

PRESA DE PORTODEMOUROS

Ing. C. C. P. M. SENDIN

CARACTERÍSTICAS GENERALES

La presa de tierra y escollera de Portodemouros, propiedad de Hidroeléctrica Moncabril, S. A., forma parte del aprovechamiento hidroeléctrico del mismo nombre, situado sobre el río Ulla, entre las provincias de La Coruña y Pontevedra, en el Noroeste de España. En altura era la cuarta de Europa, en el momento de iniciarse su construcción.

La presa embalsa unos 300 millones de metros cúbicos (de los cuales 250 son aprovechables para el salto), con una altura máxima de unos 90 metros; estas aguas se derivan a una central subterránea de pie de presa, situada en la margen izquierda del río y equipada con dos grupos turbo-alternadores con una potencia total instalada de 95 000 KVA. Este esquema se completa con un aliviadero de superficie, capaz para verter 1 500 m.³/seg., emplazado también en la margen izquierda, y un sistema de desagüe de fondo, en túnel, por la margen derecha, para el cual se ha aprovechado el túnel de desviación provisional necesario para las obras (fig. 2.^a).

EMPLAZAMIENTO

El emplazamiento de la presa se sitúa en rocas estratocristalinas del escudo primitivo de la región galaica. Se trata concretamente de pizarras metamórficas, generalmente silíceas en la margen izquierda, y más bien arcillosas en la derecha. El relleno con acarreo en el cauce es de muy poco espesor y fácil de eliminar, pero en la orilla derecha las pizarras arcillosas se presentan alteradas por una meteorización que alcanza en algunos lugares hasta 35 metros de profundidad, resultando en esa zona un terreno de cimentación que presenta más las características de una arcilla que las de una pizarra. A esta circunstancia se debe el hecho de que el perfil tipo de la presa en el estribo derecho es más robusto que en el resto de la obra, buscándose con ello una distribución más amplia de las cargas sobre un cimiento de calidad inferior.

La impermeabilidad del terreno es buena, en general, ya que el diaclasado de la roca es bastante cerrado y sólo aparecen algunas grietas locales de poca importancia y fácil tratamiento.

El clima de la región es marcadamente lluvioso, con una precipitación anual del orden de 1 500 mm. de altura, dividido en un breve período de verano en que las lluvias oscilan entre 30 y 60 mm. mensuales, mientras que en el período invernal, mucho más amplio, se alcanzan precipitaciones mensuales de 150 a 200 milímetros.

MATERIALES Y PERFIL TIPO

El carácter deficiente de la cimentación en la margen derecha y la mediana calidad de las rocas pizarrosas

locales para la fabricación de áridos para hormigones, junto con la falta de áridos naturales para ese mismo objeto, condujeron rápidamente a la elección de un tipo de presa de materiales sueltos, ya que las pizarras silíceas, abundantes en toda la orilla izquierda, podían dar materiales pétreos de relleno de calidad suficiente, al tiempo que las pizarras arcillosas meteorizadas ofrecían posibilidades para la obtención de un material para núcleo impermeable.

Ambos materiales, permeables e impermeables, se estudiaron minuciosamente antes de llegar a la solución final.

En cuanto a las rocas para rellenos permeables, se investigó, en primer lugar, su resistencia a la meteorización mediante ensayos de disgregación al sulfato sódico, encontrándose abundancia de materiales capaces de dar pérdidas en peso, en estos ensayos, inferiores al 5 por 100. También se tuvo en cuenta, para la estimación de las disponibilidades de roca sana, el porcentaje de testigos conseguido en los sondeos de reconocimiento.

El ángulo de rozamiento interno de estos pedraplenes se ensayó también directamente en escala casi natural, encontrándose valores de $\tan \phi$ superiores siempre a 0,70.

La densidad aparente de un relleno realizado con estas pizarras resultaba ser superior a 1,70 Tn./m.³.

Los materiales impermeables obtenidos de la meteorización de pizarras arcillosas presentan características de limos arcillosos: índice de plasticidad, muy bajo, 4 a 8 por 100; densidad Proctor, normal, 1,60 a 1,70, con humedades óptimas de 16 a 18 por 100, y coeficiente de permeabilidad siempre menor de 10^{-5} cm./seg., estando su rozamiento interno comprendido entre 0,60 y 0,70.

Este material para el núcleo contiene trozos en estados intermedios de meteorización, fácilmente disgregables por la acción de rodillos de pata de cabra; también contiene piedras no meteorizadas, pero en pequeña cantidad y tamaños.

