

LA PRESA DE BOVEDAS MULTIPLES DE MEICENDE

Por LUCIANO YORDI DE CARRICARTE

Ingeniero de Caminos.

Consideramos de verdadero interés la completa descripción que hace el autor de la obra reseñada en el epígrafe, y las atinadas consideraciones que hace sobre la elección de este tipo de presa, poniendo de manifiesto su profundo conocimiento del tema y aportando muy interesantes referencias sobre obras del mismo tipo construidas últimamente.

Antecedentes.

Para resolver el problema de abastecimiento de aguas necesario para el funcionamiento de las dos grandes factorías sitas en La Grela (La Coruña) y pertenecientes, una, a Aluminio de Galicia, S. A., y otra, a Grafitos Eléctricos del Noroeste, S. A. (GENOSA), después de una serie de tanteos se decidió ir a la construcción de una presa de embalse situada inmediatamente aguas arriba de ambas factorías, en el Arroyo de Pastoriza, resolviendo así con el embalse creado por esta presa el problema planteado, al poderse trabajar en circuito cerrado entre dichas factorías y el embalse construido.

Tanteadas las dimensiones del cierre para crear la reserva necesaria de agua, se vió la necesidad de ir a una presa que alcanzase la cota 82,00, la cual originaba una altura total de 20,00 m. de obra, con una longitud de coronación de 284,00 m.

Para la redacción del proyecto, la primera idea, como es lógico, fué ver la posibilidad de ir a una solución que, ofreciendo las mismas condiciones de seguridad que la solución tradicional de presa de gravedad, pudiese suponer una economía debido a un tipo de obra más adecuado, que permitiese trabajar en mejores condiciones al material de la misma.

Para ello, lo primero que se hizo en el perfil de la cerrada escogida fué una fila de sondeos que dieron las siguientes conclusiones:

Condiciones geológicas de la cerrada.

En ambas márgenes y en el centro del amplio fondo del valle existen afloramientos de roca (granito) sanos.

Los sondeos practicados han descubierto, en general, la roca a poca profundidad, bajo la tierra vegetal, cuyo espesor aumenta al aproximarse al fondo mismo del valle. La única zona que presentó discontinuidad es una comprendida entre la parte central y la margen izquierda, en donde se encontró roca a 5,00 m. de profundidad, pero en estado descompuesto. En esta zona, aparte del granito, existía un filón de aplita preferentemente feldespática.

El contacto granito-aplita está bien definido por un plano rumbo N.-80° O. de buzamiento vertical.

El resultado de estas observaciones iniciales fué, teniendo en cuenta el tipo de roca de que se trata, la necesidad de eliminar toda la roca alterada en la zona general de la fundación e ir a la construcción de un rastrillo que alcanzase la roca sana en la parte donde aparece la aplita, con el fin de evitar filtraciones.



Fig. 1.ª — Hormigonado de la falla del contrafuerte núm. 8.

En la zona del filón de aplita hubo que bajar las cimentaciones a la profundidad de 16 m. (figs. 1.ª y 2.ª).

Elección del tipo de presa.

Partiendo de las características geológicas del valle y de los fondos de roca que aparecieron en los sondeos de reconocimiento, se vió que esta roca no negaba cualquier solución que se pudiese estudiar para cerrar el valle y crear así el embalse necesario, aunque fuese a base de una solución aligerada.

Dadas las características del valle en lo que se refiere a sus dimensiones, con forma trapecial de bases da 90 y 300 m. y altura de 20 m., pareció oportuno,

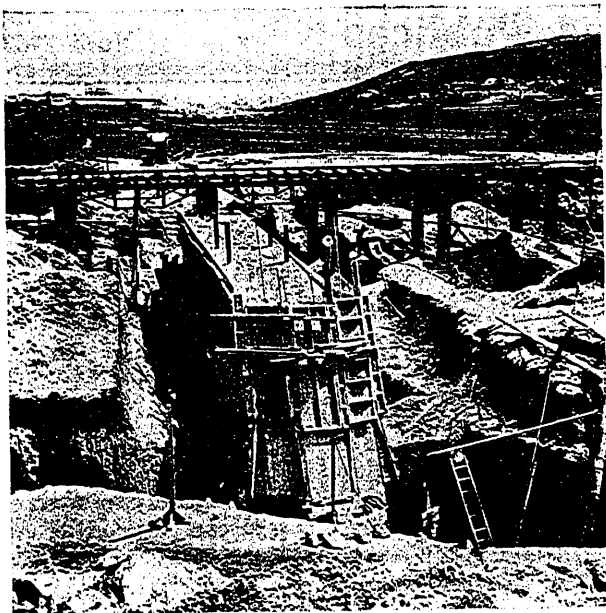


Fig. 2.^a — Arranque del contrafuerte núm. 8.

teniendo también en cuenta el tipo de roca que lo integra, ir al estudio de una solución de presa a base de elementos repetidos, constituidos por contrafuertes y bóvedas múltiples.

Las ventajas de este tipo de presa son las de todas conocidas: una, la economía en volumen de fábrica y en el coste total de la construcción, y otra, la mejor

distribución de presiones sobre el terreno en la base de los contrafuertes, la rapidez de ejecución por el menor material que se exige, la eliminación de la subpresión y la libertad para elegir las luces de las bóvedas y poder así implantar los contrafuertes fuera de las partes más alteradas del terreno.

Los inconvenientes principales de estas presas son su impermeabilidad, difícil de conseguir para grandes alturas, pero no en el caso que se comenta, ya que la altura de 20 m. sobre cimientos es muy favorable, así como también las fuertes variaciones térmicas en climas extremados, cosa que tampoco sucede en el emplazamiento de Meicende, por lo cual no vimos mayor inconveniente a la realización de la presa de bóvedas múltiples, que supuso una economía y una seguridad plena debida a las reducidas cargas de trabajo obtenidas y a la negación de cualquier eventualidad, teniendo en cuenta las modestas dimensiones de la obra y los estudios previos realizados.

