

CAPÍTULO IX

CIMENTACIONES DIRECTAS EN AIRE COMPRIMIDO

Cimientos tubulares. — Sus inconvenientes. — Cajones de madera. — Cajones metálicos perdidos. — Cajones metálicos de grandes dimensiones. Pesos de los cajones metálicos. — Cajones metálicos colgados. — Campanas móviles neumáticas. — Campana corrediza equilibrada. — Cajones de fábrica. — Cajones de hormigón armado *construïdos in situ*. — Cajones flotables de hormigón armado. — Conclusiones sobre los cajones de hormigón armado. — Lanzamiento de los cajones flotables. — Colocación de los cajones. — Hincas de los tubos o cajones. — Construcción del macizo de cimientos. — División de los cajones en pisos. — Ejecución del relleno. — Empalmes de los cajones adosados. — Accidentes en la hincas de los cajones. — Precauciones para el trabajo en aire comprimido.

Desde su invención por el ingeniero francés Triger, este procedimiento ha sufrido sucesivas modificaciones y perfeccionamientos en el sinnúmero de cimentaciones en que se ha aplicado (1).

La enumeración de lo que se ha hecho desde entonces se encuentra en multitud de libros (2).

Pero lo que más nos interesa es la descripción de lo que *se hace hoy*, prescindiendo de lo que *no debe ya hacerse*.

(1) En el cap. III, pág. 50, reseñamos el principio de este procedimiento de cimentación, y en el cap. VII, pág. 133, describimos las esclusas, maquinaria, etc., que se emplean en el aire comprimido.

(2) Puede verse con detalle esta reseña histórica en el *Traité de Ponts*, de Croizette-Desnoyers, tomo I; en el *Chaix-Traité des Ponts en Maçonnerie*, primera parte, tomo II.

Cimientos tubulares.— Cuando se trata de puentes relativamente ligeros, constituidos por tramos metálicos, pueden aún emplearse los cimientos tubulares, constituyendo los apoyos por dos tubos en eje de las vigas principales.

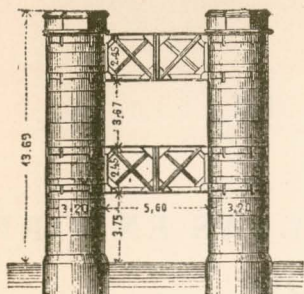


Fig. 140.

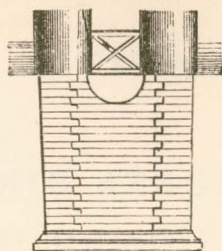


Fig. 141.

cimientos (fig. 141) por encima de aguas bajas, disposición que parece preferible y más económica en algunos casos.

Durante mucho tiempo estas cimentaciones se ejecutaron con tubos de fundición de 3 a 4 cm. de grueso unidos por bridas.

Hoy se prefiere construir los tubos con anillos de chapas de palastro, de unos 10 mm. de espesor, que son más ligeros y baratos que aquéllos.

Cada anillo está formado por varias chapas, roblonados, según la generatriz, con altura de 1,50 a 2 m. Se enlazan los anillos entre sí con hierros en T, roblonados a los dos extremos por el interior, para que no entorpezcan la hinca.

El diámetro de los tubos suele ser de unos 2 m., y si la presión sobre el terreno fuera excesiva, se ensanchan los tubos en la parte inferior (fig. 142).

Las esclusas y chimeneas son análogas a las descritas en el capítulo VII.

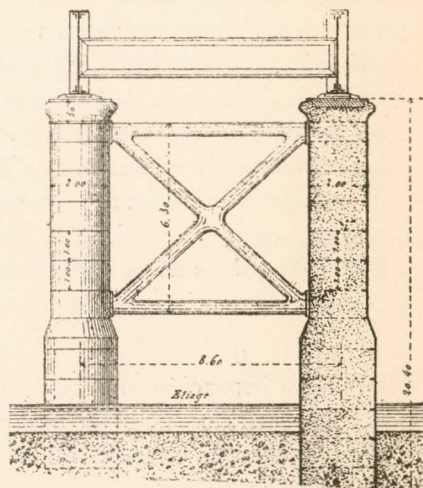


Fig. 142.

La cámara de trabajo es el tubo inferior. El contrapeso es el hormigón que se va vertiendo y apisonando en seco, a medida de la hinca, en el hueco comprendido entre el tubo y la chimenea (figura 143).

Una vez que el tubo ha alcanzado la hinca necesaria, se rellena con hormigón la cámara de trabajo y la chimenea, cuyo palastro refuerza la resistencia de la fábrica. Así es que no hay peligro en que por oxidación vaya desapareciendo el hierro del tubo exterior; el hormigón y la chimenea deben bastarse para resistir el peso de los tramos cargados. Ello no obsta para que antes de su hinca convenga alquitranar la superficie exterior de los tubos. Cuando la altura de los tubos por encima del terreno exceda de 4 m., conviene arriostrarlos entre sí, por medio de un entramado metálico (figuras 140, 141 y 142), que se unen a los tubos por orejas previamente preparadas.

Sin embargo, en algunos puentes, como el de Burdeos y otros españoles, no se han arriostrado estos tubos, por considerar que el peso de los tramos que sobre ellos se apoyan, basta para mantenerlos fijos.

Inconvenientes de los cimientos tubulares.—Son los siguientes:

1.º Es difícil de hincarlos verticalmente, y muy laboriosas las operaciones necesarias para corregir los desplomes que a menudo se presentan.

2.º Su peso propio es insuficiente algunas veces para vencer la adherencia lateral del terreno a la gran superficie de los tubos, lo que obliga a cargarlos con lastre suplementario.

3.º Las cámaras de trabajo son pequeñas, lo que dificulta todas las operaciones.

4.º Hay que ejecutar en dos veces la cimentación de cada apoyo, lo que retrasa y encarece el coste del metro cúbico de cemento.

La única ventaja que pueden ofrecer estas fundaciones es la reducción del volumen de cemento al indispensable para las cargas transmitidas por cada una de las vigas principales.

Resulta de aquí que cuando, como ocurre en los puentes de una sola vía, la distancia entre aquellas vigas sea inferior a 3,50 m., es preferible sustituir la cimentación doble a que obligan los tubos

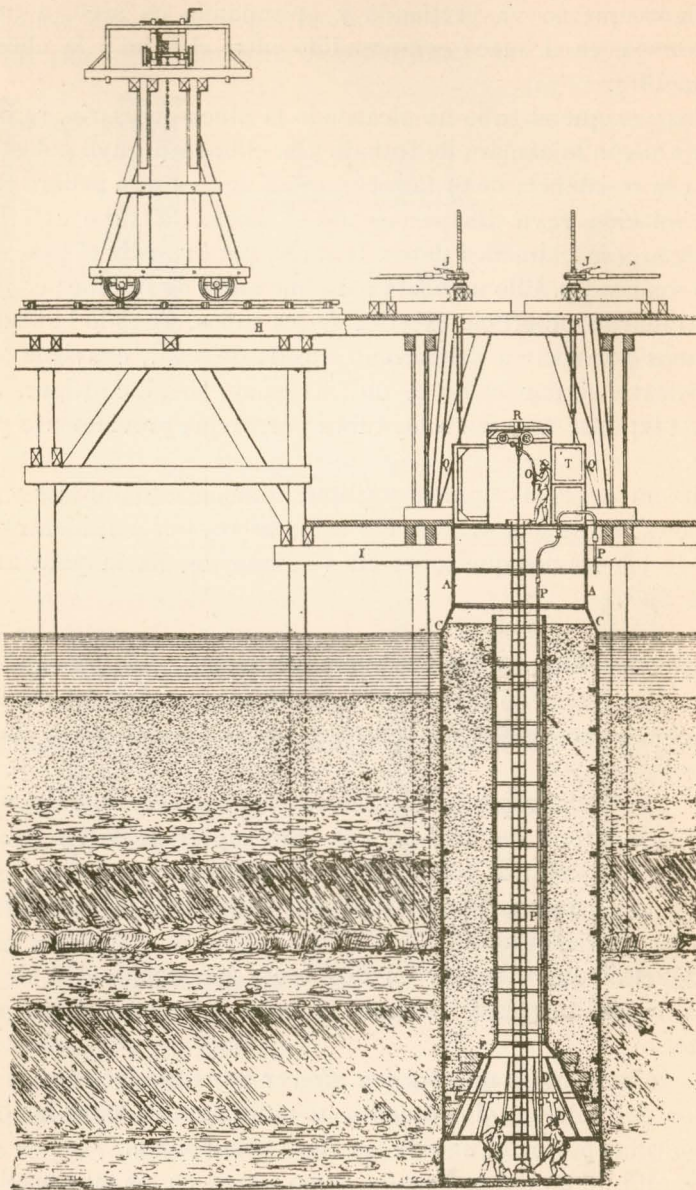


Fig. 143. Hincia de los tubos del puente de Argenteuil.

por un trabajo único en un cajón, cuya planta envuelva el perímetro de aquéllos. El pequeño aumento de excavación y relleno estará compensado por el ahorro de tiempo, fuerza, mano de obra y falsas maniobras.

Para puentes de fábrica u hormigón armado en arco inferior no sirven las cimentaciones tubulares; hay que emplear cajones.

Cajones de madera. — En América se han construido muchos cajones de madera para la cimentación por aire comprimido de importantes puentes (1).

Unas veces los cajones se construyen enteramente de madera, como se hizo para los estribos del gran puente de Brooklyn, en el que tenían las extraordinarias dimensiones en planta de 52×32 m. y en sección la representada por la figura 144. Se consiguió su impermeabilidad con un profundo calafateo.

Pero casi siempre la madera sólo constituye las paredes y techo de la cámara de trabajo (fig. 145). Se consoli-

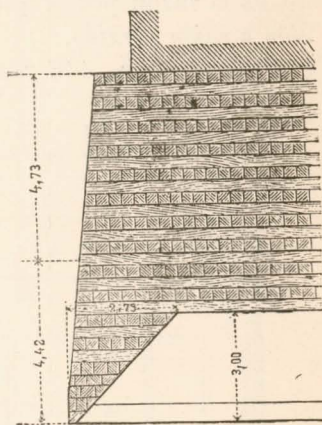


Fig. 144. Cajón del puente de Brooklyn.

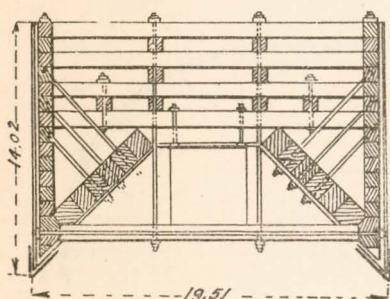


Fig. 145. Cajón Morrisson.

da e impermeabiliza el cajón, relleno los espacios libres con hormigón bien apisonado (puente de Plattsmouth, ingeniero Morrisson).

Éstos cajones son fáciles de construir y transportar por flotación al sitio de empleo, y económicos allí donde la madera es barata.

Pero su escaso peso dificulta la hinca, lo que obliga a veces a operar ésta por brucos vaciados

(1) Se puede consultar sobre estas aplicaciones el libro de M. Le Rond *Les Travaux publics de l'Amérique du Nord*.

tipo corrientemente empleado para la cimentación de pilas de puentes.

El paramento exterior de palastro, de 6 a 10 mm. de grueso, forma el cuchillo cortante en su base, a cuyo efecto va reforzada la chapa con otra suplementaria de 10 a 20 mm. en una altura de 20 a 50 cm.

El techo en la cámara de trabajo es también de palastro, de 6 a 10 m., y va sostenido por viguetas armadas transversales a distancias de 1 a 1,20 metros, cosidas por su cabeza inferior al palastro del techo y a unas ménsulas de hierros angulares (fig. 147), roblonadas al palastro vertical del cajón.

Estas ménsulas se disponen en los extremos curvos de los cajones, según la dirección de los radios.

Para los cimientos de los estribos y para evitar volúmenes inútiles o ángulos entrantes en los cajones, pueden subdividirse, como se ha hecho, por ejemplo, en el puente Morand, sobre el Ródano, en Lyon, según se aprecia en la planta de una pila y de un estribo (fig. 148).

A la cámara de trabajo suele dársele 1,90 m. de altura, que es la necesaria para la cómoda permanencia y movimientos de los operarios; pero en terrenos fangosos, en los que se hinca por su peso propio una parte del cuchillo cortante, debe elevarse a 2,40 ó 2,60 m. la altura de la cámara.

Por encima del techo hay que prolongar las paredes de los cajones metálicos con las chapas necesarias para que su

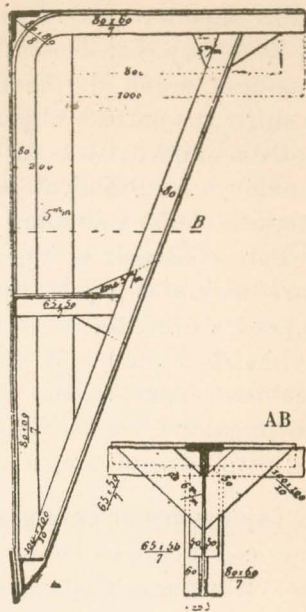


Fig. 147.

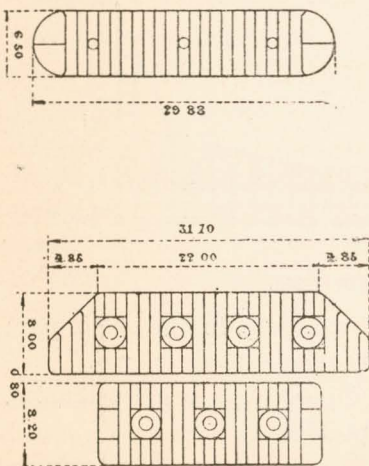


Fig. 148.

borde superior quede siempre por encima del nivel del agua.

Ésas chapas se denominan *alzas*, y son de palastro de 3 a 5 mm. de grueso, según el rozamiento y el empuje que se suponga han de sufrir sus paredes al penetrar en el terreno.

Cada anillo de alzas suele tener un metro de altura, y se refuerza la unión o recubrimiento de las juntas horizontales con angulares interiores de 50 a 60 mm.