Un punto importante, al proyectar un relleno de piedra fraccionada, es la previsión de las granulometrías que se esperan conseguir económicamente en la explotación de una cantera. De esa granulometría depende luego, en gran parte, tanto el espesor de las capas que se vayan colocando, como su tratamiento posterior, especialmente la compactación.

En el caso de Portodemouros la naturaleza pizarrosa de la roca no autorizaba a esperar una producción elevada de piedras de gran tamaño, por lo cual se concibieron los espaldones de la presa como constituidos fundamentalmente por materiales más bien menudos, con una dispersión de tamaños no demasiado amplia y, por tanto, no muy favorable a su encaje y asiento naturales, por cuya razón se consideró fundamental, además del riego con agua a presión, algún sistema complementario de compac-

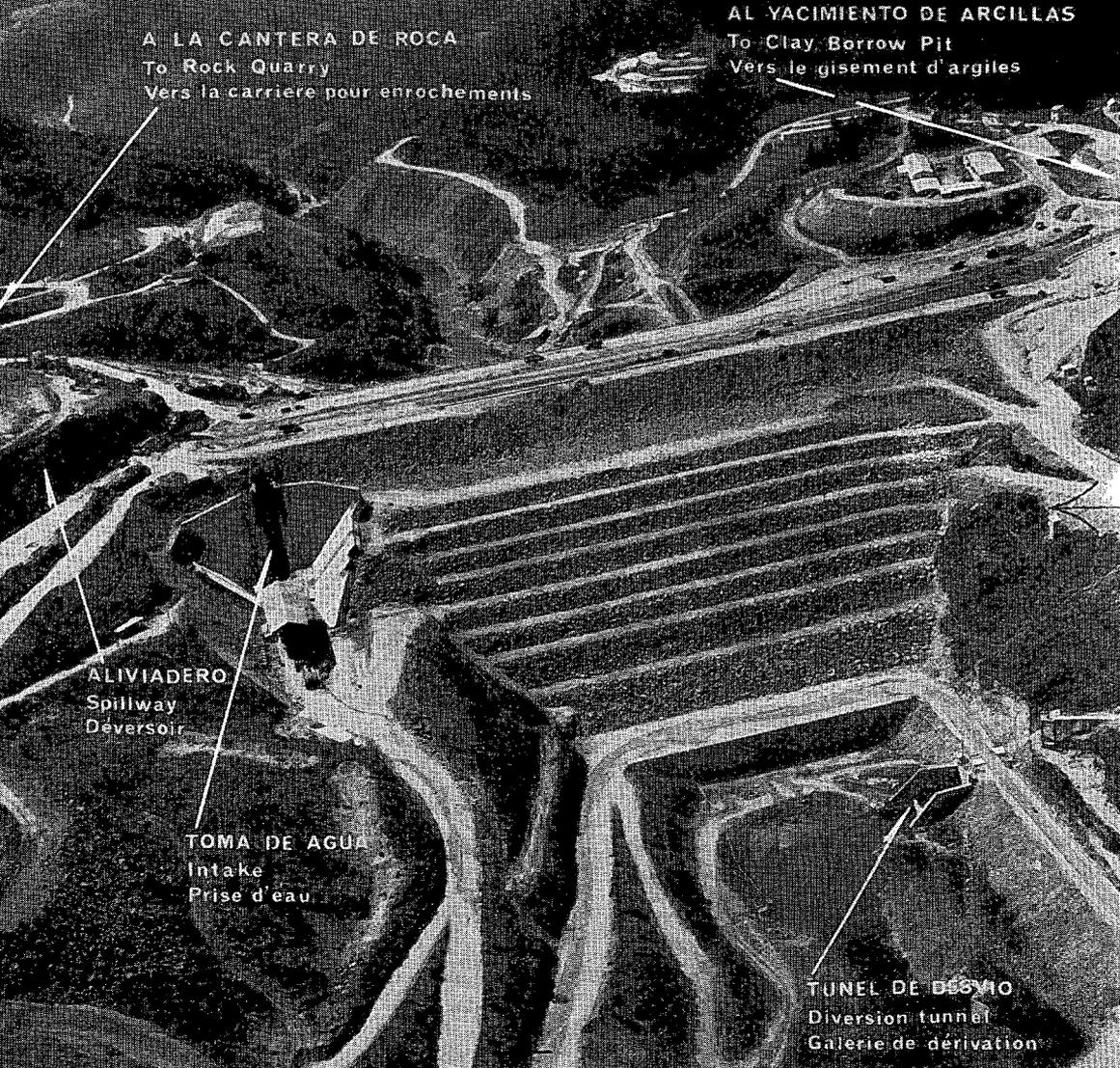


Fig. 1.^a — Portodemouros.

tación, que se confió en principio a rodillos vibratorios. Se limitó, en general, el tamaño máximo de estas piedras a unos 50 Kg., disponiéndose tongadas de un espesor máximo de 60 cm., susceptibles de ser compactadas con facilidad.

