a</sup>

Claro es, que la reducción de unos pocos centímetros en la luz de las bóvedas es suficiente para causar su destrucción, porque éstas no están calculadas para resistir esa deformación.

Al peraltarse una fila de bóvedas, las vigas en que se apoya quedan sustraídas á su empuje, y el resultado es el derrumbamiento general de toda la cubierta.

El error cometido en esta obra procede, pues, de dos hipótesis equivocadas: primeramente se ha calculado la cubierta para la hipótesis de estar terminada la obra, no pensándose que para alcanzar esta terminación y antes de que puedan establecerse los dos medios protectores de la capa de tierra por encima y la masa de agua por debajo, había de pasar la obra por una situación que pudiera destruir su estabilidad.

Sólo en segundo lugar hay que observar la ausencia de arriostramientos transversales, pues esta omisión es una consecuencia del primer error.

Recordemos á este propósito la caída del puente de Toddington (Inglaterra), en el que el derrumbamiento de un arco ocasionó el de los tres arcos inmediatos.

Abúsase con exceso de esta falta de precaución en obras de gran altura, en los que nadie se acuerda de que puedan estar dos bóvedas consecutivas sometidas á esfuerzos muy distintos.

Verdad es que en el presente caso se trata de bóvedas rebajadas al  $\frac{1}{10}$ , que han de estar uniformemente cargadas. Es seguro, por lo tanto, que con un arriostramiento transversal de muy poca importancia se hubiere dado á la cubierta la resistencia necesaria para pasar sin peligro el período de su construcción.

Si hubiera podido terminarse la obra, y el depósito hubiere estado en servicio, tengo la convicción de que estaría funcionando hoy sin inconveniente.

Hay, pues, que reconocer que el accidente ocurrido se debe á una viciosa falta de precaución, sancionada, es verdad, por la costumbre de no arriostar transversales las bóvedas consecutivas de una obra.

Pero no pueden hacerse cargos serios por un error de esta naturaleza, sólo porque en estas circunstancias especiales haya producido consecuencias tan desagradables.

Debemos, sin embargo deducir, que es necesario en casos análogos adoptar las medidas necesarias para que las obras resistan los esfuerzos accidentales á que pueden estar sometidos aun durante espacios de tiempo limitado.

### III.—Derrumbamiento del depósito.

Es natural que la construcción de la cubierta de un depósito, que es un elemento que sólo tiene por objeto preservar el agua del calor y del polvo, y que sólo ha de llevar una capa uniforme de tierra, no debe hacerse con los mismos coeficientes de seguridad que los demás elementos de la obra, que exigen mayores garantías de resistencia.

Está, pues, justificado el criterio de apurar la economía, en esta clase de obra, hasta el límite práctico de construcción.

El depósito hundido nos presenta un ejemplo de esta manera racional de apreciar, pues los muros laterales y la solera parecen muy sólidos, mientras los pilares y la cubierta resultan ligerísimos.

Respecto á los materiales empleados, así como á su mano de obra, trátase de una obra tan irreprochable, que hasta la catástrofe, nadie pensó en sospechar de ellos.

Pero uno de los factores que más contribuyen á la economía de la cubierta, es la distribución del trabajo y su modo de construcción, y sólo cuando estudié esta cuestión; fué cuando me expliqué las razones que pudo tener el Sr. Ribera, Ingeniero de reconocida competencia, para prescindir de los arriostramientos horizontales, cuyo coste no hubiera sido, seguramente, de gran monta.

Su plan de trabajo fué el de subdividir la obra en una fabricación separada, pero simultánea, de sus diferentes partes. Primeramente fueron levantándose los pilares; en los moldes de éstos se apoyaban los de las vigas.