Para conseguir la impermeabilidad de las alzas, se interponen entre sus juntas papel o fieltros alquitranados, fuertemente apretado por los tornillos.

Las alzas que han de quedar dentro del terreno se pierden y son recubiertas por el relleno; las que han de quedar fuera del agua, pueden rescatarse por medio de buzos, para utilizarlas en otros cajones; pero hay que prepararlas entonces a ese efecto.

Cajones metálicos de grandes dimensiones.—Se construyen los cajones con las dimensiones que más convenga para la hinca, y ya hemos visto que en algunos estribos se subdividen en dos o más partes.

Pero hay ciertas construcciones, como, por ejemplo, los diques de carena, en las que el cemento debe ser impermeable, reduciéndose entonces al límite el número de juntas.

Ya en los diques de Saigón (1) y en el de Missiessy (Toulon) (2) se habían alcanzado dimensiones en planta para cada cajón de

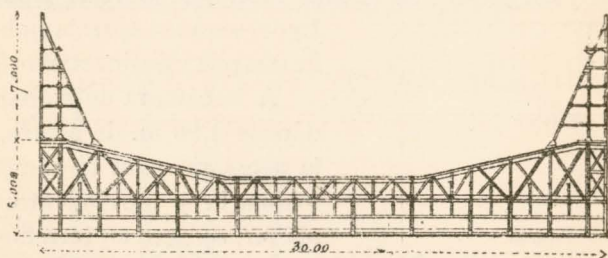


Fig. 149. Cajón del dique de Saigón.

83 × 30 m. y 144 × 41,30 m., respectivamente, lo que exigió para ellos pesos respectivos de 1.900 y 2.500 toneladas de hierro.

El dique de Saigón se ha construido con dos cajones iguales, cuya sección se representa en la figura 149.

(1) Cajón de Saigón: *Nouvelles Annales de la Construction*, enero de 1886.

(2) Detalles en los *Annales des Ponts et Chaussées*, año 1899.

Cada uno de ellos está dividido en 10 compartimentos de $30 \times 8,30$ m., por fuertes vigas transversales. En cada compartimento se efectúa el trabajo por una esclusa grande para los operarios y dos más pequeñas para la entrada del hormigón.

La extracción de los productos arenosos se hizo mezclándolos con agua y expulsándolos por tubos con agua a presión.

Los dos cajones se cerraron por sus extremos con puertas metálicas provisionales, que se desmontaron después de terminado el dique. Se fondearon sus extremos inmediatos a 1,50 m. de distancia, rellenándose el hueco mediante ataguías metálicas previamente preparadas.

Recientemente se ha construído en el puerto de El Havre, para un dique de carena en aquel puerto, el cajón metálico más colosal que se conoce, para una capacidad interior de 312×38 m., con un calado de 13,50 m. (fig. 150).

La estructura del *cajón único* empleado para el cimiento de este dique, con una superficie de 360×60 , estaba constituída por 44 vigas transversales, tipo Warren, de 6,40 m. de altura, a 8 m. de distancia, que lo dividen en 43 compartimentos de 40×8 ; dichas vigas están arriostradas por otras de igual altura y tipo, a 11 m. de distancia en la parte central y a 6,70 en los tramos extremos.

Toda esta cuadrícula de vigas y sus techos se envolvieron en hormigón, constituyendo así 215 cámaras de trabajo independientes con sus correspondientes esclusas neumáticas.

El peso total del cajón, con sus alzas y la ataguía de la puerta, alcanzó 46.500 toneladas, de las que 6.500 corresponden a la parte metálica y 40.000 al hormigón de refuerzo.

Según luego veremos, se construyó el cajón metálico en un varadero preparado al efecto y se trasladó flotando a su emplazamiento.

En la figura 150 se representan varias posiciones del cajón, a medida que va cargándose, hasta su fondeo sobre el terreno previamente dragado,

El trabajo por aire comprimido se limitó al relleno de las cámaras de trabajo (1).

(1) Pueden verse más detalles de esta grandiosa obra en nuestro artículo de la *Revista de Obras Públicas* de 15 de diciembre de 1924, y en el *Genie civil* de 26 de abril de 1924.

Pero no parece dudoso que todos estos colosales cajones metálicos hubieran podido sustituirse con una gran economía por otros similares de hormigón armado, como los que proyectamos para el dique de Cádiz, que describimos en el capítulo siguiente.

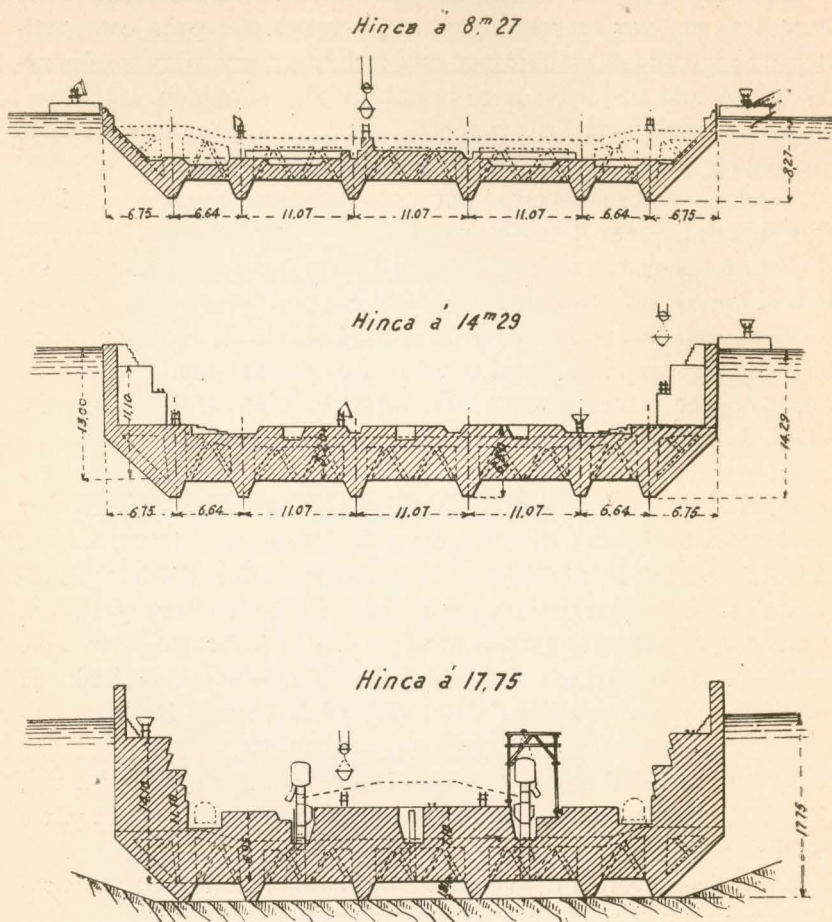


Fig. 150. Cajón del dique de El Havre.

Pesos de los cajones metálicos. — Sejourné ha dado la siguiente fórmula para hallar el peso del cajón:

$$\pi = 280 p + 130 s.$$

Siendo π el peso del cajón en kilogramos, p el perímetro y s la superficie de la planta en metros cuadrados. Esta fórmula sólo parece aplicable para cajones de pequeñas dimensiones y altura.

El ingeniero italiano Sr. Pozzi dedujo de unas cimentaciones en el Pó, de 20 a 26 m. de profundidad, la fórmula:

$$\pi = 650 p + 160 s.$$

En estas fórmulas no se tiene en cuenta el peso de la envolvente de alzas, que es de 30 a 35 kg. por metro cuadrado, y que puede o no quedar también perdida.

En todo caso sólo podrán servir dichas fórmulas para apreciar el peso aproximado de los cajones metálicos de tipos corrientes para estribos y pilas de puentes.

Tratándose de cajones de dimensiones excepcionales, como los que acabamos de describir, las fórmulas anteriores dan pesos muy inferiores a los que resultan necesarios por exigencias constructivas.

Cajones metálicos colgados. — Con objeto de evitar la pérdida considerable de hierro que ocasiona el empleo de los cajones perdidos, han imaginado los ingenieros disposiciones varias, entre las que reseñaremos las más originales.

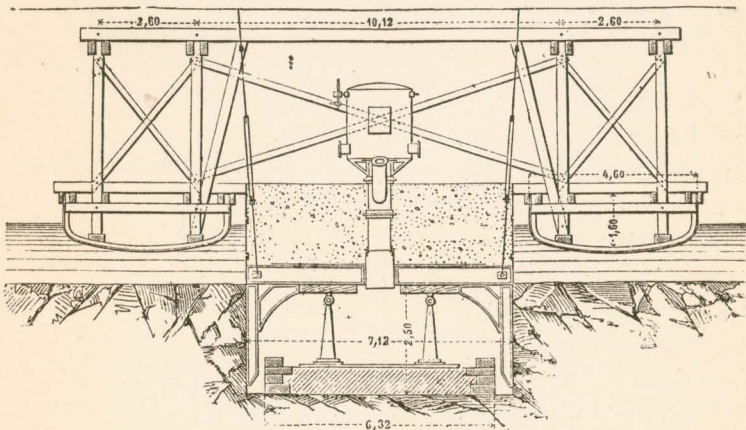


Fig. 151. Cajón colgado Montagnier.

El ingeniero Montagnier empleó un cajón móvil (fig. 151) colgado de un andamio, sobre gabarras, por medio de 8 gatos (1).

(1) Pueden verse detalles de este cajón y de sus aplicaciones en los *Annales des Ponts et Chaussées*, 1881, primer semestre, en un artículo «Caisson-Batardeau divisible et amovible», par M. Siebaux

El cajón se hinca por una sobrecarga adicional de arena y lingotes, vertida sobre el techo, que puede graduarse a voluntad.

Una vez alcanzado el fondo, se principia el relleno, y para levantar el cajón se maniobran los gatos superiores y se ayuda con otros tantos gatos, apoyados sobre la fábrica.

Claro es que la adherencia del terreno a las paredes del cajón, que puede ser muy considerable (hasta de 2.700 kg. por metro cuadrado), limita el empleo de este tipo de cajón, que, como se ve, es sólo utilizable para las cimentaciones de menores dimensiones que las del cajón.

Se ha empleado con éxito este cajón móvil para la ejecución de grandes soleras continuas de hormigón por debajo del agua; entre otros, merece citarse el de la presa de Jouage (1).

Después de dragado hasta el terreno firme, la operación se

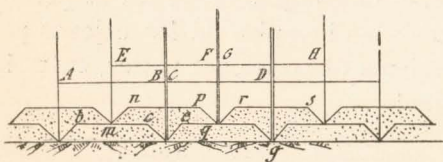


Fig. 152.

practicaba de la manera siguiente: el cajón móvil, transportado por un carro sobre un andamio, se dejaba posar en *A B* (fig. 152); se vertía la capa trapecial *b c* de 0,50 m. de altura;

levantábase el cajón para llevarlo a la posición *C D* para ejecutar el trapecio *e g*, y así sucesivamente.

En el segundo pase se traía el cajón a *E F*, y por medio de pequeñas ataguías en los extremos de los huecos triangulares *c e*, se agotaban éstos, se limpiaba y picaba la superficie de la primera capa y se rellenaba de hormigón, continuando con la segunda capa *m n p q*, y así sucesivamente.

Con dos cajones móviles se ejecutaron así en seis meses 11.200 m.³ de hormigón y 4.000 m.³ de mampostería, con cal de Teil, a razón de 180 kg. por m.³ de grava y arena. En los huecos triangulares se empleó portland.

Campanas móviles neumáticas. — Cuando se trata de operacio-

(1) *Construction du canal de Jouage*. Monografía del ingeniero M. Chauvin, pág. 65.—Bé-ranger, editor.—París.

En los *Annales des Ponts et Chaussées*, 1903, 4.º trimestre, hay también una interesante noticia sobre los cimientos ejecutados por cajones móviles en el dique de la Pinède, en Marsella.

nes aisladas, a pequeñas profundidades, puede utilizarse una campana neumática pequeña de un tipo análogo a la figura 114, página 141 (1).

Suspendida esta campana por un puente-grúa, o mejor aun de unas barcazas, se baja al fondo del agua, que no ha de tener altura superior a la total de la campana. Mediante dos compuertas neumáticas que se manejan como las de las esclusas antes descritas, entran y salen los operarios y materiales.

Pero si han de ejecutarse soleras de cimientos en cierta extensión, hay que dar a estas campanas mayores dimensiones.

En los puertos de Bilbao y Lisboa, la Sociedad general de Obras y Construcciones, de Bilbao, ha empleado con éxito completo la campana representada por la figura 153 (2).

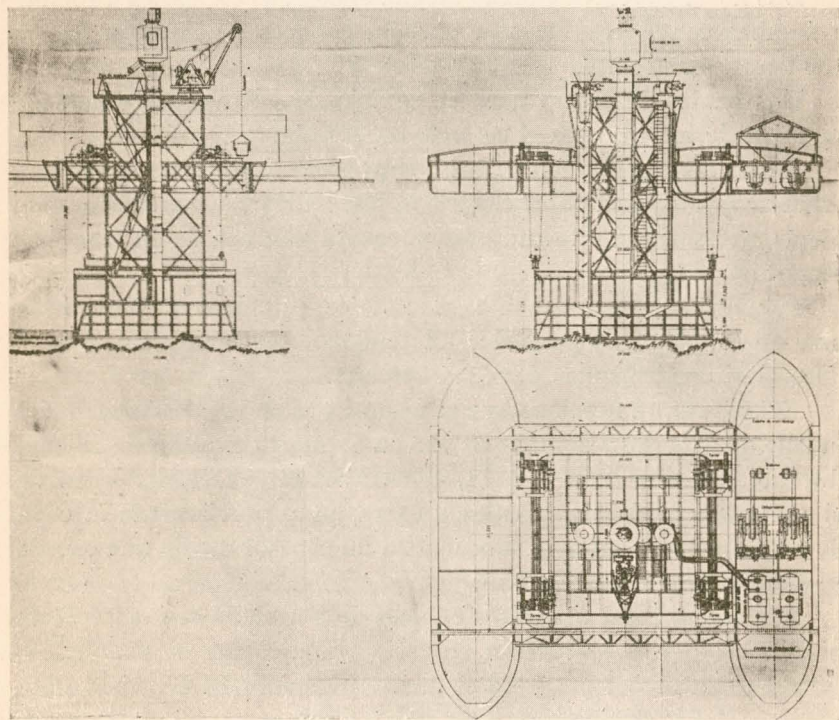


Fig. 153. Campana móvil neumática.