A continuación describiremos las principales características de la obra definida en este artículo.

Presa.

La obra se compone, fundamentalmente, de 11 bóvedas de sección horizontal circular de 1,00 m. de espesor y 11,00 m. de radio en el intradós, con un desplome hacia aguas abajo de 60°. Estas bóvedas se apoyan en contrafuertes de ancho constante de 2,50 metros, con un desplome de 0,60, según se ve en la figura 1.^a-P.

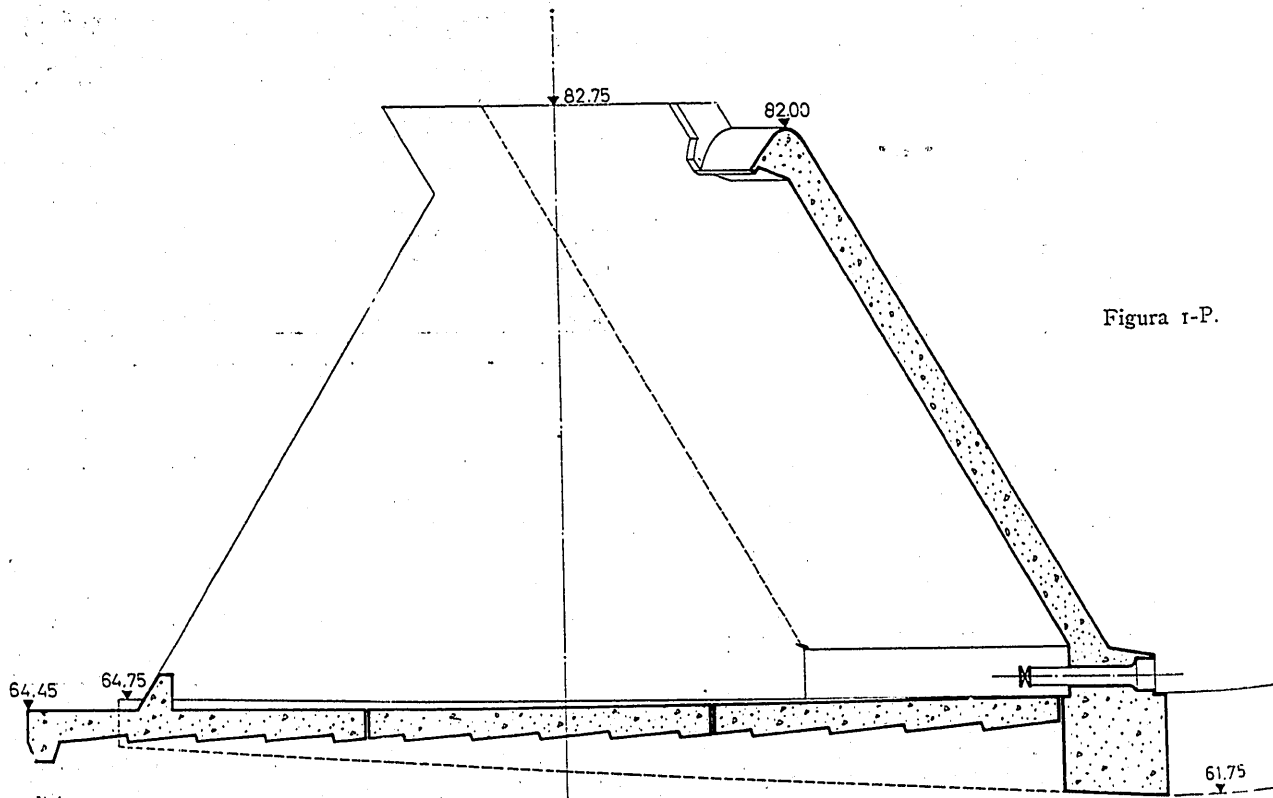


Figura 1-P.

Las bóvedas tienen dos juntas, una en cada arranque, situadas en planos radiales y provistas de las clásicas cubrejuntas en forma de Z, formadas por chapas de cobre de 2 mm. de espesor, las de aguas arriba, y por chapas de acero, las de aguas abajo.

Cada junta va provista de ranuras y tuberías de

cuales son los que efectúan el cierre final contra las laderas.

Las bóvedas llevan, en el paramento de trasdós, una armadura de piel, constituida por unas mallas de módulos de 33×33 cm., formadas por redondos de 12 m. de diámetro.