Los elementos gruesos producidos en la cantera se separarían para colocarse en forma de escollera simplemente vertida y regada en los paramentos de la presa, admitiéndose, en estas zonas, piedras de hasta 2 toneladas de peso y espesores de tongada del orden de 1,50 metros. La densidad aparente exigida era, en ambos casos, de 1,70 Tn./m.³.

Otra cuestión fundamental fue la elección entre núcleo impermeable interior y poco inclinado o, en alternativa, la adopción de una zona impermeable inclinada situada junto al paramento de aguas arriba: esta última variante suele llamarse, aunque impropriamente, núcleo exterior. Las ventajas constructivas de esta última solución en climas con inviernos húmedos, y, por tanto, poco favorables a la colocación de materiales arcillosos, separando en lo posible la ejecución de las zonas impermeables de la de los rellenos de roca, no dejaron de considerarse dadas las características meteorológicas de

la región. Sin embargo, las circunstancias locales pesaban mucho en favor del núcleo interior casi vertical, fundamentalmente porque la roca de cimentación es de mejor calidad en Portodemouros en la zona central del emplazamiento de mínimo volumen de presa, aparte de que el núcleo exterior conducía a mayores volúmenes de material para filtros —escasos en la región—. Finalmente, después de las consultas formuladas a seis grandes empresas constructoras interesadas en la obra, se decidió la adopción del núcleo interior, resultando en resumen un perfil tipo de presa tal como se ve descrito en la figura 3.^a.

El núcleo se compacta en capas delgadas —unos 25 centímetros de espesor— con rodillos de pata de cabra para ayudar a la trituración del material semimeteorizado abundante en los yacimientos utilizados, exigiéndose el 100 por 100 de la densidad Proctor normal y en todo caso una densidad mínima de 1,60 Ton./m.³.

Los filtros se formaban por capas diferenciadas, en número de dos aguas arriba, y tres en el contacto de aguas abajo.

Partiendo de las densidades exigidas en el Pliego de Condiciones y con coeficientes de rozamiento de 0,65, en