Una vez terminados estos elementos y descimbrados, se colocaba en cada intercolumnio una vía móvil, sobre la que corría una cimbra, muy ligera, que servía para la ejecución de las bóvedas. De este modo los obreros podían trabajar simultáneamente en todos los elementos de la construcción, lo que permitía una gran rapidez de ejecución. Es claro, que la aplicación de este procedimiento, base del precio económico ofrecido, hubiera sido imposible, ó por lo menos muy dificultado, con la presencia de arriostramientos transversales, que no hubiesen permitido la traslación continuada de las cimbras de bóvedas, y esta es á mi juicio una de las explicaciones de la catástrofe.

Hemos descrito en *Beton & Eisen* del año 1905, cuaderno VI, página 147, un depósito en Chaill, cerca de Lausanne, construí-

do por el sistema Hennebique. En esta construcción la cubierta es plana y se apoya en una serie de vigas en forma de arco muy rebajado, que hacen el oficio de ménsulas y sustituyen á las bóvedas del sistema Ribera; pero se comprende que el costo había de ser notablemente superior por la dificultad de ejecutar estos elementos.

Dadas estas explicaciones se comprende la gran diferencia que existía entre los 14 concursantes á la obra de referencia, pues los precios por metro cuadrado oscilaban entre 57,50 pesetas y 19,50 pesetas, es decir, una relación aproximada de 3 á 1. Tan grande diferencia nos explica que la construcción hubiera podido hacerse con la economía ofrecida (1).

De los diversos elementos que forman la cubierta proyectada por el Ingeniero Sr. Ribera, los que más interés ofrecen son los pilares. Las dimensiones de éstos eran de 0<sup>m</sup>,25 X 0<sup>m</sup>,25, debiendo resistir la sobrecarga transmitida por una superficie de 25 m<sup>2</sup>, que representa un peso de 7.500 kilogramos, ó sean 28 kilogramos por cm<sup>2</sup>. La resistencia á la compresión, calculándose que el hormigón armado pueda sufrir una carga de 200 kilogramos por cm<sup>2</sup>, se determina por la fórmula

$$\frac{200}{1 + 12 \frac{l}{a}} = \frac{200}{4,84} = 42 \text{ kg. por cm}^2 \text{ (2).}$$

Vemos, pues, que el coeficiente de seguridad de los pilares es de 1<sup>1</sup>/<sub>2</sub>.

En otra clase de obras pudieran parecer insuficientes estas

to, y así lo ha comprendido la autoridad suprema técnica al aprobar el proyecto.

No es dudoso que, una vez terminada la obra, todo peligro hubiese desaparecido.

La figura núm. 7 tomada en el primer compartimento evidencia hasta qué punto aquellas esbeltas columnas ofrecen enorme solidez.

A la derecha se ve, en primer término, un pilar, contra el que ha chocado con gran violencia la viga quebrada que aún queda colgando.

En la parte de la izquierda y en el fondo se observa la cimbra móvil que se utilizaba para la ejecución, y es interesantísimo observar aquellas tres bóvedas al aire, que únicamente se apoyan sobre un trozo de viga en voladizo, también intacto.

Estas pruebas de resistencia de los diferentes elementos, que formaban el esqueleto ó entramado de la construcción, demuestran la absoluta confianza que un Ingeniero de los conocimientos y práctica técnica que posee el Sr. Ribera, tenía en la obra proyectada, pudiendo, por tanto, exigir que por los técnicos y constructores se considere su obra como un proyecto estudiado con esmero, dentro de las condiciones económicas, y no como un atrevimiento de contratista, que sólo ve en la obra su beneficio industrial.

Al principio creí pudiera ser un exceso de ligereza motivado por el deseo de obtener la adjudicación en tan ruda competencia, la causa originaria del hundimiento; pero al anotar estos hechos, reconozco, con gran satisfacción por mi parte, que la obra merece todos mis aplausos á pesar de la desgracia ocurrida.