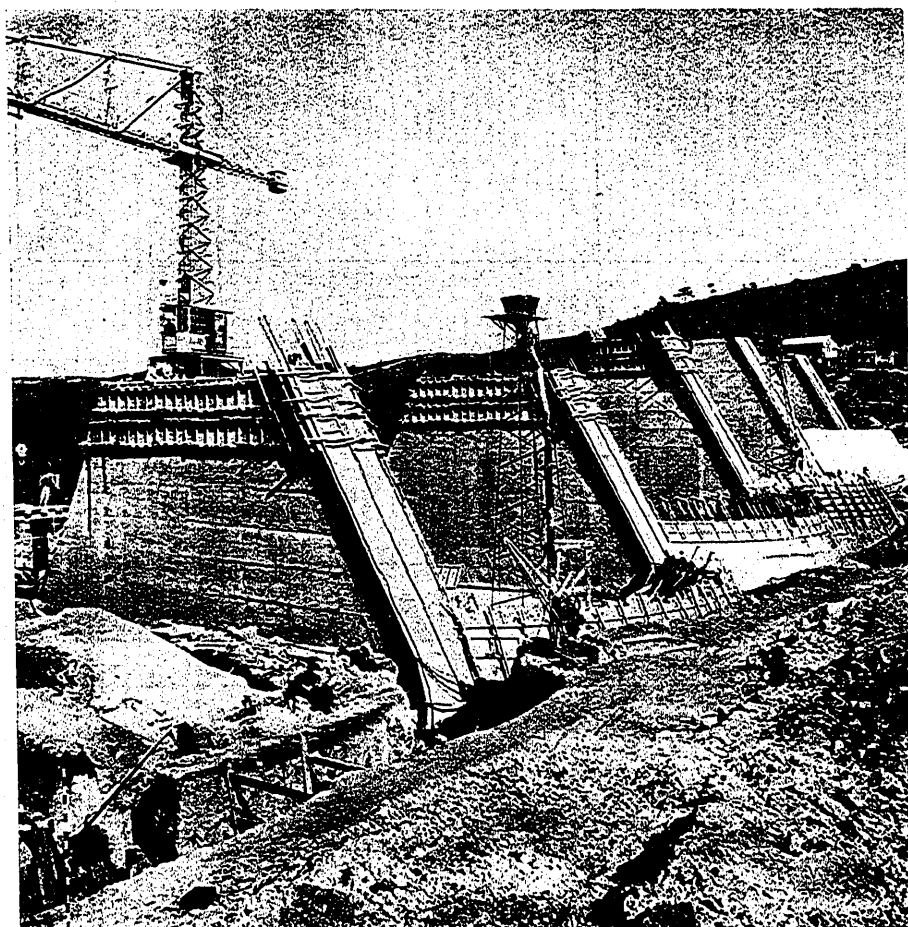


Fig. 3.^a — Vista parcial de contrafuertes desde aguas arriba. Nótese la viga de cabeza de los contrafuertes.

1,5" para efectuar dos campañas de inyección, una primaria y otra secundaria, las cuales permitirán inyectar las juntas en cualquier momento que se considere oportuno.

Las bóvedas se unen a la roca a través de una zapata de 3,00 y 2,50 m. de ancho, según las zonas y 2,00 m. de profundidad mínima.

Los contrafuertes que distan entre ejes, 22,00 m., se apoyan en la roca, y para su implantación se hizo una excavación dentada en sentido contrario al deslizamiento, con una contrapendiente del 5 por 100 (figura 2.^a-P).

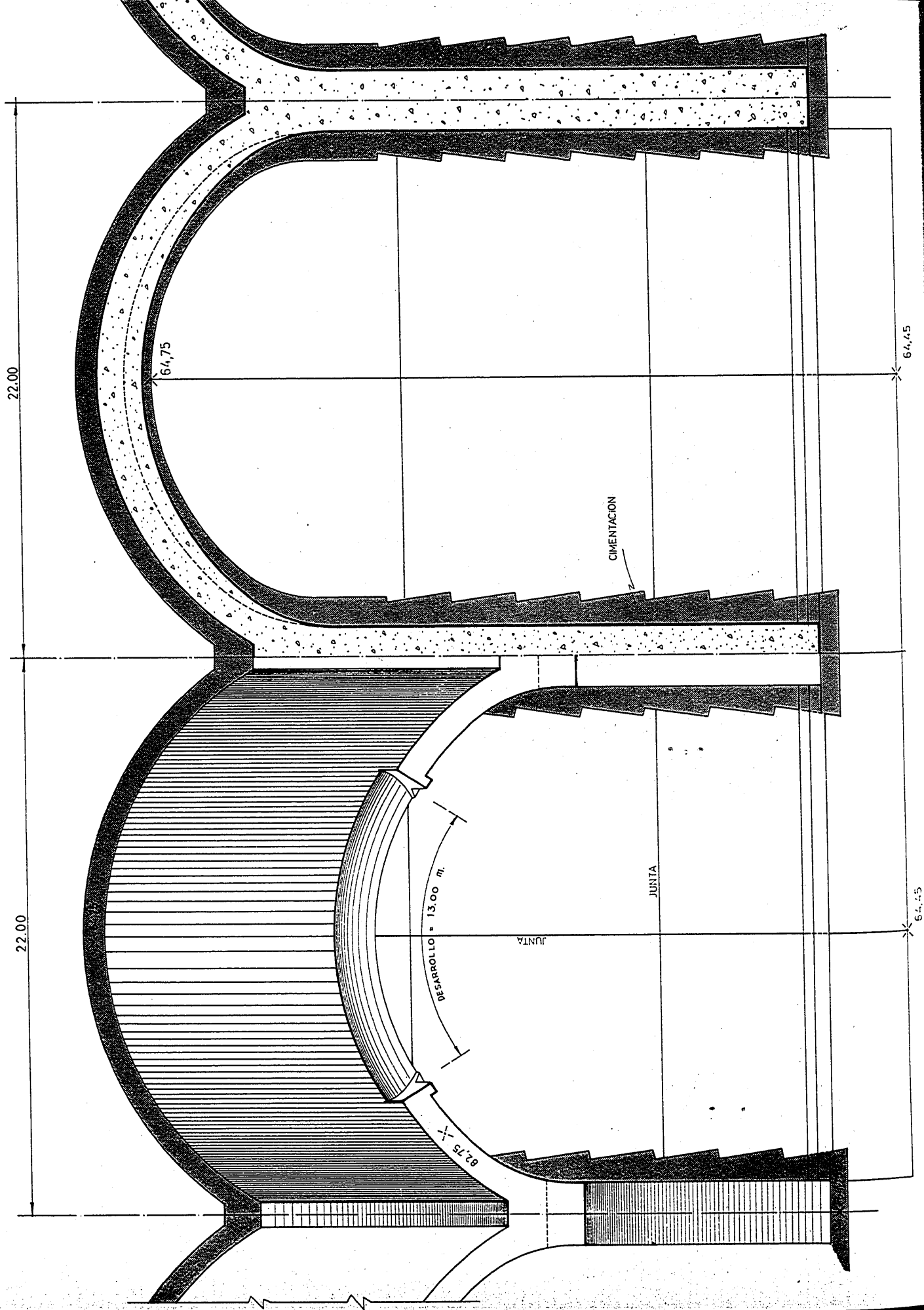
Complementando las 11 bóvedas, en ambas márgenes, la presa va dotada de dos estribos de sección de gravedad, con unas longitudes de 22 y 20 m., los

Las partes de aguas arriba de los contrafuertes que absorben las solicitaciones de las bóvedas van también ligeramete armadas (fig. 3.^a).