- (1) De la casa inglesa Siebe Gorman & Co.
- (2) Construída por La Maquinista Terrestre y Marítima, Barcelona.

Sus principales características son las siguientes:

Cámara de trabajo: de 12×11 m. y 2,50 m. de altura, siendo la altura de la cámara de equilibrio de 1,80 m.; tiene tres chimeneas de 1 m. de diámetro, con sus esclusas, escaleras y maquinillas de extracción, todo dispuesto para trabajar a 15 m. de profundidad. Dos vigas de acero con sus aparatos de enganche, para suspender la campana de las gabarras gemelas que se ven en la figura.

En la parte alta tiene una grúa eléctrica propia para pesos de una tonelada, con su motor eléctrico.

En una de las gabarras están instalados dos compresores, capaces cada uno de aspirar 450 m.³ de aire libre por hora y comprimido a 1,80 atmósferas, con sus correas de transmisión, etc.

Dos hormigoneras de plano inclinado con sus esclusas y tubería; 5 bombas centrífugas de alta tensión, capaces de elevar a 30 m. 150 litros por minuto.

Dos baldes de hierro para el servicio de extracción, y cuatro, también de hierro, para el servicio de hormigón.

Tanto las bombas como los compresores y diversas máquinas están acoplados a motores eléctricos, instalados con sus líneas completas, accesorios e interruptores, y consta también de un transformador de 72 kw.

Por último, los elementos accesorios principales constan de una estufa eléctrica pequeña, un teléfono, seis arcos voltaicos y doce lámparas cerradas para la campana.

El aparato ha funcionado con pleno éxito en la construcción del muelle de atraque y zona de acceso en el puerto exterior de Bilbao, durante los años 1908 a 1911, construyendo con él el macizo de cimentación de dichos muelles y extrayendo previamente la capa de aluviones que cubre el subsuelo en un espesor medio que excede de 1 m. y llega a veces a 2 m.

El número total de metros cúbicos de hormigón eminentemente hidráulico que se ejecutaron en estos trabajos fué de 22.397.170, siendo el autor del proyecto el ilustre ingeniero D. Evaristo Churrua.

También ha trabajado en la construcción del muelle Oeste Do Santos, del puerto de Lisboa, para la construcción del cimiento de las pilas que constituyen dicho muelle, asentadas sobre terreno fan-

goso, en el que se dispuso un fondo artificial con arena y escollera, en espesores de 2 y 3 m., respectivamente (1).

Tanto en estos trabajos como en los de Bilbao, la campana dió un rendimiento sumamente satisfactorio, permitiendo ejecutar las obras con suma rapidez. En un plazo de 46 días del año 1913 se cimentaron las 20 pilas y el morro de unión de los muelles Norte y Sur de Lisboa, con un volumen de más de 3.500 m.³ de hormigón.

En casos semejantes a los descritos, y cuando se trata de constituir una fuerte solera de hormigón para cimentación de muelles, atracaderos, diques, etc., el trabajo de esta campana está indicadísimo y permite ejecutar una base perfectamente homogénea.

Campana corrediza equilibrada.— Para el asiento de los bloques artificiales que constituyen las paredes del dique Norte del Musel hubo al principio dificultades, por la irregularidad de su fondo, constituido por roca.

Se pensó entonces en enrasar horizontalmente aquel suelo con una solera de hormigón, y el ingeniero don Ventura Junquera, que dirigía aquellas obras por contrata, que el autor inspeccionaba, imaginó hacerlo con unas campanas metálicas de aire comprimido (fig. 154) (2).

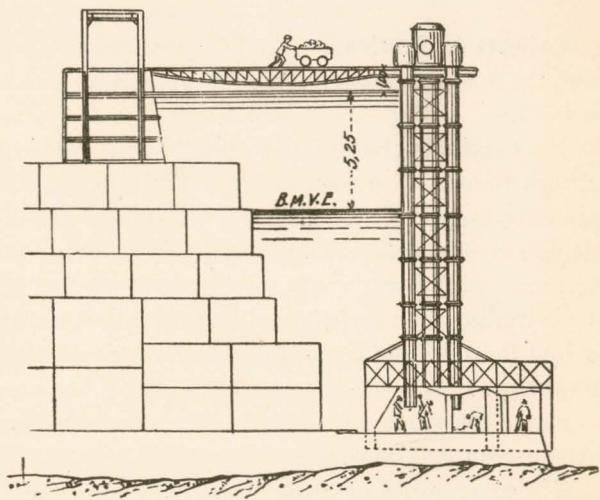


Fig. 154. Cajón corredizo del dique Norte del Musel (Gijón).

(1) La casa constructora de estas interesantes obras ha sido la Sociedad general de Obras y Construcciones, de Bilbao, cuyo director, el ingeniero D. Vicente Morales, nos ha facilitado gran número de datos. En los capítulos X y XII daremos detalles de la cimentación en estos dos muelles de Bilbao y Lisboa.

(2) Pueden verse detalles en un artículo del autor sobre esta cimentación por aire

Estas campanas avanzaban diaria y longitudinalmente por tramos de 1,50 m. por medio de gatos horizontales movidos a mano. En el día se ejecutaba la parte de cimiento contenida dentro de la campana, y a las ocho horas de terminada, este hormigón de portland tenía ya suficiente dureza para resistir el peso correspondiente del cajón y podía efectuarse su corrimiento longitudinal; quedan, pues los cajones siempre sumergidos y sólo se mueven horizontalmente sobre el enrase de cimientos por ellos ejecutado.

Este procedimiento es diferente, pero más eficaz que otros tipos de campanas móviles empleadas en el puerto de la Pallice (1) y Saint-Nazaire (2), cuyos movimientos eran ascensionales y servían para ejecutar pilares aislados que quedaban separados a unos 3 m.; en el Musel se obtenía un cimiento continuo, lo que es a todas luces preferible.

Cajones de fábrica. — Todos estos tipos de cajones móviles son complicados de manejo y sólo aplicables en algunos casos especiales.

Para reducir al mínimo la pérdida de hierro enterrado con los cajones perdidos, se pensó en construir las cámaras de trabajo y el cajón con su fábrica definitiva, limitando el empleo del hierro al cuchillo de apoyo.

Pero estos cajones no son transportables y, por tanto, su aplicación queda reducida a aquellos cimientos que puedan comenzarse por encima del nivel de agua, para poder así construir *in situ* el cajón de fábrica.

Entre los tipos de cajón de esta clase citaremos los que se consideran como clásicos.

El ilustre profesor de la Escuela de Puentes y Calzadas, de París, M. Sejourné (3), empleó en la cimentación de varias pilas del

comprimido en la *Revista de Obras Públicas* de 22 de diciembre de 1898. Se citan también estas campanas en el *Cours de Travaux Maritimes*, de Quinette de Rochemont, tomo I, página 269.

(1) Descrito en el número de abril de *Nouvelles Annales de la Construction*, de Oppermann, y en los *Annales des Ponts et Chaussées* de noviembre de 1889.

(2) *Annales des Ponts et Chaussées*, 1904, tercer trimestre.

(3) Este ingeniero eminente es el autor de los proyectos de puentes de fábrica más originales de estos tiempos y del grandioso libro *Grandes voutes*, que hemos citado en nuestro primer tomo (pág. 131).

puente de Marmande, situadas en la parte del cauce del Garona que quedaba en seco, los cajones representados por la figura 155.

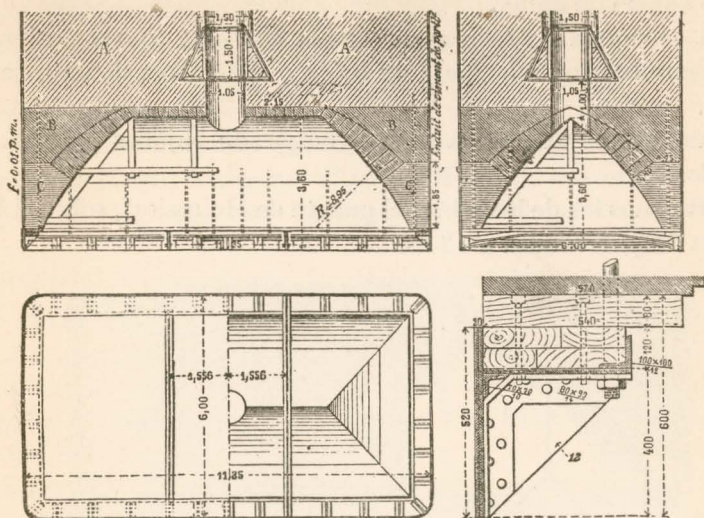


Fig. 155. Cajón de un estribo del puente de Marmande.

La planta para los cajones de las pilas era rectangular en algunas pilas y elíptica en otras; la bóveda de la cámara de trabajo era ojival.

El cuchillo, formado por chapas de palastro a ángulo recto, reforzadas con angulares y consolas a 0,80 m., sirve de platillo a tres hiladas de maderos de roble formando ménsula para sostener la bóveda de fábrica (1).

Esta se construyó con hiladas horizontales de ladrillo *CC* en una altura de 1 m., ejecutándose el resto de la bóveda *BB* con mampostería, todo ello con mortero de cemento, de 500 kg. por metro cúbico de arena.

La fábrica y el cuchillo se solidarizaron con 16 pernos de hierro.

El relleno *A* sobre la bóveda se continuó con mampostería; pero el mortero se fabricó con cal hidráulica de Teil.

(1) Pueden verse detalles interesantes de estas cimentaciones en un artículo de M. Sejourné sobre los cimientos del puente de Marmande: *Annales des Ponts et Chaussées*, 1883, primer trimestre.

Los paramentos interiores y exteriores del cajón se recubrieron con un enlucido de 3 cm. de grueso y de 650 kg. de portland por metro cúbico de arena.

La economía de hierro conseguida con este tipo de cajón fué de 38 por 100 con relación a un cajón análogo completamente metálico.

También en Alemania se han empleado cajones parecidos al anterior.

Citaremos los de las pilas del puente de Hohrsdorf, sobre el Elba (figura 156), hincados a 13 m.

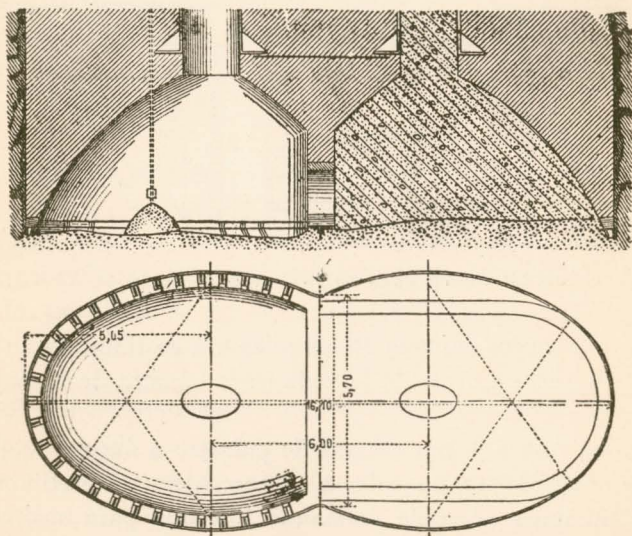


Fig. 156. Cajón del puente de Hohrsdorf.

Cajones de hormigón armado, construídos «in situ». — Los tipos de cajones de fábrica que acabamos de describir permitieron ya una economía sensible de hierro; pero puede obtenerse bastante mayor con el empleo de cajones de hormigón armado, del que en el Extranjero se han hecho pocas y tímidas aplicaciones, siendo así que el autor las emplea desde hace veinte años con éxito completo y que ese ejemplo fué seguido por muchos ingenieros del Estado y por varios constructores (1).

(1) En el número de 8 de abril de 1922 de *Le Genie Civil* publicamos un artículo sobre este tipo de cajones

Y como quiera que opinamos que hay muchas ventajas y ningún inconveniente en el empleo *exclusivo* de cajones de esta clase, aun para grandes alturas de agua, nos extenderemos con algún detalle sobre nuestros tipos de cajones, ya que con ellos hemos ejecutado 52 cimentaciones (1), sin más contratiempos que los normales en esta clase de obras.

En los primeros cajones que construimos (fig. 157), en Valencia de Don Juan (León) y puente Victoria (Madrid), nos limitamos a simplificar el empleado por M. Sejourné en el puente de Marmande.

Redujimos la importancia del cuchillo metálico y sobre él apoyamos directamente el hormigón ciclópeo, utilizando para molde exterior un delgado paramento de ladrillo.

Sustituimos las bóvedas curvas de la cámara de trabajo de aquél y los paramentos exteriores curvos y en talud por superficies planas sin talud.

Las armaduras del hormigón consistieron en barras verticales de 20 mm. atornilladas al cuchillo, que se prolongaban *en toda la altura del cimiento*, arriostradas por barras horizontales de 12 mm. cada 0,30. El techo del cajón está también armado con redondos de 12 mm. cada 0,10 m.

El hormigón se dosificó a 250 kg. portland por 800 y 400 litros

(1) En 1904. *Puente de Valencia de Don Juan*, sobre el Esla (León); 5 cimientos de pilas y estribos; cajones de 8×5 y 7,50 m. de altura, en grava hasta la arcilla dura.

En 1909. *Puente Reina Victoria* (Madrid); cuatro cajones de $9,40 \times 4,20$ y 8 m. de altura, para los dos estribos, en arena hasta la arcilla.

En 1910. Entrada del dique de carena núm. 3 en la Carraca (Cádiz); 6 cajones de 12×6 y 18 m. de profundidad, en fango pegajoso hasta la arena.

En 1911. Puente de Mora sobre el Ebro (Tarragona); 6 cimientos de pilas y estribos, con cajones de 10×4 m. y alturas variables de 10 a 19 m., en gravas hasta la arcilla.

En 1913. Puente de Amposta, sobre el Ebro (Tarragona); un cajón para un estribo de 15×8 y una hinca de 29,50 m., en arenas fangosas, hasta la grava.