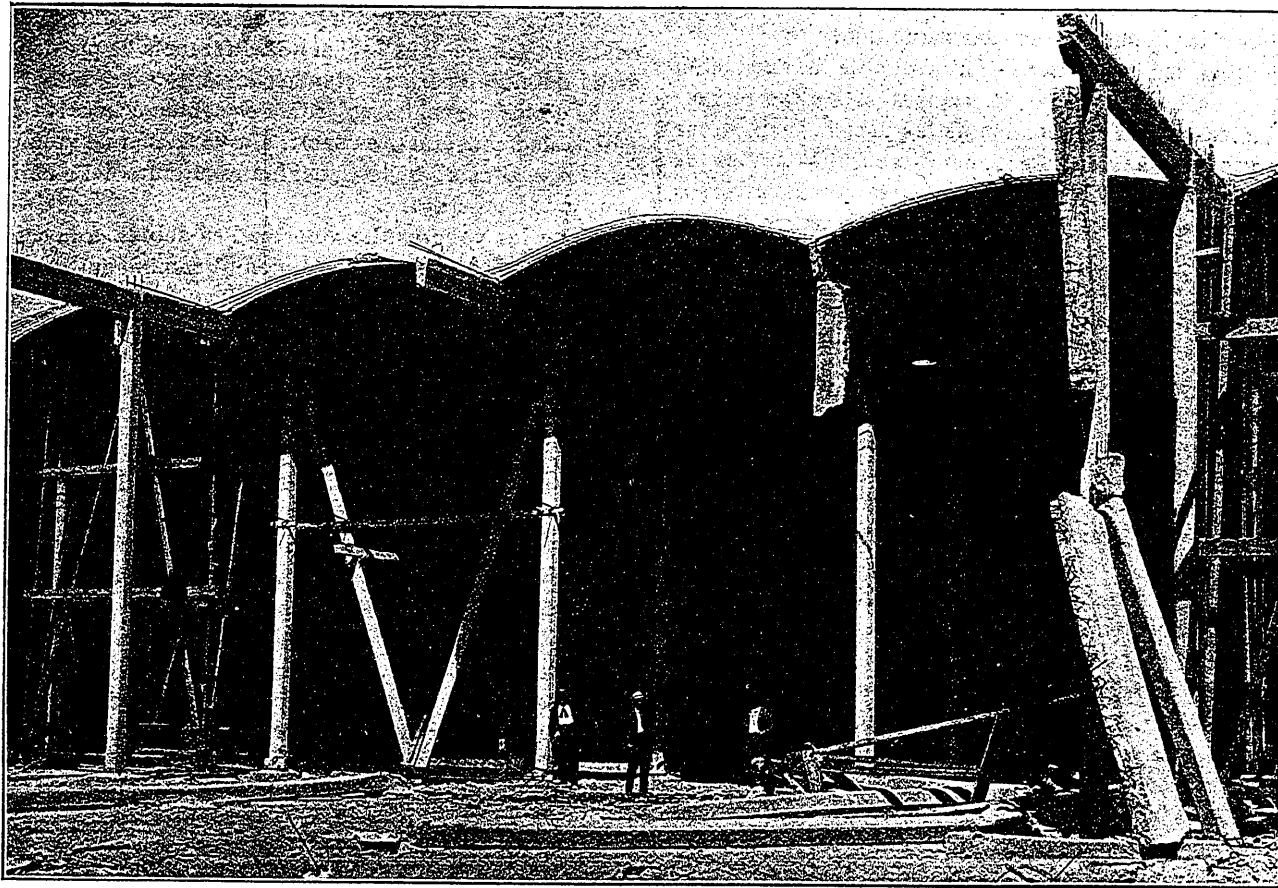


Fig. 7.—Primer compartimento después del derrumbamiento.

dimensiones; pero en el presente no hay motivo para ello, pues como hemos dicho, se trata de elementos secundarios de depósi-

(1) Los presupuestos de la cubierta y pilares para los 80.000 m<sup>2</sup> del depósito de Madrid oscilaban entre 4.800.000 pesetas, que era la proposición del Ingeniero italiano M. Parboni y de 1.562.000 pesetas que era la del Sr. Ribera.—(Nota de la REVISTA DE OBRAS PÚBLICAS.)