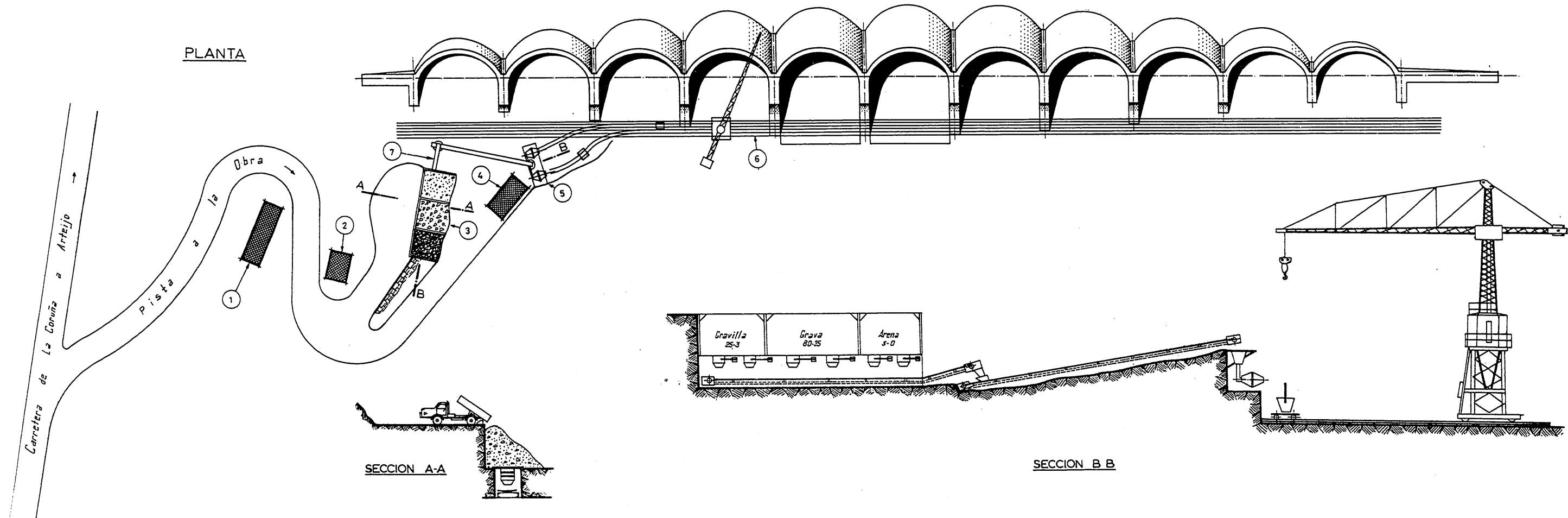
La armadura de piel reseñada se refuerza en el entronque de las bóvedas con la zapata de fondo, con el fin de negar así los efectos de los cambios de la flexión debidos a la alteración sufrida por el empostramiento con la cimentación.

Cálculo de las bóvedas.

La presa ha sido proyectada como presa de bóvedas múltiples, inspirándonos en los últimos criterios directivos de los estudios de otras presas del mismo



PLANTA



- ① OFICINA Y ALMACEN
- ② TRANSFORMADOR Y COMPRESOR
- ③ SILOS
- ④ ALMACEN DE CEMENTO
- ⑤ HORMIGONERAS
- ⑥ CAMINO RODADURA CAZOS Y GRUA
- ⑦ CINTAS TRANSPORTADORAS

Figura 3-P.

tipo recientemente construídas en Francia y Argelia, tales como Migoelou, de 25 m. de altura y 25 de separación entre contrafuertes, y Meffrouch, de iguales dimensiones, etc.

El criterio antiguo era el de ir a bóvedas de pequeña luz, criterio que negó A. Coyne al ir a relaciones de luces-alturas iguales a 1, y más aún recién-

En este cálculo, la presa ha sido idealmente cortada en arcos elementales, horizontales y superpuestos, considerados entre ellos independientes y sujetos a la acción de la presión hidráulica y a las sollicitaciones térmica y de la contracción. Los arcos se han supuesto continuos y empotrados elásticamente en los contrafuertes.