En 1920. Muelle de Alfonso XII (Sevilla); 10 cajones de 10×5 m. con hincas de 6 a 8 m.

En 1923. Puente sobre el Guadalete (Cádiz); un cajón de $9,40 \times 5,50$, con hinca de 15 m.

En 1924. Puente sobre el Guadiaro (Cádiz); cinco cajones de $9,40 \times 3,60$ a profundidades de 14 a 17 m.

Estamos hincando también ocho cajones de hormigón armado para los cimientos de cuatro grandes pilas del puente de San Telmo, en Sevilla, en el Guadalquivir, y para la Compañía de los Ferrocarriles del Norte, seis cajones para un puente próximo a Játiba.

de grava y arena en los 5 m. inferiores del cajón, reduciéndose a 200 kg. la dosificación del resto del hormigón e intercalándose en él un 30 por 100 de piedras gruesas.

Por último, alisamos las superficies interiores y exteriores por una delgada capa de enlucido de mortero 1 × 3 m. portland.

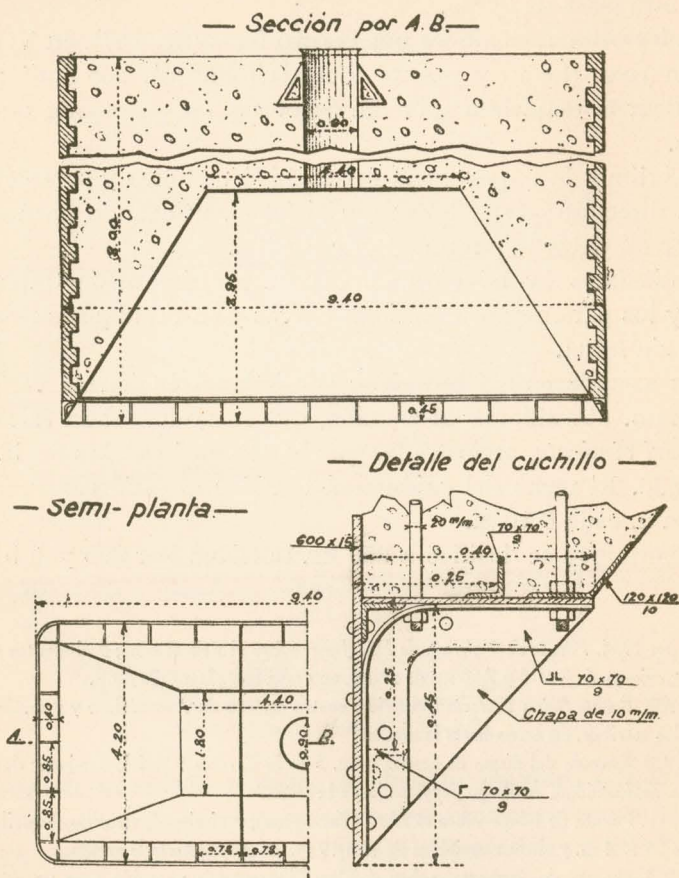


Fig. 157. Cajón del puente Victoria.

Aun nos pareció excesivo aquel cuchillo metálico, y ya, en los cajones posteriormente construídos, los suprimimos completamente, sustituyéndolos en el cajón del puente de Amposta (fig. 158) por una pequeña chapa doblada de 10 mm.

La armadura del cajón sigue sus paredes en toda la altura, para

evitar que se despeguen los cuatro pisos de 7,50 m. que se construyeron en etapas sucesivas.

Gracias a estas armaduras, cuidadosamente enlazadas entre sí, pudimos conseguir hincar este cajón sin el menor contratiempo a 29,50 m. de profundidad bajo el estiaje, *que es casi el límite máximo* que puede alcanzarse con aire comprimido.

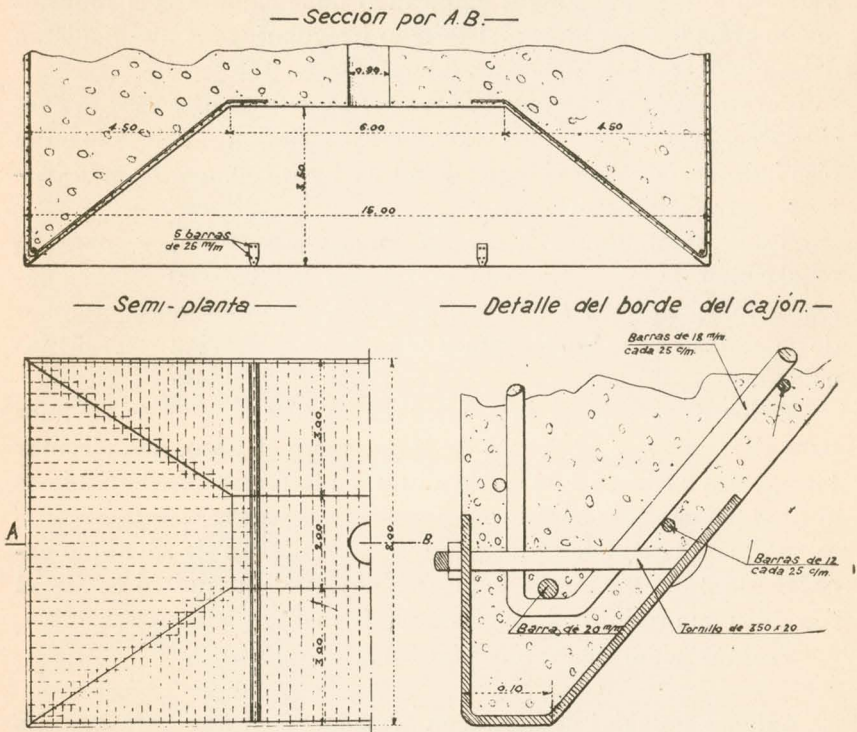


Fig. 158. Cajón del puente de Amposta.

La adherencia lateral, en un terreno de arena fangosa, era grande, y las despegaduras de los diferentes trozos hubieran podido ocasionar graves accidentes.

Como la longitud de la cámara de trabajo era de 15 m., arriostamos sus paredes mayores con dos vigas horizontales de hormigón armado; pero resultaron molestas en la hinca, y las suprimimos.

No tuvimos fugas de aire, ni filtraciones de agua, ni grietas, ni desplomes, y la hinca fué normal y regular.

Las dosificaciones de hormigones y enlucidos fueron iguales a las anteriormente citadas.

En los cajones posteriormente construídos al de Amposta suprimimos la chapa de palastro del cuchillo, que resultó también innecesaria.

Para los puentes del ferrocarril del Norte, para la doble vía de Valencia a Játiba, estamos empleando unos cajones más robustamente armados, por ofrecer el terreno irregularidades que pudieran determinar mayores presiones laterales (figs. 159 y 160).

Para reducir la adherencia del terreno, que en este caso es considerable, hemos dado a los paramentos exteriores, pero sólo en el piso inferior de cada cajón, un talud de 1 por 100, que ha sido bastante para facilitar su hinca.

En general, no es necesario mucha armadura, y para la regularidad de su hinca, son preferibles los cajones rectangulares, a los que presentan extremos curvos, según hemos comprobado en varios casos; estos últimos se inclinan y desvían con más facilidad.

Todos estos cajones se construyen *in situ*, y a veces tuvimos para ello, como en el puente de Mora, sobre el Ebro, que ejecutar terraplenes hasta de 2,50 m. de altura, en la forma que describimos al final del capítulo anterior.

Pero este artificio resulta costoso para niveles de agua que exceden de 3 m., y además reduce el desagüe, aunque se limite el terraplén con recintos de tablestacas de madera o metálicas.

Veamos cómo puede obviarse tal inconveniente.

Cajones flotables de hormigón armado. — Ni aun para grandes alturas de agua es necesario recurrir a los cajones metálicos.

De igual modo que con éstos, pueden construirse *cajones flotables de hormigón armado*, construídos en un dique de carena, si lo hubiese próximo, o en un plano inclinado o varadero establecido en una margen próxima.

Al mes de construídos se botan al agua y se transportan por el río para fondearlos en su sitio con lastre de hormigón, según explicamos al ocuparnos de los cajones «sistema indio», página 49.

Aunque hemos construído ya varios cajones de este tipo, merece especial mención los que estamos hincando en Sevilla para el puente

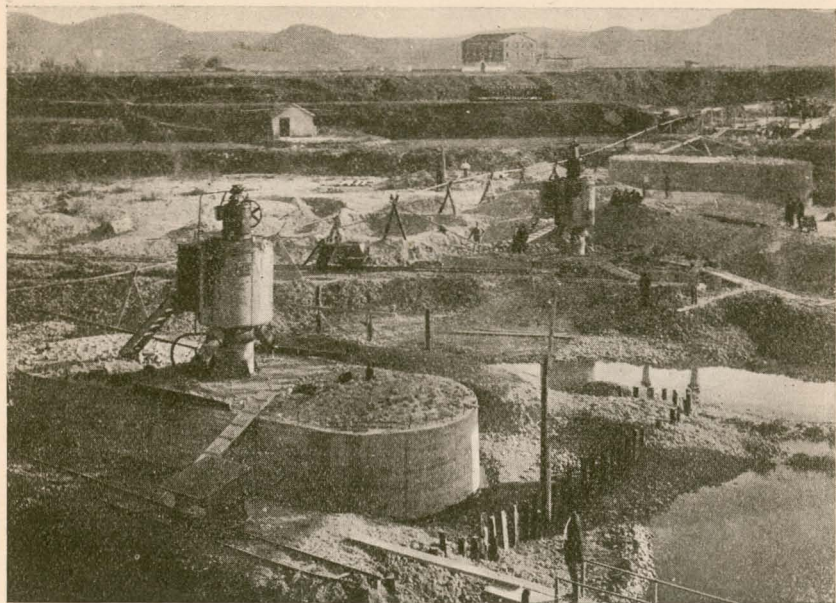


Fig. 159. Vista de la ejecución de los cimientos del puente de Montesa menor (Játiba).

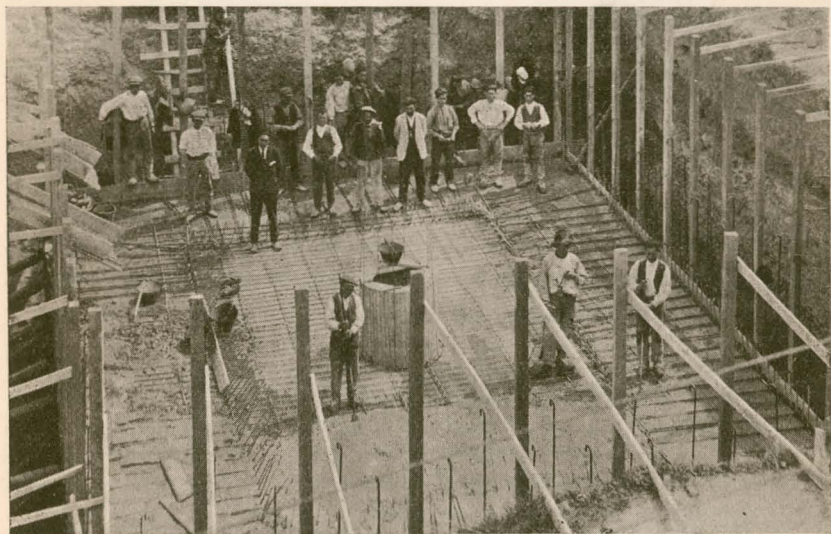


Fig. 160. Cajón de un estribo del puente de Montesa menor.

Aun así, el cajón, con sus dos esclusas montadas y con el molde exterior de madera que prolonga las paredes de hormigón armado, pesa 300 toneladas y tiene su centro de gravedad a 2,40 m. sobre el borde del cuchillo y coge un calado de 4,30 m.

Pero este calado puede disminuirse a voluntad (y es una de las originalidades de esta disposición) inyectando aire en las cámaras.

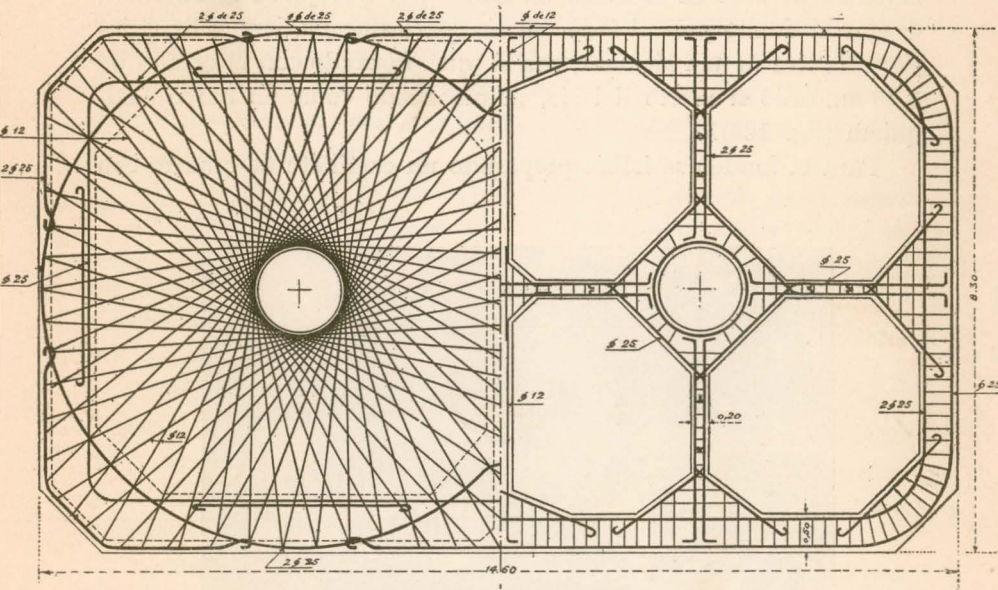


Fig. 162. Planta del cajón del puente de San Telmo.

Claro es que a medida que en ellas baja el nivel del agua, el área de la flotación interna aumenta, la altura metacéntrica disminuye y el centro de carena desciende, y, como efecto de todo esto, llega un momento en que el metacentro queda por debajo del centro de gravedad; sin embargo, aun llegado este momento, el cajón no zozobra, sino que al alcanzar una escora determinada, se escapa el aire de la cámara por debajo del cuchillo más levantado, mucho antes de que pueda embarcar agua por la borda opuesta, y automáticamente el cajón baja de calado y busca una posición estable.