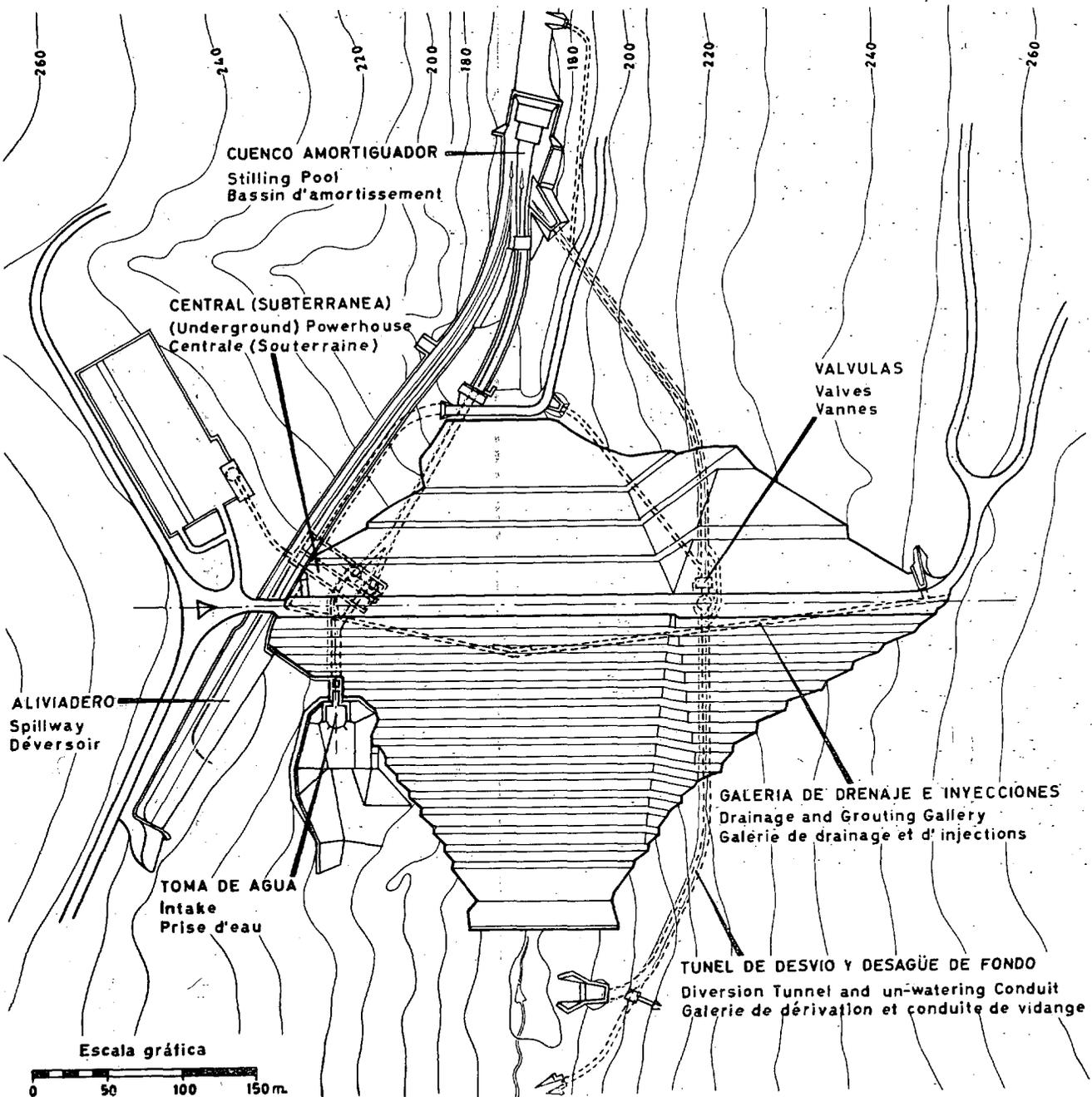


Fig. 2.^a — Presa de Portodemouros. Planta. (Portodemouros dam).

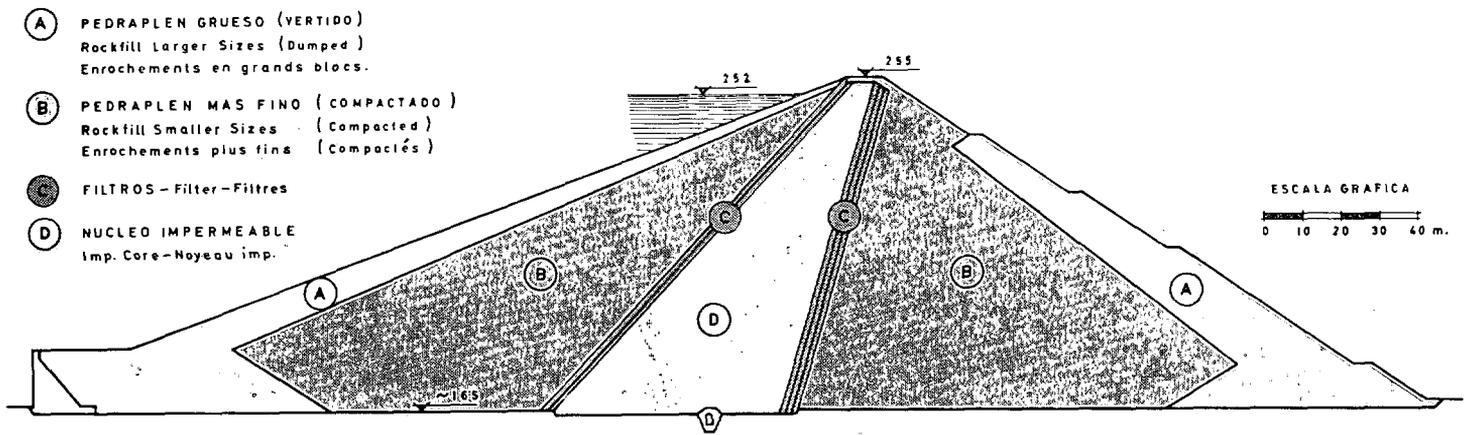
los rellenos de piedra y de 0,50 en el núcleo, los coeficientes de seguridad al deslizamiento, en sus diversas modalidades, resultan del orden de 1,5, cifra bastante prudente y en cuya adopción se ha tenido en cuenta la posibilidad de deterioro a largo plazo de algunas de las características físicas de la roca, susceptible de alguna meteorización.