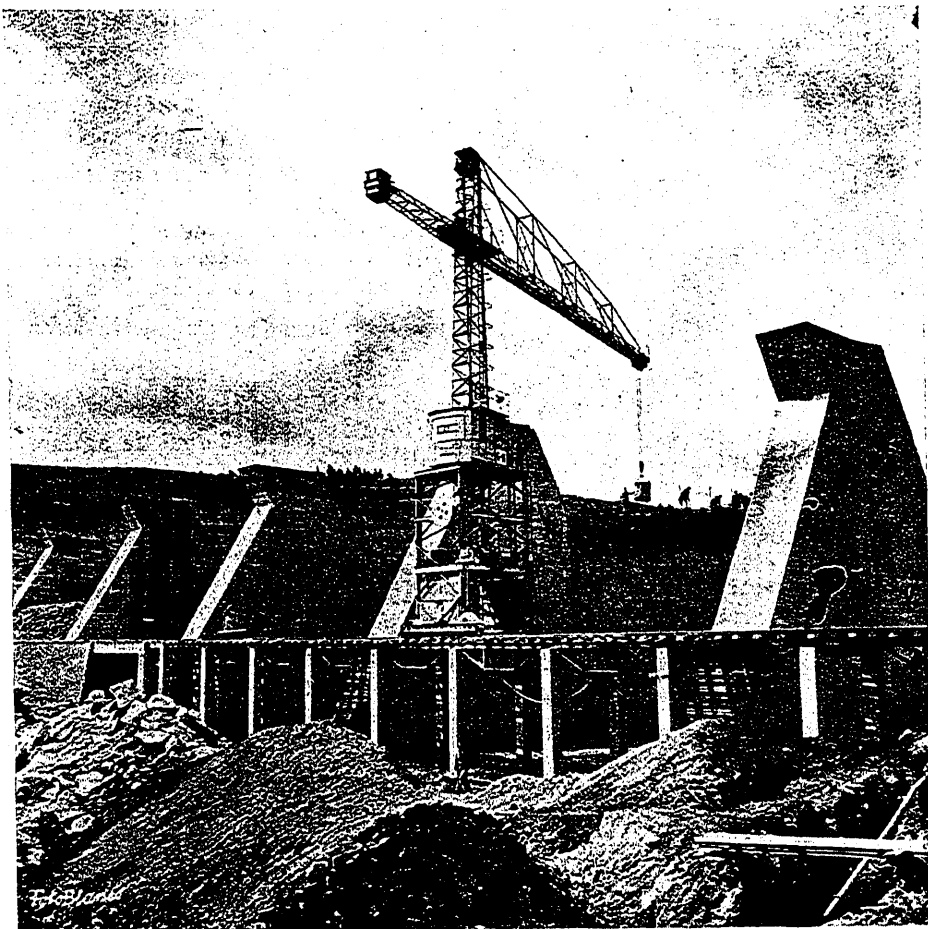


Fig. 4.ª — Contrafuertes 3, 4, 5, 6 y 7. En primer término se ve el puente de servicio para la grúa empleada en el hormigonado de bóvedas y contrafuertes.

temente los ingenieros portugueses al ir a proyectos de presas de cúpulas múltiples con relaciones luces-alturas iguales a 2, tales como los proyectos de las presas de Roxo, Caia, etc.

En nuestro caso, dadas las reducidas dimensiones y pensando salvar los accidente del terreno e ir a un número prudente de contrafuertes, fuimos, después de varios tanteos, a una separación de contrafuertes de 22 m., volteando entre ellos bóvedas de 1,00 de espesor.

El cálculo de esta presa se hizo a base de que los arcos considerados por sí mismos soportasen la acción del empuje hidrostático.

Los arcos se han verificado de 5 en 5 m., aplicando el sabido cálculo del arco elástico.

Todos los arcos elementales se perfilaron con espesores constantes en clave y en arranques, teniendo en cuenta que, debido a los pequeños espesores necesarios en las zonas más solicitadas, niegan estos espesores posible reducción en otras zonas, si tenemos en cuenta el efecto de impermeabilidad y la dificultad de ejecución.

También se hizo la comprobación de las bóvedas por arcos inclinados, siguiendo el procedimiento indicado por A. Bourgin en *Cours de Calcul de Barrages*.

Calculados los esfuerzos debidos a la carga hidros-

tática, viene impuesto el cálculo debido a las variaciones térmicas de las estaciones y a la acción de la contracción del hormigón.

Las oscilaciones térmicas que se prevén sobre el paramento de la presa, vienen establecidas teniendo presentes las condiciones ambientales de la cerrada en cuestión. Recordamos el hecho de que la temperatura efectiva de los paramentos no puede sufrir las mismas variaciones que la temperatura del aire relativa a los instantes cotidianos, sino sentirse la temperatura media diurna. Propuesto esto, resumimos en el siguiente cuadro las condiciones térmicas impuestas por nosotros para base del cálculo:

a) Embalse lleno:

- paramento de aguas arriba (agua), oscilación térmica máxima: $\pm 4^\circ$ sobre $+ 10^\circ$;
- paramento de aguas abajo (aire), oscilación térmica máxima respecto a la temperatura media anual: $\pm 7^\circ$.

b) Embalse vacío, oscilación térmica: $\pm 7^\circ$.

La temperatura media anual en el valle donde está emplazada la presa puede considerarse de $+ 12^\circ$. La temperatura media de cierre de las juntas, dada la altura y los limitados espesores de la presa, se ha previsto en torno a los $+ 10^\circ$.

Contrafuertes.

Para el cálculo de contrafuertes hemos seguido el procedimiento normal de ver los empujes sobre los mismos, debidos a la presión hidrostática en las dos direcciones y los efectos de los pesos propios de bóvedas y contrafuertes.

Se han dibujado las leyes de empujes debidas a arcos horizontales y arcos inclinados, que apenas difieren de una a otra hipótesis.

En virtud de las cargas actuantes sobre los contrafuertes, hemos calculado en varias secciones las tensiones normales verticales y las tensiones principales en los paramentos, que son las más peligrosas, siendo las cargas las transmitidas por el peso propio de las bóvedas y la presión hidrostática.

A la vista de los resultados obtenidos, vemos que los contrafuertes están en condiciones normales de estabilidad, ya que no aparecen tracciones y la carga máxima de compresión es del orden de los 17 kilogramos/cm.².

Las cargas finales y máximas obtenidas han sido del orden de los 45 Kg./cm.², a compresión, y de 6, a tracción. Claro está que esta última es a base de que suceda una hipótesis muy desfavorable con el embalse vacío.

Estos contrafuertes se ven en las figuras 4.^a y 1.^a-P.

Vertedero.