Esta posición, según se deduce del cálculo y se comprobó en la práctica, resulta en nuestro caso escorada, mientras el calado no llega a los 3,20 m.; a partir de aquí, el barco adriza con una estabi-

lidad de forma tanto más marcada cuanto menor es el volumen de aire que queda en las cámaras, y, por fin, al alcanzar el calado de 3,80 m., el centro de carena monta sobre el de gravedad, sumándose a la de forma la estabilidad de peso.

Asegurada, pues, de antemano la estabilidad naval, toda la operación de la botadura se redujo a hincar por aire comprimido el cajón construido en la orilla un metro por debajo de la bajamar, dragar el fondo por el lado del río, para que pudiera salir, e inyectarle aire en una pleamar, con lo que, flotando con el calado de 3,20 m., salió al centro del río, maniobrando como un barco cualquiera (fig. 163).

Para el fondeo se había preparado un castillete de amarre con

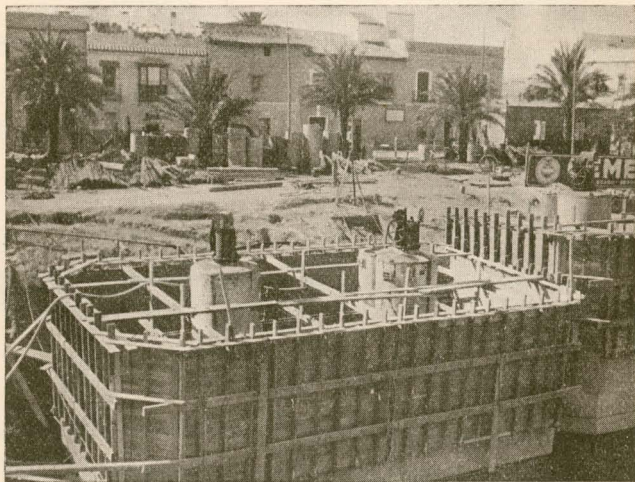


Fig. 163. Lanzamiento de un cajón del puente de San Telmo.

pilotes de madera, y en la pared del cajón se colocaron unas correderas que al ajustar contra otras del castillete, lo fijaban en la vertical de su posición definitiva; la misma corriente de la marea sujetaba el cajón contra estas correderas, y sólo con dar salida al aire, primero, y entrada al agua, después, mediante tapones preparados al efecto, el cajón fondeó con toda la suavidad y exactitud que podía desearse.

Conclusión sobre los cajones de hormigón armado. — Demuestra la posibilidad práctica de los cajones de hormigón armado para cimentar a cualquier profundidad en agua, no existe motivo alguno para enterrar en el fondo de los ríos esas enormes masas de hierro que exigen los cajones metálicos.

El hormigón armado de 300 a 350 kg. de portland que debe emplearse para las paredes y techo, adherirá perfectamente al hormigón pobre de 200 kg. del relleno, aunque se incorpore a éste un gran volumen de piedra. Las paredes verticales de hormigón rico forman una sólida armadura, como hemos dicho en el capítulo anterior, al ocuparnos de los cajones con fondo de hormigón armado, y *una coraza de todo el cimiento.*

Este será, pues, más sólido y más duradero, con un gasto menor.

Deberán, pues, emplearse cajones de hormigón armado para todos los cimientos por aire comprimido en apoyos aislados, en puentes y para la construcción de muelles, reservando el empleo de los cajones metálicos para algún caso excepcional en que fuese imposible emplear aquel material.

Creemos, sin embargo, que aun para los cimientos de grandes diques de carena, como los que reseñamos anteriormente, será práctico y ventajoso casi siempre recurrir al hormigón armado, para reducir el enorme peso de hierro que exigen los cajones enteramente metálicos.

Harán falta, claro es, disposiciones nuevas y apropiadas al problema; pero ya veremos en el capítulo siguiente, que se presta el hormigón armado a la construcción de cajones de excepcionales dimensiones.

Lanzamiento de los cajones flotables. — En páginas anteriores describimos el original procedimiento que hemos empleado para poner a flote los cajones de hormigón armado del puente de San Telmo.

Pero pueden lanzarse estos cajones mediante otras disposiciones.

El ingeniero constructor Hersent construyó los cajones metálicos de un muelle en Burdeos, sobre un carro de lanzamiento (fig. 164) que podía correr sobre unos fuertes largueros de madera con 20 por 100 de pendiente. El carro se mantenía fijo por unos cabrestantes de vapor sujetos en la orilla.

Una vez montado el cajón metálico y lastrado con hormigón en su cámara de trabajo, se hacía descender el carro por medio de los

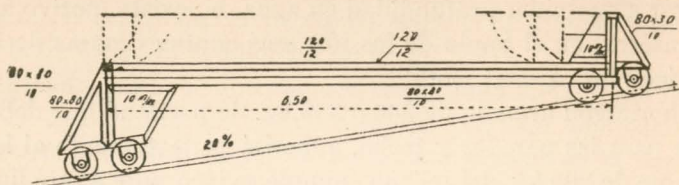


Fig. 164. Carro de lanzamiento.

cabrestantes en la hora de la pleamar, para que el cajón pudiera flotar y ser remolcado a su emplazamiento (1).

El mismo constructor modificó este procedimiento para los grandes cajones de 144×41 m., del dique de carena de Missiessy (Tolón), donde no hay mareas. Montó esos cajones en un dique seco provisional, al efecto preparado, que se comunicó después con el mar, dragando un canal por el que pudieron salir flotando los cajones.

También en el dique de El Havre se montó el cajón único, anteriormente descrito (figuras 150 y 165) sobre otro dique seco, cuya

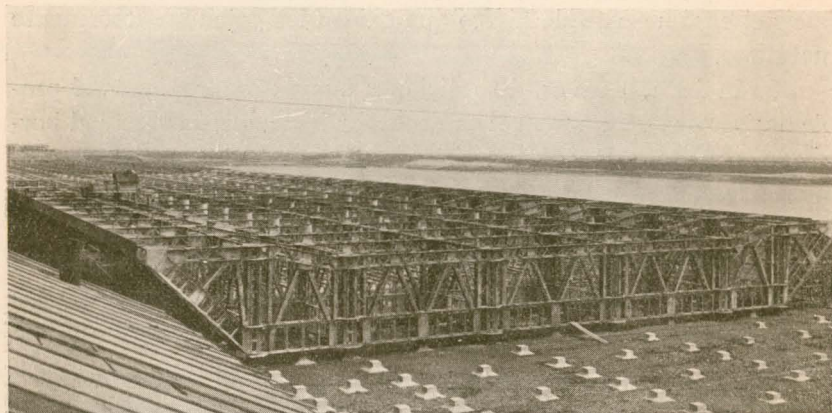


Fig. 165. Construcción del cajón del dique de El Havre.

(1) Pueden leerse detalles en los *Annales des Ponts et Chaussées*, 1896, primer semestre: «Les nouveaux quais du port de Bordeaux».

solera dragada por debajo de la bajamar, estaba circundada por un malecón-atagüa. En la solera se construyeron unos dados de hormigón armado, cimentados sobre pilotes de igual material, que servían de apoyo a los nudos de la estructura del cajón (1).

Una vez montado éste y cerrado por su extremo con una compuerta desmontable, se excavó una pared del malecón para que el mar entrara en el dique seco y permitiera flotar al cajón, que se remolcó hasta su ubicación definitiva, también previamente dragada (figura 166).

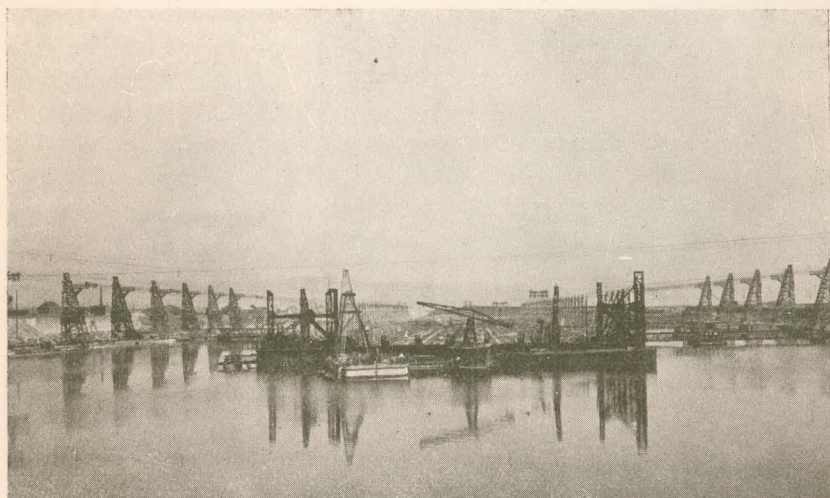


Fig. 166. Transporte del cajón del dique de El Havre.

El autor ha lanzado en San Sebastián dos cajones de hormigón armado de 25×5 m. y 7 m. de altura, preparados para su hincia por aire comprimido para el puente llamado del Kursaal.

Se fabricaron en un varadero con 12 por 100 de pendiente, en la margen izquierda del río Urumea, análogo a los que se emplean para el lanzamiento de los barcos.

Se dispusieron sobre el terreno unos largueros de hormigón armado cubiertos y reforzados por las almas de unas viguetas lami-

(1) Los detalles de estas operaciones han sido publicadas por M. G. Hersent, en el *Boletín de la Sociedad de Ingenieros civiles de Francia*, octubre a diciembre de 1921, pág. 668.

nadas de doble T, sobre las que deslizan unos picaderos de madera previamente engrasados. Sobre éstos se colocaron los moldes que sirvieron para fabricar el cajón, que se sostuvo con cables y cabrestantes.

Aprovechando las mareas equinocciales de 4,20 m. de carrera, se dejaron deslizar los cajones, que, una vez flotando, fueron remolcados a su sitio (fig. 167).

Por cierto, y no tiene desdoro el autor en referir este accidente,

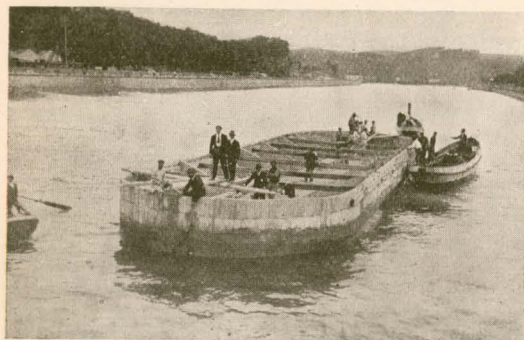


Fig. 167. Transporte de un cajón de H. A. en San Sebastián.

que por efecto de la violenta marejada que se produjo en la barra de la ría en que está situado el puente, que impidió la maniobra normal, el primer cajón fondeó de través a la corriente; y habiendo sobrevenido fortísimos golpes de mar, éstos destruyeron sus paredes, insuficientemente arriostradas para sufrir

los golpes de ariete que las olas produjeron en los huecos triangulares de los cuchillos. Así es que, en vista de los peligros que pudiera ofrecer su hinca por aire comprimido, en un emplazamiento tan combatido por el mar, los ingenieros inspectores de la obra consideraron más prudente desistir de este procedimiento de cimentación, que se sustituyó por el de agotamiento y defensa del lecho con escollera, que describimos en el capítulo XII (1).

Colocación de los cajones. — Las disposiciones a adoptar varían según que la ubicación del cajón esté en seco o debajo de un nivel de agua que exceda de 2 a 3 m.

En el primer caso, el cajón, cualquiera que sea el material de que

(1) En el capítulo X, al ocuparnos de los cajones de hormigón armado con fondo, detallaremos los procedimientos empleados para el lanzamiento de estos, análogos a los que acabamos de reseñar.

se componga, madera, hierro u hormigón, debe construirse *in situ* sobre el terreno, previamente excavado hasta el nivel de aguas bajas.

Si la altura de agua es inferior a 3 m., puede convenir, según ya dijimos al ocuparnos de los cajones hincados al aire libre (fig. 138, página 166), construir un terraplén que sustituya al terreno natural, que permita la construcción o el montaje *in situ* del cajón.

Cuando el nivel de agua no excede mucho de 3 m., y si se trata de tubos o cajones metálicos, pueden montarse éstos sobre una plataforma a poca altura sobre el agua apoyada sobre un andamio fijo de pilotes y cepos, levantado en el sitio del cimiento (fig. 168).

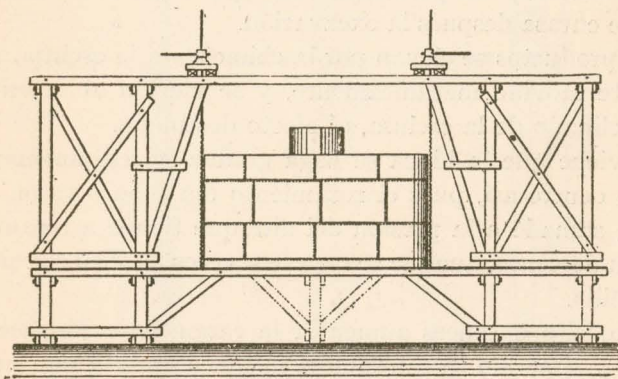


Fig. 168. Colocación de un cajón metálico.

Una vez terminado el montaje, se sostiene el tubo o el cajón con cadenas verticales, se quita el piso de la plataforma y se baja el tubo o cajón en el agua, soltando las cadenas por medio de gatos, hasta que se apoyen los cuchillos en el terreno.

Se procede entonces a lastrar el tubo o cajón, construyendo en seco la fábrica sobre el techo de la cámara de trabajo y montándose la chimenea y esclusa.

Si la altura del agua excede de 5 ó 6 metros para los cajones de madera o metálicos, o de 3 m. para los de hormigón armado, deben construirse los cajones en diques secos o varaderos, y lanzarse al agua en la forma descrita en el epígrafe anterior.

El fondeo, en su ubicación definitiva, es operación sencilla, que se guía por pilotes y cables.