El volumen total resultante para la presa es de 2 350 000 m.³ de los que casi 2 000 000 corresponden a los pedraplanes y 370 000 m.³ al núcleo impermeable.

Para el control del comportamiento de la presa durante su explotación se disponen sistemas de varillas telescópicas enterradas en el pedraplén para la medida de los asentos y piezómetros para la determinación del nivel interior del agua filtrante, así como mediciones topográficas de precisión.

CONSTRUCCION

La obra se comenzó a principios de 1964. Mientras se



GRANULOMETRIAS
Gradings - Granulométries

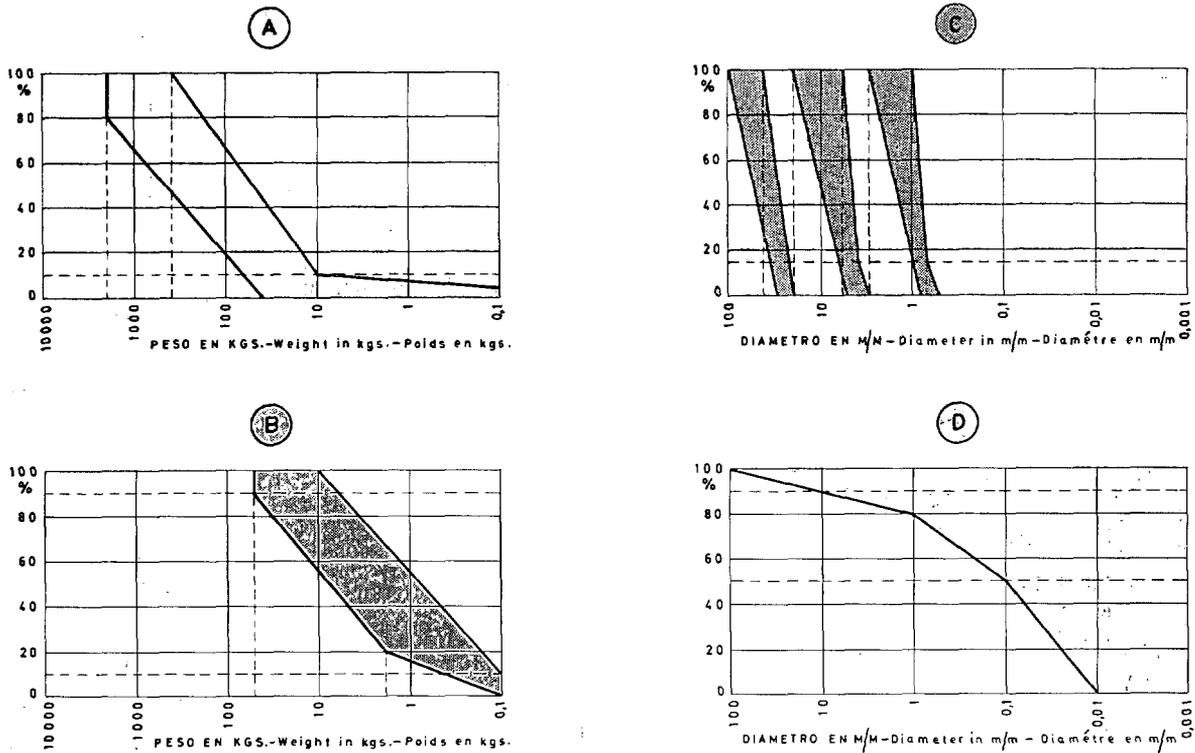


Fig. 3.^a — Portodemouros. Disposición primitiva. (Portodemouros Original lay-out Disposition primitive.)

realizaba la desviación del río y la construcción de las ataguías, se comenzó la preparación de la cantera de materiales pétreos que exigía la eliminación previa de una importante cantidad de material de recubrimiento, inútil para la construcción.