A pesar de la pequeña cuenca vertiente, fué deseo de las Empresas concesionarias ir a la construcción

de un aliviadero que pueda evacuar en un momento determinado una punta del orden de los 30 m.³/seg.

Por la pequeña altura de la obra y los pequeños caudales que hay que evacuar normalmente, proyectamos el aliviadero en la coronación de las dos bóvedas centrales, a la cota 82,00, con lo cual queda un resguardo de 0,75 m. sobre los mismos. La longitud de estos dos aliviaderos es de 25 m.

Para defensa del pie de la presa se dotó a ésta de una solera de 0,60 m. de espesor medio y de 30 de longitud, en cuyo final se sitúa un bordillo trapezoidal de 1,00 m. de altura, para crear así un colchón de agua amortiguador.

Esta solera lleva una armadura de repartición de mallas formadas por redondos de 12 mm. cada 33 cm. Además, con el fin de evitar subpresiones, se dota a esta solera de chimeneas de ladrillo de 12 X 12 cm., separadas 2 m. cada una de la próxima.

Este aliviadero está definido en las figuras 1.^a-P y 2.^a-P.

Toma de aguas.

Para cumplir su finalidad de abastecer de agua las dos factorías citadas, la presa va dotada de dos tomas de agua.

Estas dos tomas tienen un diámetro de 500 mm. en su sección normal y 1 000 mm. en la entrada, para así reducir pérdidas de carga.

En estas entradas van situadas las rejillas, estando constituidas ambas tomas por chapas de palastro de 3 mm. de espesor.

La cota de toma de agua es la 69 y las dos tomas se sitúan en la zapata de cimentación de la bóveda número 7.

A la salida del cuerpo de la presa van instaladas dos válvulas-compuertas para la apertura y cierre, y a partir de estas dos válvulas, arrancan las tuberías de conducción.

Desagüe de fondo

La presa de Meicende también va dotada de un desagüe de fondo.

Este desagüe va provisto de una rejilla a su entrada de 1 000 mm. de diámetro y 900 de altura. El desagüe propiamente dicho está integrado por una tubería de palastro de 3 mm. de espesor y 500 de diámetro.

Este desagüe está situado en la bóveda núm. 5 y la cota de su eje es la 65,30.

El cierre y apertura de este desagüe se hace igual que las tomas, a base de una válvula-compuerta.

Hormigón.

Teniendo en cuenta las cargas de la presa y el tipo de la misma, las características iniciales del hormigón que la integra implicaron la dosificación siguiente:

| TIPO | Tamaño mm. | Pes. Kg |
|--------------------|---------------|------------|
| Grava | 25 - 80 | 1.230 |
| Gravilla | 3 - 25 | 350 |
| Arena | 0 - 3 | 430 |
| Cemento | — | 300 |
| Agua | — | 140 |
| Total | | 2.500 |

Las cargas de rotura fueron de más de 300 kilogramos/cm.², a los noventa días.

Todo el hormigón de la obra fué vibrado y su colocación se hizo a base de una grúa (figs. 4.^a y 5.^a).

Los encofrados fueron metálicos y deslizantes, haciéndose tongadas de 1,5 m. de altura (figs. 6.^a y 7.^a).

La colocación de los encofrados con la inclinación de las bóvedas y la importancia de las superficies de los mismos con relación a los volúmenes de hormigón, nos hizo fijar inicialmente el ritmo de hormigonado en 100 m.³ diarios.



Fig. 5.^a — Hormigonado de las bóvedas.



Fig. 6.^a — Encofrados utilizados en el hormigonado de bóvedas.

Instalaciones.

Las instalaciones para este ritmo se hicieron a base del esquema señalado en la figura 3.^a-P, constituido fundamentalmente por dos hormigoneras de 1/2 m.³ de capacidad, y una grúa Bayer de 20 m. de radio y 3/4 de m.³ de capacidad, ya que los áridos se obtenían de la explotación de canteras próximas al emplazamiento y se transportaban a la obra en camiones.

La grúa tenía un puente de servicio que le servía de camino de rodadura y que corría a lo largo de toda la presa (fig. 4.^a).

El plazo total de terminación de la obra fué de once meses.

Pantalla de impermeabilización.

Toda la presa, debido a las circunstancias geológicas de la cerrada, va dotada de una pantalla de impermeabilización situada hacia aguas arriba y constituida por taladros de 10 y 15 m. de profundidad, inyectados a una presión media de 5 Kg./cm.².

Igualmente, la presa va dotada de un sistema de drenes situados inmediatamente aguas abajo de los pies de las bóvedas, con el fin de negar subpresiones.

Estos drenes tienen profundidades de 6 y 8 m.

Igualmente algunos contrafuertes, debido a las circunstancias del terreno, van drenados y consolidados lateralmente, para mejorar el contacto roca-zona lateral del cimientto.