Una vez allí, se recrecen las paredes y se lastra con fábrica a medida que desciende el cajón.

Al describir anteriormente el cajón de hormigón armado del puente de San Telmo, reseñamos la facilidad con que se hacen estas operaciones.

Hinca de los tubos o cajones. — Fondeado el tubo o cajón en el terreno, se excava en seco dentro de la cámara de trabajo, merced a la introducción en ella del aire comprimido que expulsa el agua por debajo del cuchillo.

Se comienza por desmontar por debajo del cuchillo una cuneta de 20 a 30 cm., para que el peso del cajón y fábrica lo haga descender, y se enrasa después la excavación.

Los productos se elevan por la chimenea a la esclusa, por el cabrestante movido mecánicamente, y se vierten al exterior por el tubo inclinado de la esclusa, al efecto destinado.

Conviene que la hinca se haga gradual y lentamente; pero no siempre ocurre así, pues el rozamiento del tubo o cajón contra el terreno, sumado a la presión del aire que tiende a levantarlo, impiden su descenso, aunque se excave a veces 30 y 40 cm. por debajo del cuchillo.

Es preciso entonces aumentar la carga del cajón, elevando la fábrica, y si así no se consiguiera la hinca, habría que suprimir la contrapresión hacia arriba del aire comprimido, dejándolo escapar con rapidez de la cámara de trabajo, después de la salida de los operarios, para que el brusco cambio de presión contribuya a vencer la adherencia del terreno; pero esta operación debe realizarse con las debidas precauciones, y sólo en pequeños descensos, para evitar la rotura del cajón.

Cuando los cajones son muy grandes, puede excavarlos mecánicamente.

En el primer gran puente de Kehl, en Colonia, sobre el Rhin, se emplearon para ello (figuras 169 y 170) unas dragas de rosario que se movían dentro de tubos, o, mejor dicho, pozos, que atravesaban toda la altura del cajón, cuyo borde inferior quedaba siempre algo más bajo que el cuchillo de la cámara, y dentro de cuyo pozo el agua quedaba al nivel del río. Los operarios excavaban el terreno y lo empujaban debajo del pozo, donde los cangilones de la draga de rosario los recogían y elevaban.

En el puente de Brooklyn se emplearon también pozos, pero la

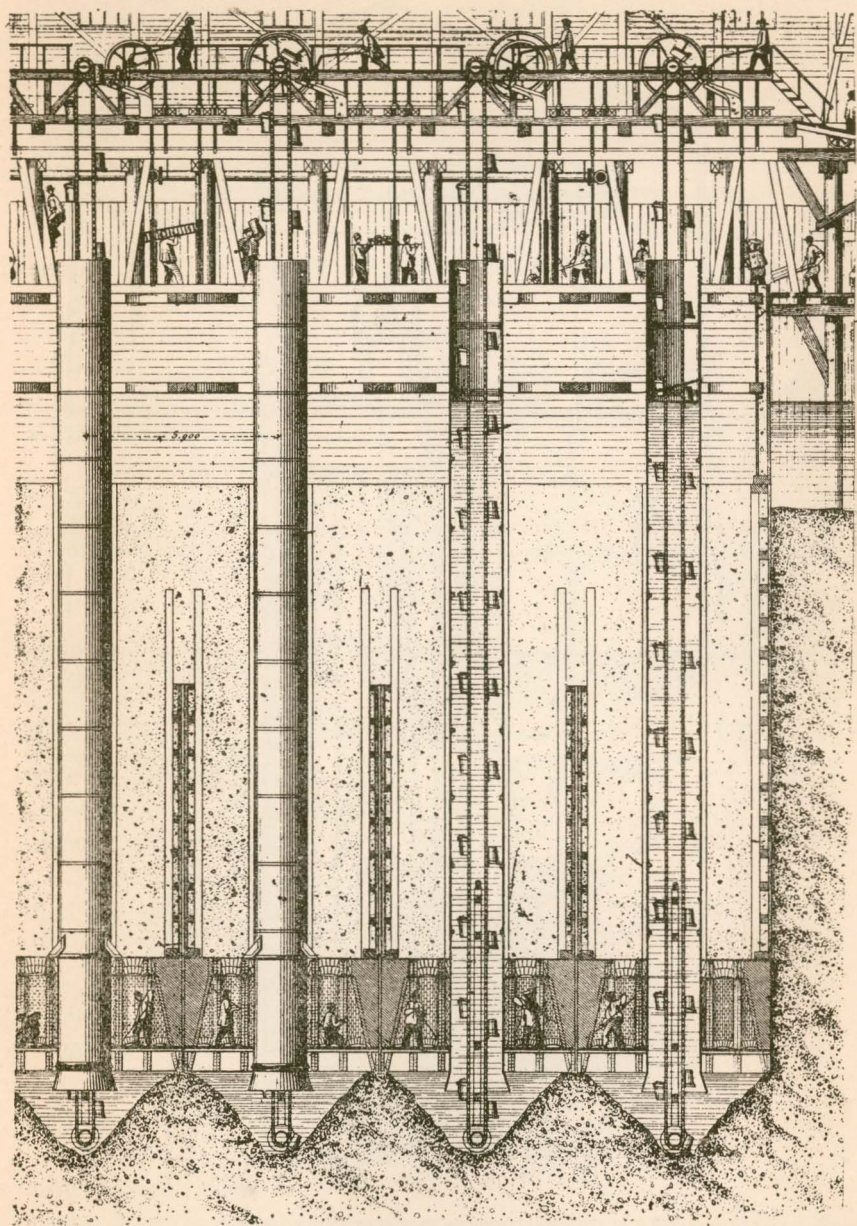


Fig. 169. Cajón del puente de Kehl. (Hinca por dragado.)

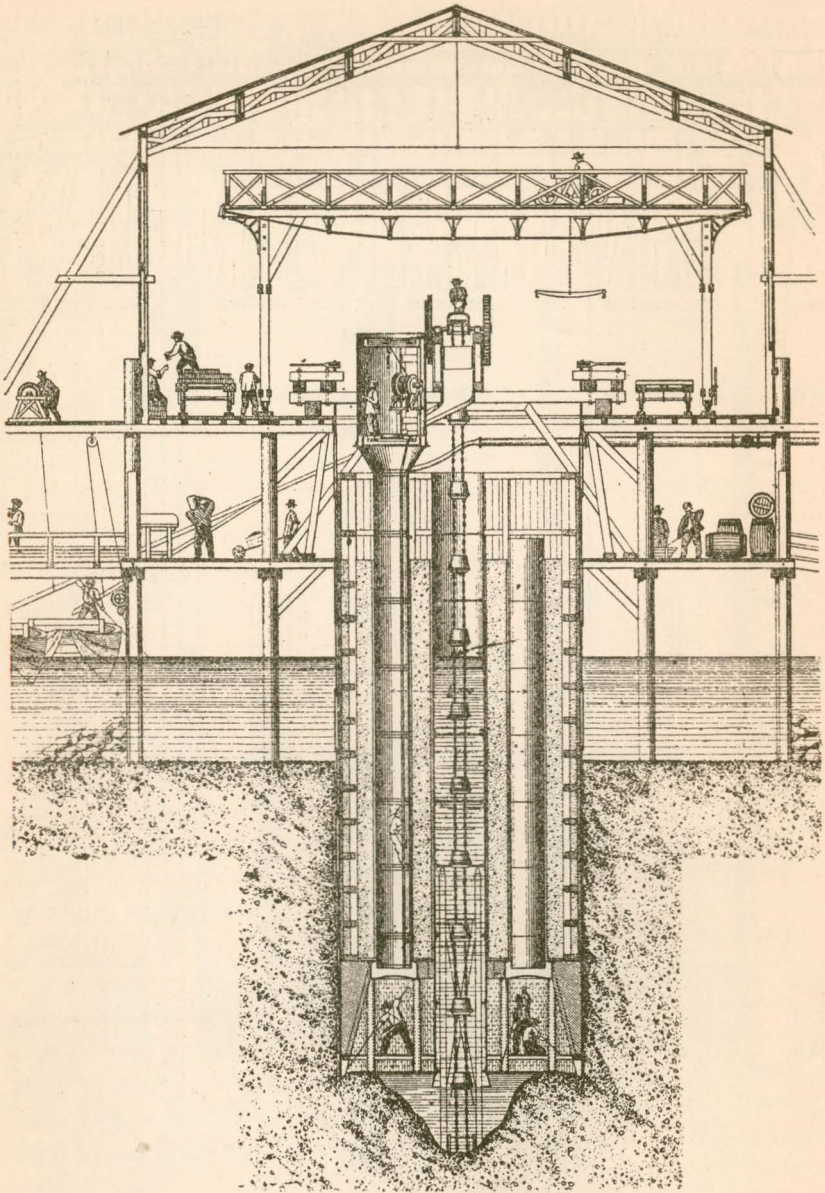


Fig. 170. Cajón del puente de Kehl. (Sección transversal.)

extracción se hizo con dragas Priestmann; en el puente del Forth se recurrió a palas hidráulicas.

En otros casos se han utilizado bombas chupadoras, inyectoros y sifones; este último aparato es necesario cuando, a causa de la impermeabilidad del suelo, el agua expulsada por el aire comprimido no puede ser desalojada de la cámara de trabajo (tubo P P, fig. 143).

Ocurre a veces que la inclinación del terreno firme es muy acentuada y dificulta considerablemente el descenso vertical del cajón, lo que obliga a imaginar procedimientos auxiliares.

Así, por ejemplo, en el famoso puente del Forth, algunos de los cajones encontraron la roca en la forma representada por las figuras 171 y 172.

Decidieron los constructores enrasar provisionalmente el terreno con un macizo de sección triangular con sacos de arena, sobre el que pudiera apoyarse una gran parte del cuchillo del cajón, al mismo tiempo que por el resto de sus bordes quedaba detenido por la roca.

Para mayor seguridad, se intercalaron entre los sacos de arena dos pilas de sacos de cemento y cuatro fuertes vigas de madera, sobre las que se apoyaba directamente el cuchillo.

A medida que los obreros, dentro de la cámara de trabajo, rebajaban la roca por medio de barrenos, y que por allí podía descender el cajón, otros operarios iban rebajando las

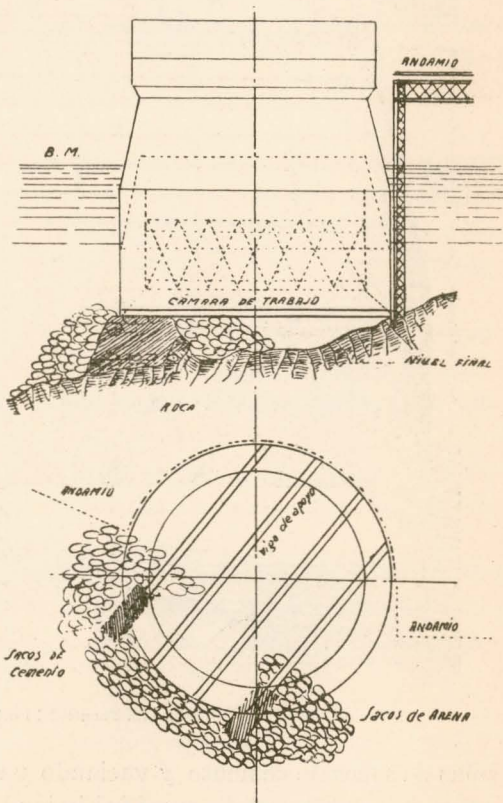


Fig. 171. Puente del Forth.

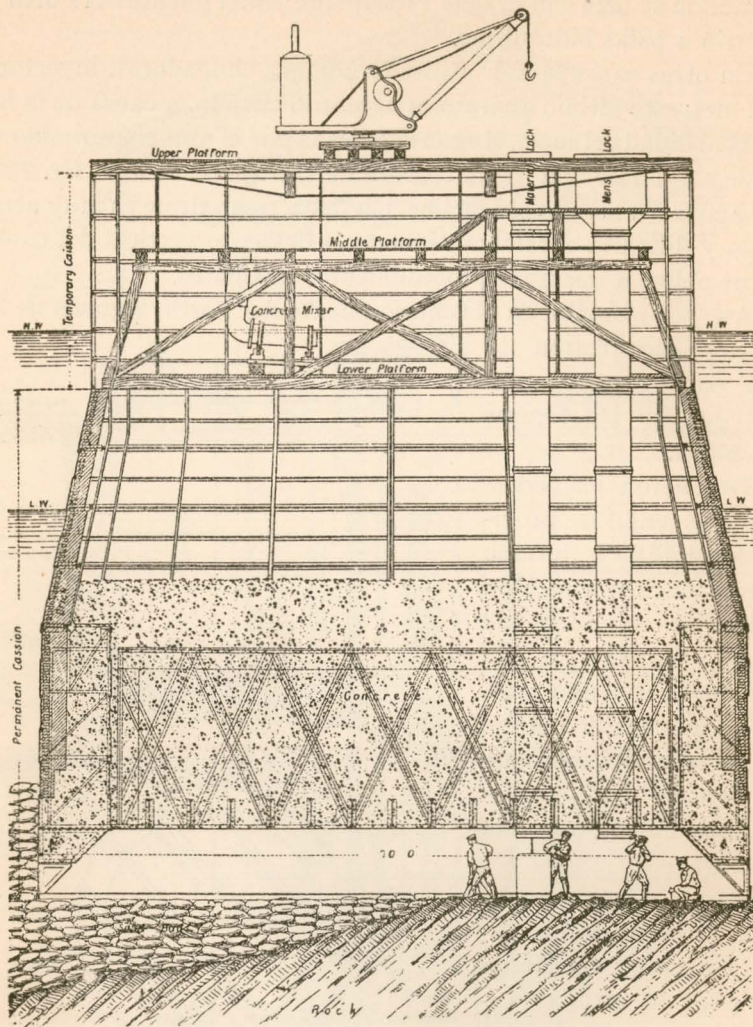


Fig. 172. Puente del Forth.

pilas de sacos de cemento y vaciando paulatinamente los sacos de arena que las envolvía, y así fué bajando horizontalmente el cajón hasta el nivel definitivo (1).

(1) En el número de 28 de febrero de 1890, la revista *Engineering* ha publicado extensamente los detalles constructivos de esta grandiosa obra.