(2) Véase *Beton Kalender*, 1907, II.—Teil. S., 61.

Hasta ahora hemos seguido en esta clase de obras, la rutina trazada por los antiguos constructores, que desde la época de los romanos, se limitaban á edificar bóvedas de pequeña luz en cañón ó por arista, sobre gruesos pilares de fábrica.

El empleo del hormigón armado ha permitido aumentar las luces de las bóvedas con gran economía.

Claro es que hubiera podido emplearse la disposición de cubierta plana de hormigón armado; pero ya hemos dicho que

éstas resultaban más caras y exigen mayor plazo de ejecución.

Sigo, pues, considerando que el sistema del Sr. Ribera, bien ejecutado y con el único aditamento de arriostamientos transversales, ha de dar resultados excelentes (1).

---

## LAS TURBINAS DE GAS

---

Los progresos realizados por el motor de gas y la turbina de vapor se cuentan entre los más considerables que la mecánica ha realizado en estos últimos años. Se construyen ya motores de gas de 6.000 caballos, la turbina de vapor ha evolucionado rápidamente y la turbina de gas viene anunciándose desde hace poco como un nuevo motor en vías de realización práctica.

Tres dificultades hay para esto último que vencer. La primera consiste en disminuir las pérdidas en la *compresión neumática á alta presión*. En los motores ordinarios, el gas es aspirado por el émbolo en el cilindro, después comprimido por la misma máquina y la mezcla explosiva á continuación inflamada es la que da impulso al motor. En la turbina de gas, la compresión previa no puede efectuarse por la turbina misma, y es necesario un compresor auxiliar que proporcione el aire comprimido á la cámara de combustión, para enviarle después á la turbina.

El tipo de compresor que parece el más indicado en el caso de las turbinas es el compresor rotativo, el cual puede ir montado en el árbol mismo de la máquina; pero son necesarios serios ensayos á fin de determinar el rendimiento de este aparato que no ha sido todavía suficientemente estudiado.

Otra dificultad reside en la determinación de la expansión de los gases calientes en los tubos inyectores. Las altas temperaturas producidas por la combustión de las mezclas explosivas no permiten que éstas actúen directamente sobre los álabes de las turbinas; ningún metal resistiría. Se han propuesto diversos artificios para remediar este grave inconveniente, entre ellos el de hacer que los gases se expansionen en inyectores previamente á su admisión en el disco móvil, pero es preciso hacer estudios experimentales para determinar las condiciones de este fenómeno de previa expansión.

Finalmente, la tercera dificultad está en determinar las pérdidas térmicas causadas por la radiación. Estas pérdidas son, efectivamente, muy importantes en las turbinas de gas.

Los diversos sistemas de turbinas propuestos ó ensayados pueden clasificarse en tres categorías principales: turbinas de aire caliente, turbinas de explosión de gas ó petróleo y turbinas mixtas de gas y vapor.

El primer sistema está realizado en la turbina Stobbe. Está constituida por dos turbinas montadas en un eje común, una de las cuales funciona como compresor rotativo y la otra como turbina propiamente dicha. El aire proporcionado por el ventilador rotativo pasa desde luego á un recalentador, calentado por los gases del escape, después de lo cual una parte se dirige á la cámara de combustión y la otra á un gasógeno para gasificar un combustible sólido, haciendo el papel de carburador de manera que se obtenga el combustible gaseoso necesario para el funcionamiento de la turbina. Los gases producidos en el gasógeno van á la cámara de combustión, donde se queman al contacto del aire comprimido, dando vapor de agua y ácido carbónico. Esta mezcla pasa después á la turbina, donde se efectúa

el trabajo exterior expansionándose al través de los inyectores de la máquina.