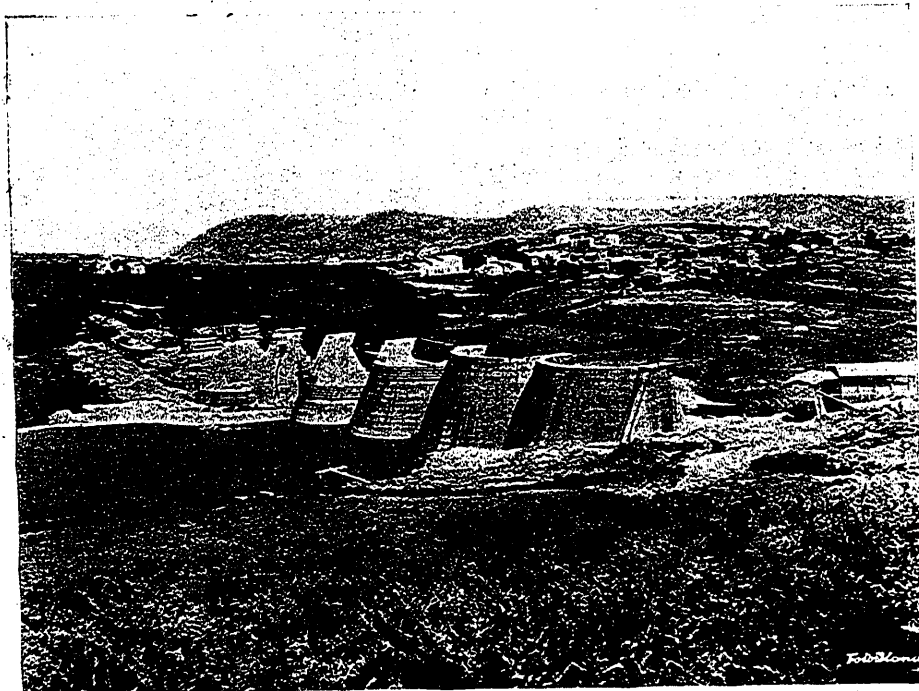


Fig. 7.^a — Obra en ejecución. Vista desde la ladera derecha de parte de las bóvedas.

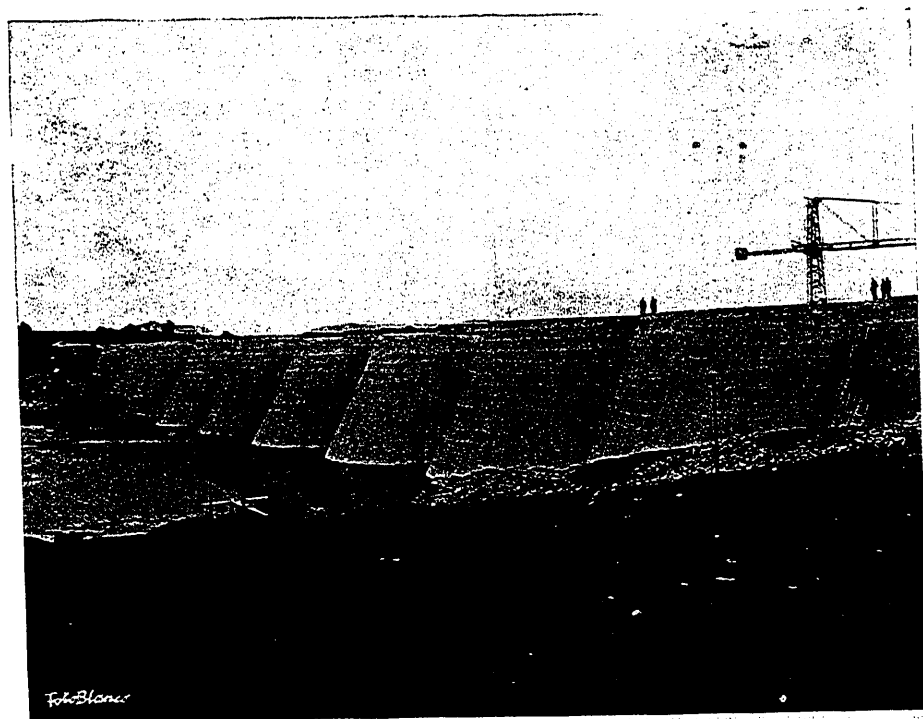


Fig. 8.^a — Vista general de la obra, terminada.

Comentario.

a) Hasta ahora, la idea clásica sobre las presas de bóvedas múltiples era aquella que señalaba que las luces más económicas eran las que no sobrepasaban los 15 m. de luz, armándose las bóvedas, ya que sus espesores no consentían fisuras, lo cual exigía que dichas armaduras debían resistir los esfuerzos originados por el empuje hidrostático y por las acciones térmica e higrométrica.

Esta idea originaba, además, hormigones ricos en dosificación, encofrados difíciles y delicadas operaciones de puesta en obra del hormigón, por las reducidas dimensiones con las que había que enfrentarse.

En Meicende, como se ha visto, fuimos a luces mayores de 22 m. y espesores de 1,00 m.

La experiencia obtenida en esta obra nos señaló, sin embargo, que desde un punto de vista económico es más conveniente ir a bóvedas de luces más grandes, ya que al aumentar estas luces se llega a dimensiones de contrafuertes y espesores de bóvedas que pueden ser comparables a los de las presas-bóvedas normales, facilitándose así el hormigonado y la relación de metro cuadrado de encofrado y metro cúbico de hormigón, con la correspondiente economía.

Fijar una separación óptima entre contrafuertes es hoy en día difícil de señalar *a priori* y depende en sumo grado del proyectista de la obra y de los elementos de cálculo y de modelos de que disponga.

Únicamente como referencia, cabe decir que en las presas de Grandval y Nebeur, A. Coyne llegó a luces de 50 metros, y que en la actualidad se están

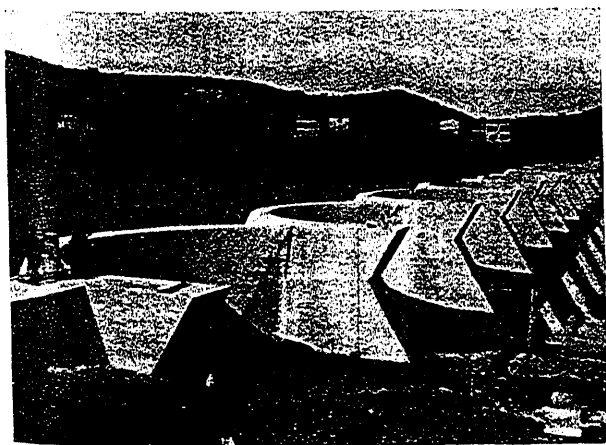


Fig. 9.ª — Vista desde aguas abajo del conjunto de la obra.

llevando a cabo ensayos teóricos en modelos reducidos sobre presas de bóvedas múltiples en que con alturas de 50 m. se tratan de alcanzar separaciones de contrafuertes de 100 metros.