Construcción del macizo del cimientó. — Cuando los cajones son metálicos, con objeto de no perder las chapas de palastro de las alzas y los tubos de la chimenea, se distancian las fábricas que se construyen a unos 10 cm. de los palastros, operación que debe practicarse con buzos, como se hizo en el puente de Kehl, antes citado. (figura 173).

Esto obliga a construir un paramento liso, cuyo aumento de gasto en mano de obra no compensa siempre la utilización sucesiva de alzas y tubos.

En los cajones de fábrica u hormigón en que no hay alzas, se levantan las fábricas con sus paramentos definitivos, empleando la mampostería cuando ésta resulta bastante más barata que el hormigón ciclópeo, que es la fábrica que generalmente preferimos, porque la reducción de su mano de obra y la mayor rapidez de ejecución compensan el aumento de cemento (1).

Los morteros de la mampostería deben ser de 200 kg. de cemento por metro cúbico de arena; los hormigones, de 150 kg. portland por 800 y 400 litros de piedra y arena, respectivamente. Las paredes deben todas enlucirse con delgadas capas de mortero de 400 kg. de cemento portland por metro cúbico de arena.

Hemos empleado siempre cementos portland por parecernos más seguros, y en España, al menos, resultan tan económicos como cualquier otro aglomerante, que exige mayor dosificación para conseguir igual resistencia.

En macizos de hormigón pueden sustituirse los moldes exteriores e interiores con tabiques de ladrillo de media asta o de pandere, que se dejan incorporados a la masa.

Cuando los macizos se construyen de hormigón, se dejan en ellos los huecos correspondientes a las chimeneas, y no empleamos mas que un tubo de palastro de 1 m. de longitud unido directamente a la esclusa.

Sujetamos este pequeño trozo de chimenea al hormigón del cajón por medio de unos 12 a 15 ganchos de redondos de 18 a 20 mm.

(1) Recordamos a este propósito que los hormigones ciclópeos son tan resistentes como los ordinarios y menos permeables, por lo que, cuando la índole de la obra lo permita, como en estos macizos, resulta estéril el aumento de gasto de cemento que ocasiona el hormigón ordinario.

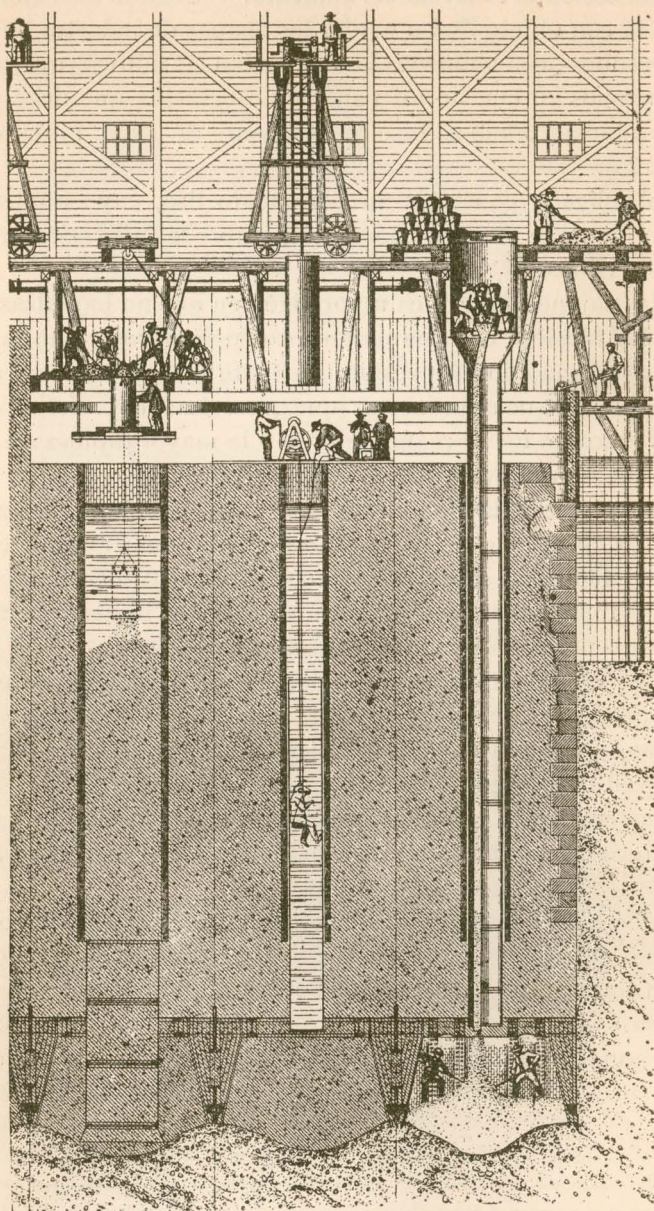


Fig. 173. Cajón del puente de Kehl. (Relleno y desmontado de chimenea.)

inclinados a unos 45° dentro del hormigón y atados a la brida inferior de la chimenea por otros tantos tornillos. Cuando se levanta la esclusa se saca también el tubo de 1 m. De ésta manera evitamos las chimeneas largas de palastro.

División de los cajones en pisos. — Si la altura total del cimiento excede de 8 m., conviene subdividir la construcción del cajón en varias etapas y pisos.

Claro es que entonces hay que levantar y separar la esclusa para elevar cada piso de cajón. En el puente de Amposta ya vimos que para 29,50 m. de altura construimos el cajón en cuatro pisos, lo que no ofreció inconveniente.

Pero en estos casos *es indispensable* a asegurarse de la perfecta unión de unos pisos con otros, no sólo dejando muy irregular y con piedras salientes la superficie superior de cada piso, sino enganchando las barras verticales de las armaduras de cada piso.

Por no adoptar estas precauciones han ocurrido despegamientos de unos pisos con otros, con accidentes graves algunas veces y siempre difíciles y costosos de reparar.

Ejecución del relleno. — Una vez alcanzado con el cajón el terreno que se desea, se procede al relleno de la cámara de trabajo y de la chimenea, operación que se hace también con aire comprimido (fig. 173).

Generalmente se ejecuta con hormigón pobre, en el que se intercalan bloques y mampuestos para reducir su coste y activar al mismo tiempo su ejecución.

Se debe llevar el relleno por capas curvas de 20 a 40 cm., en una forma parecida a la figura 174, con objeto de evitar el apisonado horizontal debajo del techo de la cámara, que se efectúa deficientemente.

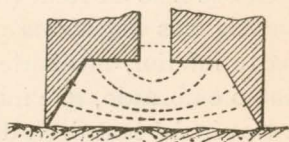


Fig. 174.

El hormigón y bloques para este relleno se arrojan a la cámara de trabajo por la hormigonera que describimos en el capítulo VII, página 133.

Algunos constructores disponen para ese trabajo unos tubos *H*,

empalmados en la primera virola de la chimenea (fig. 175), con sus correspondientes compuertas, inclinadas en sentido contrario de los tubos *T*, destinados a la expulsión de las tierras excavadas.

Otros prefieren doblar el número de esclusas y chimeneas, des-

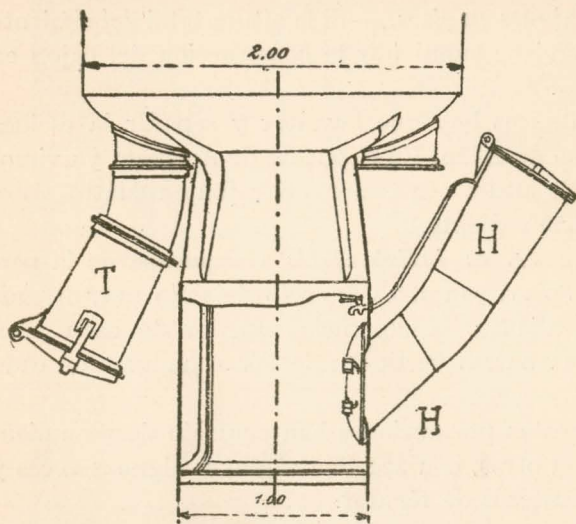


Fig. 175. Hormigonera lateral.

tinando una de ellas a los operarios y otra a las tierras y relleno.

Pero cuando las dimensiones del cajón no exceden sensiblemente de 100 metros cúbicos, basta con una esclusa para todo.

Una vez rellena la cámara de trabajo, se continúa vertiendo el hormigón dentro de la chi-

menea, operación que ya no exige el aire comprimido sino en su parte inferior, pues aun en el caso en que el agua penetrara en la chimenea, podría continuarse ese relleno con hormigón sumergido, como se hizo en Kehl (fig. 173).

Algunos ingenieros preconizan el cierre de la chimenea en su parte inferior, mediante unas tapas de madera con juntas de cáñamo embreado, que impiden el ascenso del agua por la chimenea a través del hormigón de la cámara de trabajo.

Pero no consideramos necesario ese cierre, que nunca hemos aplicado; nos ha bastado siempre apisonar el hormigón en la cámara para obtener su impermeabilidad y proseguir en seco y sin aire comprimido el relleno de la chimenea.

Análogamente a lo que dijimos en el anterior capítulo respecto al relleno de los tubos o cajones hincados por el *sistema indio*, puede ocurrir que en los cajones por aire comprimido tampoco sea indis-

pensable completar el relleno con hormigón de la cámara de trabajo y chimeneas.

Habrán casos en que pueda sustituirse este hormigón por arenas o gravas.

Hasta puede ocurrir (en terrenos fangosos, por ejemplo) que convenga reducir el peso de los cajones, para disminuir así la presión sobre el terreno.

Entonces, no sólo puede dejarse sin rellenar las últimas capas superiores de la cámara de trabajo y chimenea, sino que también podrá convenir dejar huecos en las fábricas elevadas sobre el techo de la cámara.

No hay, pues, reglas precisas; en cada cimiento debe razonarse y proceder con buen sentido, con arreglo a las circunstancias, a los datos de cada problema y al resultado que se persigue.

Empalmes de cajones adosados. — No es siempre posible ejecutar todo el cimiento en un solo cajón.

Así ocurre con los largos muros de muelle o de presa, con las grandes esclusas o diques de carena.

Hay que cimentar estas obras con bloques aislados, que deben empalmarse para realizar la continuidad de la construcción.

Las distancias entre los cajones deben ser suficientes para que no se estorben unos a otros durante la hínca, y para que puedan efectuarse entre las juntas las operaciones necesarias para su empalme; no deben ser inferiores a 0,20 m. y pueden alcanzar a veces 3 metros.

Cuando se trata de cajones para muros de muelle, basta generalmente con que su empalme impida el corrimiento por la junta del terraplén de relleno.

Se hincan entonces a distancias de 20 a 40 cm. unos de otros.

Será suficiente establecer por la parte interior de la junta una pantalla de tablestacas metálicas o de hormigón armado.

Se puede también dragar la junta cerrada por dos pantallas con una cuchara y rellenarla con sacos de hormigón; así lo hicimos en los cajones del antedique núm. 3 de la Carraca, hincados en el fango.

Pero si, como ocurre en presas, esclusas o diques de carena, deben sus cimientos ofrecer una impermeabilidad continua, es preciso que *las juntas sean estancas en toda la altura de los bloques.*

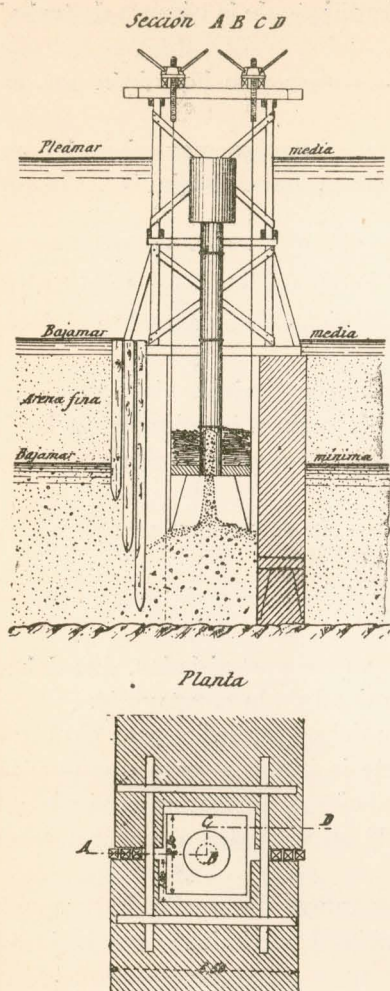


Fig. 176.

Los procedimientos imaginados por los ingenieros y constructores son muy variables; citaremos algunos ejemplos.

En la *esclusa de Saint-Servan* (1), para facilitar el empalme de los cajones aislados, tenían éstos en sus paramentos inmediatos un rebajo rectangular y vertical, que constituía un pozo, dentro del que penetraba un cajón móvil colgado de unos gatos (fig. 176).

Este cajón permite excavar primero el terreno y después rellenar el pozo con hormigón, contenido en las juntas con pilotes de madera.

Conviene observar que con este procedimiento es preciso regularizar la presión dentro de la cámara de trabajo, a fin de evitar fugas de aire por debajo del cuchillo, que establezcan corrientes de agua a lo largo de las paredes de los bloques que deslaven el hormigón fluido.

En el *dique de La Pallice* (2) los bloques habían quedado a distancia de 2 a 3 m.

Las paredes verticales de la junta de dos bloques se taparon con ataguías metálicas. Para cerrar totalmente el hueco, transformándolo en un verda-

(1) Nota sobre la unión de los cajones por aire comprimido, por el ingeniero jefe M. Mengin (*Annales des Ponts et Chaussées*, 1883, primer semestre).

(2) *Notice de MM. Thurninger et Coustolles* (*Annales des Ponts et Chaussées*, 1889, segundo trimestre, pág. 475).

dero cajón, se cubrió con una bóveda de fábrica sobre los dos bloques, y dentro de esta cámara, a la que se añadía una esclusa, se inyectaba aire comprimido.

Se rebajaba así el nivel del agua, lo que permitía añadir nuevos tensores horizontales entre las ataguías metálicas, obturándose al mismo tiempo las juntas.

Así se alcanzaba el suelo, que se limpiaba, rellenándose entonces el hueco con fábrica bien adherida a las paredes de los bloques.