Las tentativas realizadas con el objeto de crear una turbina de gas han tomado por base, en la mayor parte de los casos, el llevar á efecto el ciclo ordinario de los motores de gas, es decir, la combustión de una mezcla de aire y de gas ó de vapor combustible, ardiendo á volumen constante. Las condiciones no son las mismas que para las turbinas de vapor. También M. Meinelke propone producir la combustión á presión constante en un espacio abierto que permita realizar así una operación continua, efectuándose la expansión de los gases, convirtiendo su presión en velocidad en los inyectores de una turbina de gas.

Entre las turbinas mixtas de gas y vapor se puede citar la turbina Armengaud y Lemâle. Lo que caracteriza esta turbina, es que el agua de enfriamiento penetra en estado de vapor en la cámara de combustión y se mezcla á los gases recalentados para actuar sobre la turbina.

La experiencia únicamente podrá determinar el valor de estas tres soluciones que acaban de mencionarse del problema de la turbina de gas.

Cualquiera que sea el fluido empleado, agua, vapor ó gas, el buen funcionamiento de una turbina de acción depende de la velocidad del fluido que actúa sobre los álabes de la rueda móvil. Pero en todos los casos considerados, esta velocidad se obtiene haciendo pasar por un inyector el fluido desde un medio á alta presión á otro á baja presión. Hay, por tanto, una diferencia entre los gases y el agua: en tanto que el agua es sensiblemente incompresible, los gases y los vapores aumentan de volumen á medida que disminuye la presión. Pueden presentarse entonces tres casos principales, á saber:

El de los líquidos incompresibles, tales como el agua, en los cuales la velocidad es debida á la diferencia de presiones, la densidad del fluido permaneciendo constante.

El de los gases. La velocidad es debida á la caída de presión, á densidad constante, es decir, sin variación de volumen, ó bien es debida al cambio de densidad resultante del cambio de presión y de temperatura.

El de los vapores. La velocidad es debida á la caída de presión, á densidad constante, ó bien al cambio de densidad consecutivo á la variación de presión, permaneciendo el vapor en tal estado, ó bien, finalmente, al cambio de estado (recalentamiento ó condensación, según los casos).

La velocidad que da la presión tiene entonces dos orígenes: uno de orden *mecánico* y otro de orden *térmico*. Pero el de orden térmico puede ser positivo ó negativo, es decir, puede aumentar ó disminuir la velocidad debida al primero; la velocidad final no es, por tanto, independiente de la clase de motor. Por otra parte, las leyes de la salida de los fluidos no son idénticamente las mismas en todos los casos; resulta de aquí que la forma del inyector habrá de variar según el fluido empleado.

Conviene observar que las leyes de la expansión, en el caso de la expansión libre, son todavía desconocidas. No se puede, por lo tanto, afirmar que el rendimiento práctico de la expansión libre sea superior al de la expansión equilibrada.

Son, pues, numerosas y delicadas las cuestiones que restan aún por dilucidar en lo que concierne á la turbina de gas.—O.

---

## ABACOS

para la resolución de problemas relativos al movimiento de líquidos en los tubos y alcantarillas.

Los abacos cuya construcción vamos á indicar han sido estudiados por el Ingeniero belga G. Schoofs, y tienen por base las nuevas fórmulas propuestas por M. Flamant, Ingeniero Jefe de Puentes y Calzadas. Para hacer fácil y completa su comprensión, vamos á exponerlos con todo el desarrollo necesario.

(1) Para completar este artículo, que, como se ve, coincide en sus apreciaciones de las causas de la catástrofe con las que emitió la REVISTA DE OBRAS PÚBLICAS en su número del 8 de Junio de 1905, podemos añadir que la revista *Le Ciment* del mes de Junio de aquel año, bajo la autorizada firma de su Director el eminente Ingeniero N. de Tedesco, tan conocido por sus libros y teorías sobre el cemento armado, reprodujo gran parte de nuestro artículo y lo comentó con las siguientes frases: «La causa dada por la REVISTA DE OBRAS PÚBLICAS (la temperatura) es, pues, más que plausible es indiscutible».