Esto permite ver la idea de alcanzar separaciones importantes entre contrafuertes, con la cual estamos totalmente de acuerdo.

b) Respecto a la forma de las bóvedas, diremos que en Meicende fuimos a secciones horizontales circulares y a generatrices rectas, debido a sus dimensiones reducidas. No obstante, empieza ahora a perfilarse la idea de la doble curvatura en las bóvedas,

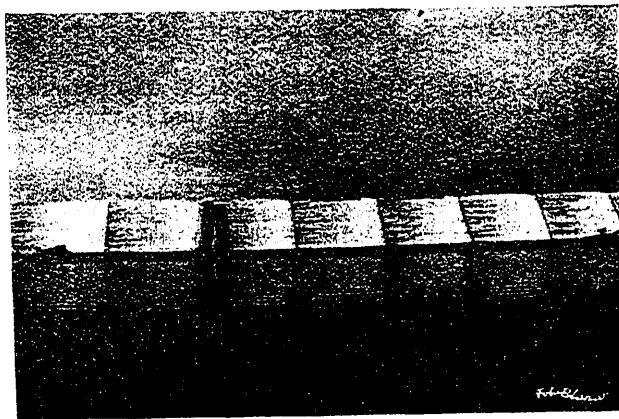


Fig. 10. — Comienzo del llenado del embalse.

sobre todo en aquellas de luces superiores a su altura. La finalidad de esta curvatura en sentido vertical es crear, como siempre, una precompresión en la parte inferior, transmitiendo a la vez parte de la componente horizontal del empuje del agua al cimiento, reduciendo a la vez las cargas transmitidas a los contrafuertes.

En Meicende, para neutralizar estas tracciones en los pies de las bóvedas, tanteamos la posibilidad de crear en la base de las mismas juntas a lo largo de todas ellas, idea que desechamos por ser estas juntas de difícil realización en lo concerniente a su estanquidad.

Las tracciones existentes en las bases de las bóvedas las absorbimos en este caso con armaduras empotradas en las zapatas de cimentación. Estas armaduras, además de absorber los cambios de flexión debidos a la alteración sufrida por el empotramiento, crearon fatalmente a los elementos verticales que constituyen las bóvedas, una rigidez tal que dichas ménsulas, aun no teniéndolas en cuenta en el cálculo absorben parte de la componente horizontal de la presión hidrostática, aliviando, por consiguiente, a los contrafuertes de esfuerzos de sollicitación. Esta armadura, por consiguiente, hace el papel de la curvatura en sentido vertical a que antes nos referíamos.

El ahorro de tiempo y dificultad de encofrado compensó, en el caso de Meicende, el gasto del hierro empleado.

En presas de mayores dimensiones será necesario ir a la curvatura en sentido vertical, para reducir tracciones prohibitivas, ya que las armaduras serían de coste muy elevado.

c) Al entablarse relación con este tipo de presas de bóvedas múltiples, una de las cuestiones que sur-

gen inmediatamente es la resistencia al deslizamiento en la junta hormigón-roca.

Queremos hacer notar que son muy interesantes para aquellos que tengan contacto con el tema, los estudios franceses dados a conocer en el VII Congreso de Grandes Presas de Roma, encuadrados en la cuestión número 26, para el proyecto de la presa de Grandral.

El resumen de estos ensayos es la relación entre T y N en el momento de la rotura, que dice:

$$T = 30 + 1,30 N \text{ (Kg./cm.}^2\text{)}.$$

Comparando esta fórmula con la regla clásica:

$$T = 0,75 N$$

se ve que los coeficientes de seguridad tienen un valor muy variable según los valores que tenga N .

Esta fórmula, como es lógico, es de una importancia primordial en el proyecto y muy digna de tener en cuenta.

d) Complementando esta idea, es muy interesante la solución francesa de la presa de bóvedas múltiples D'Erraguène, que consiste en la utilización de unos estribos o topes situados aguas abajo de los contrafuertes. Cada estribo lleva un juego de gatos tipo "Freyssinet" interpuestos entre el talón del contrafuerte y dicho estribo, que crean las reacciones necesarias para la estabilidad de la obra.

Así, la fundación trabaja en dos partes: la de aguas

arriba, que comprende la cimentación del contrafuerte propiamente dicha y trabaja en condiciones normales, y la de aguas abajo, que constituye la superficie de apoyo de los estribos y que mediante la forma que se dé a ellos permite llegar a las zonas mejores del terreno.

De esta forma, la componente horizontal del agua no está solamente equilibrada por los esfuerzos de deslizamiento de la junta hormigón-roca, reduciéndose, por consiguiente, el peso total de "agua + hormigón", lo cual implica una sensible economía en el volumen total del hormigón que constituye los contrafuertes.

Esta solución, en unión de la relación que antes citábamos entre T y N , es a todas luces muy interesante..

e) Por último, diremos que en Meicende la solución de bóvedas múltiples (figs. 8.^a, 9.^a y 10), además del factor de seguridad y estética conseguido, nos permitió economizar el 50 por 100 del volumen de hormigón y el 25 por 100 del presupuesto general sobre la solución de presa de gravedad. Los volúmenes totales vertidos fueron de 10 800 m.³ en bóvedas y contrafuertes y 2 000 m.³ en estribos y soleras.

La obra, que como antes dijimos se ejecutó en once meses, fué llevada a cabo por la Empresa Dragados y Construcciones, S. A., y colaboraron en el proyecto los Ayudantes de Obras Públicas D. Juan Amado y D. Luis González.

La pantalla de impermeabilización la realizó Cimentaciones Especiales, S. A.