Para el paso del Sena por el Metropolitano de París (puente Mirabeau) (1), el procedimiento adoptado para empalmar los grandes cajones con que la línea de Auteuil a la Opera atravesaba el Sena, ha sido el más sencillo y económico de todos los empleados en las demás travesías del río por las líneas del Metropolitano.

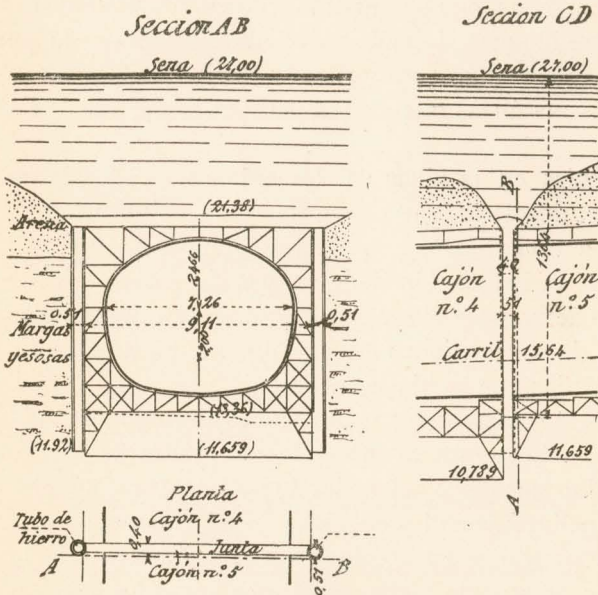


Fig. 177. Cajón del Metropolitano de París.

Se hincaron por aire comprimido cinco cajones con longitudes de 35 a 44 m. y 13,36 m. de anchura (fig. 177).

Estaban constituidos por un entramado metálico rígidamente

(1) Genie Civil del 11 de marzo de 1911

triangulado, cerrado exteriormente con palastro e interiormente con un cilindro ovoide de dovelas de fundición. El espacio comprendido entre estas paredes se rellenaba con hormigón.

Estos cajones sólo debían quedar a unos 0,40 m. de distancia.

Se hincaban aguas arriba y aguas abajo de las juntas unos tubos de hierro de 0,51 m. de diámetro, rellenos de hormigón.

Se dragaba entonces todo el terreno comprendido entre los dos cajones, y se rellenaba con buen hormigón sumergido el hueco comprendido entre los extremos de los cajones.

Una vez este hormigón bien endurecido, desde el interior de los cajones se abría en ese hormigón, así como en los tabiques extremos, el hueco correspondiente al gálibo del túnel.

Quando los cajones, como es general, se elevan hasta por encima de las aguas bajas, puede hoy día facilitarse el relleno de todas estas juntas entre bloques, dejando entre ellos un espacio de 1,50 m. para el trabajo y cerrando exteriormente las juntas con las ataguías de tablestacas metálicas que describimos en el capítulo VI (1).

Accidentes en la hinca de los cajones. — El más frecuente de todos es el desplome que puede tener un cajón durante la hinca. Depende, a veces, de una marcha defectuosa en los trabajos, pero también de la inclinación de las capas de terreno atravesadas, del encuentro de grandes bloques o de zonas de dureza desigual, y, sobre todo, de socavaciones en uno de sus lados, cuando éstas son más profundas que la hinca del cajón.

Deben atenuarse estas inclinaciones del cajón en cuanto se observan, no sólo porque al principio son fáciles de corregir sus desplomes, sino porque pueden dar lugar a roturas o, por lo menos, a grietas peligrosas en los cuchillos de los cajones.

Por de pronto, y desde que se nota una tendencia del cajón a inclinarse en un sentido, debe procurarse llevar las excavaciones más avanzadas del lado opuesto a fin de facilitar un giro contrario.

Si no es muy grande la profundidad alcanzada, se consigue generalmente enderezar el cajón con esta sola precaución; pero si el

(1) En el capítulo X describiremos el procedimiento que hemos imaginado para el empalme de los grandes cajones con fondo de H. A., que proyectamos para el dique de carena de Cádiz, que podría aplicarse a los cajones análogos, hincados por aire comprimido.

cajón está ya muy empotrado en el terreno, o la inclinación es grande, no suele ser suficiente y es preciso recurrir a otros procedimientos.

Para ello (fig. 178) hay que dificultar la hinca en la zona más baja *A*, y se consigue acodalando el techo en su zona más baja,

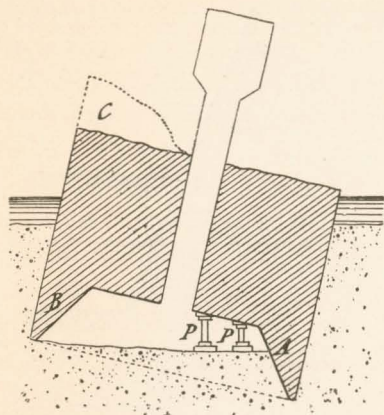


Fig. 178.

de agua y de las tierras inmediatas al cajón, destruyen en parte el rozamiento que sostiene el cajón de ese lado y facilita el giro que se persigue.

Hemos tenido ocasión de comprobar la eficacia de estos procedimientos en el cajón del puente de Amposta, que, hincado a 25 m. de profundidad, llevó a desviarse horizontalmente 0,90 m. en su parte superior, a pesar de lo que, aprovechando los 5 últimos metros de hinca del cajón, fué poco a poco llevado a su posición vertical.

En los cajones del puente de San Telmo (Sevilla), apenas fondearon en el suelo, sufrieron también inclinaciones de 2 a 3 m. hacia las socavaciones producidas en sus extremos por violentas avenidas. Pudimos enderezarlos totalmente escavando con precaución y lentitud.

En el puente del Forth, uno de los cajones metálicos, al apoyarse en un bajo fondo arenoso de aquella bahía, llegó a tomar la inclinación representada por la figura 179, habiéndose, además, corrido 5,60 m. en sentido horizontal.

El agua invadió el cajón y hubo primeramente que elevar sus

puntales acñados que se apoyan en amplios tableros de repartición sobre el terreno, al mismo tiempo que se recarga el macizo, levantando en *C* con fábrica suplementaria o cargándolo con piedra o lingote.

Se fuerza entonces la presión del aire comprimido, provocando así escapes de aire, que tienden a subir a lo largo de la pared *B*, y cuya *ebullición*, digámoslo así, que se produce por el movimiento del aire, arrastrando una mezcla

paredes con un robusto recinto de madera, fuertemente arriostrado, constituyendo un andamio interior en el que se dispusieron, sucesivamente, las tres bombas centrífugas necesarias para el agotamiento.

Hubo, además, que lastrar con grandes pesos la parte levantada

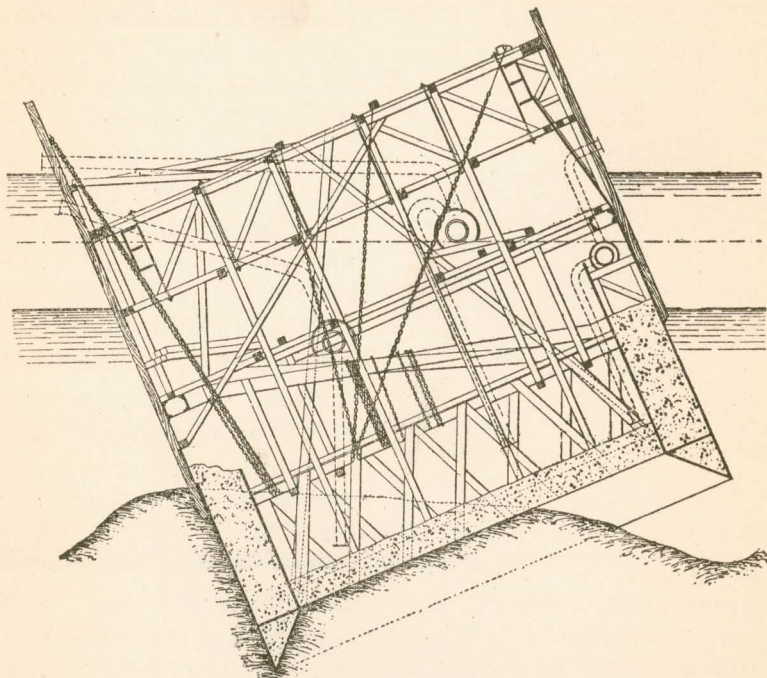


Fig. 179. Puente del Forth.

del cajón; pero todas estas difíciles y largas tareas exigieron veinte meses de trabajo para conseguir enderezar u correr el cajón a su sitio (1).

Durante la hinca, y por los movimientos más o menos bruscos que sufre, ocurre también que el bloque, que a veces está sometido a grandes esfuerzos transversales, por el empuje desigual del terreno o por acodamiento contra otros bloques inmediatos anteriormente hincados, puede agrietarse y hasta romperse por el plano de em-

(1) *Engineering*, de 28 de febrero de 1890.

palme de dos de los pisos del macizo, si no se ha cuidado la soldadura del empalme, o por no haber solidarizado los diferentes pisos con las barras verticales en toda la altura del cajón, cuyo empleo preconizamos anteriormente.

Sufrimos un accidente de esta índole en 1910, en uno de los seis cajones de hormigón muy ligeramente armado, que tuvimos que hincar en fango y a 18 m. de profundidad, en el antedique de La Carraca.

Por la flojedad de aquel terreno fangoso, nos pareció innecesario prolongar la armadura vertical del cajón en toda la altura de sus cuatro pisos.

Para evitar su inclinación durante la hinca, escalonamos ésta en varios cajones que se hacían descender a la vez. Pero como sólo estaban distanciados de 0,30 m., uno de ellos, que sufrió una inclinación sensible, quedó acodalado entre los dos inmediatos, y la reacción horizontal de éstos empujó tan fuertemente a uno de los pisos, que lo despegó del inferior, escapándose repentinamente por la grieta abierta el aire comprimido de la cámara de trabajo. Gracias a que el terreno era tan impermeable que dió tiempo a que los obreros pudieran salir rápidamente por la chimenea, pues la cámara de trabajo se rellenó en poco tiempo con el fango pastoso del fondo.

Por inclinación de los cajones y empujes desiguales del terreno ocurrieron accidentes análogos a otro constructor en la hinca de los cajones del muelle de Alfonso XII (Sevilla), debidos también a la insuficiencia de las armaduras verticales del hormigón.

Estas roturas son difíciles y costosas de reparar, porque hay que luchar contra las fugas del aire por la grieta, lo que obliga muchas veces a recurrir a buzos y a otros recursos caros y no siempre eficaces. Por lo mismo, deben evitarse con las precauciones debidas en la construcción y sobre todo en el empalme de los cajones.

Precauciones para el trabajo por aire comprimido. — Los obreros trabajan siempre en malas condiciones dentro de los cajones de aire comprimido, a causa de la gran humedad y del aire viciado; pero no suelen ser éstas las causas más frecuentes de los accidentes

personales, sino las que se derivan de la presión del aire, y es preciso adoptar precauciones que tiendan a impedir los accidentes y a corregir sus efectos cuando se han producido.

Rara vez ocurren accidentes de obreros durante el período de trabajo; casi todos ellos tienen lugar en los momentos de la compresión, y, principalmente, en la descompresión, es decir, en el tiempo que permanecen en la esclusa, o bien algún tiempo después de salir de ella.

Suelen ser estos accidentes: vómitos, síncope, pérdida de la sensibilidad, o, los más graves, de apoplejía pulmonar, por cese de la respiración, o muerte por síncope.

Se ha legislado ya sobre estas cuestiones en otros países, y aunque nada se ha hecho oficialmente en España, que nosotros sepamos, creemos conveniente resumir aquí el decreto francés de 15 de diciembre de 1908, prescribiendo las medidas particulares de salubridad para los trabajos en aire comprimido:

No deberá permitirse el trabajo a los obreros ebrios.

Los trabajos de compresión y descompresión deben ser dirigidos por un agente especial.

En la compresión, el tiempo empleado debe ser cuatro minutos, por lo menos, para aumentar la presión de un kilogramo por centímetro cuadrado hasta 2 kilogramos de presión total efectiva, y de cinco minutos, por lo menos, por cada kilogramo de presión más allá de 2 kilogramos por centímetro cuadrado. En la descompresión, el tiempo empleado no debe ser inferior al que a continuación se indica:

Veinte minutos por kilogramo de presión más allá de 3 kilogramos efectivos por centímetro cuadrado.

Quince minutos entre 3 y 2 kilogramos.

Diez minutos a menos de 2 kilogramos hasta llegar a la presión cero. Si la presión no pasa de un kilogramo efectivo por centímetro cuadrado, puede reducirse el tiempo de descompresión a cinco minutos.

Cada esclusa deberá llevar su manómetro. La altura de la cámara de trabajo no puede ser inferior a 1,80 m.

La cantidad de aire enviado a la cámara de trabajo debe ser de 40 metros cúbicos, por lo menos, por hora y por obrero, no debiendo pasar la proporción de ácido carbónico del 1×1.000 .

El cubo de aire en la esclusa debe ser, por lo menos, de 0,600 metros cúbicos por persona.

Para presiones inferiores a 2 kg. por centímetro cuadrado, no debe pasarse de las ocho horas de trabajo diarias.

Siete horas, si la presión oscila entre 2 y 2,5 kg.

Seis horas, si la presión oscila entre 2,5 y 3 kg.

Cinco horas, cuando esté comprendida entre 3 y 3,5 kg., y

Cuatro horas, para presiones de 3,5 a 4 kg.

Los Estados Unidos y los Países Bajos han dictado disposiciones parecidas, y en un Congreso Internacional de Bruselas se ha tratado ampliamente estas cuestiones, dándose a conocer interesantes informes de doctores especializados en esta materia.

En resumen: las precauciones deben ser proporcionales a la presión de trabajo, y deben extremarse cuando ésta exceda de 15 m.

Los ingenieros y los médicos encargados de este servicio deben asegurarse de que se adoptan las precauciones necesarias.

Pero, sobre todo, es indispensable que los encargados y capataces de estos trabajos tengan la debida experiencia, sin la que son fáciles los accidentes graves, con cierta responsabilidad para los ingenieros directores de las obras.