A comienzos de 1965 se empezaron a construir los pedraplenes y en el verano del mismo año se inició la construcción del núcleo. La obra se ha realizado en dos años de trabajo intenso y un tercer año de terminación con volúmenes mensuales mucho más reducidos que los dos anteriores (fig. 7.^a).

a) *Pedraplenes.*

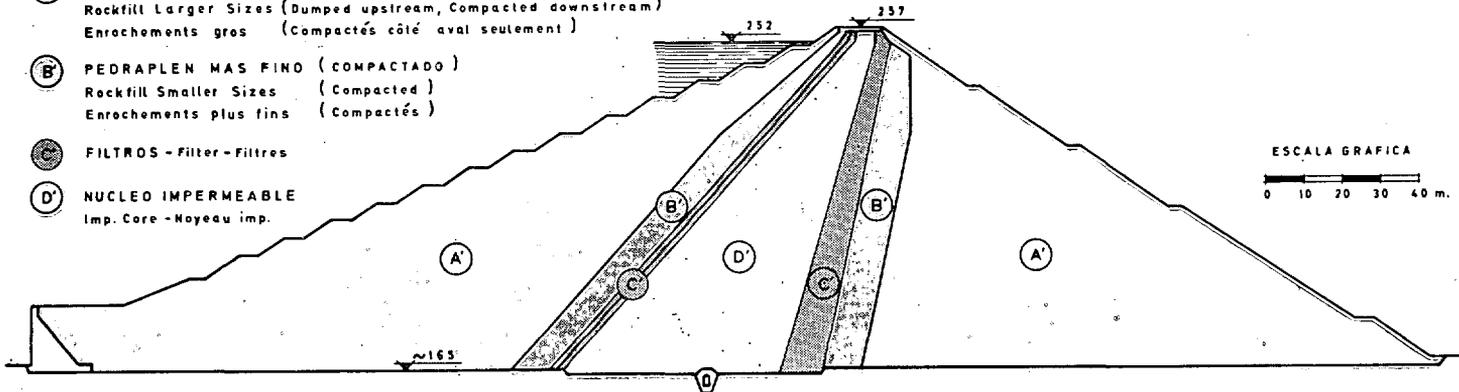
Desde el primer momento se controló con cuidado la densidad aparente resultante en los pedraplenes. Para ello se cubicaron zonas importantes (5 000 a 10 000 m.³ en cada ensayo) pesando los camiones que transportaban el material destinado a esas zonas. Los primeros ensayos demostraron que las densidades que se alcanzaban eran suficientes en lo referente a escollera o relleno grueso, pero deficientes en los rellenos más finos, que constituían por cierto la parte fundamental del pedraplén (zonas B de la fig. 3.^a). La razón fundamental parecía ser una distri-

(A) PEDRAPLEN GRUESO (VERTIDO A.ARRIBA, COMPACTADO A.ABAJO)
 Rockfill Larger Sizes (Dumped upstream, Compacted downstream)
 Enrochements gros (Compactés côté aval seulement)

(B) PEDRAPLEN MAS FINO (COMPACTADO)
 Rockfill Smaller Sizes (Compacted)
 Enrochements plus fins (Compactés)

(C) FILTROS - Filter - Filtrés

(D) NUCLEO IMPERMEABLE
 Imp. Core - Noyeau imp.



LAS LINEAS DE TRAZOS REPRESENTAN
 LAS GRANULOMETRIAS PRIMITIVAS

GRANULOMETRIAS

Gradings - Granulométries

Dotted lines correspond to
 original gradings
 Les lignes hachurées correspon-
 dent aux granulométries primitives

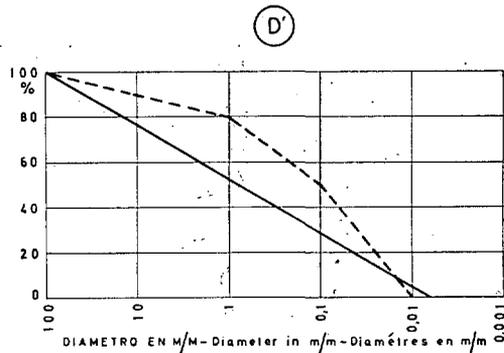
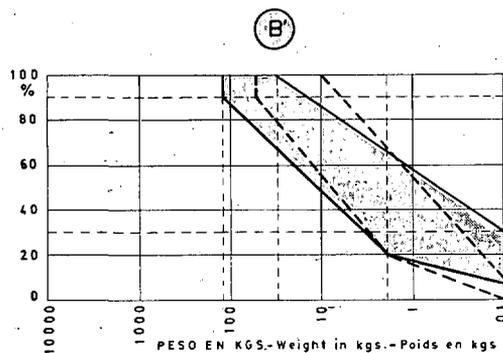
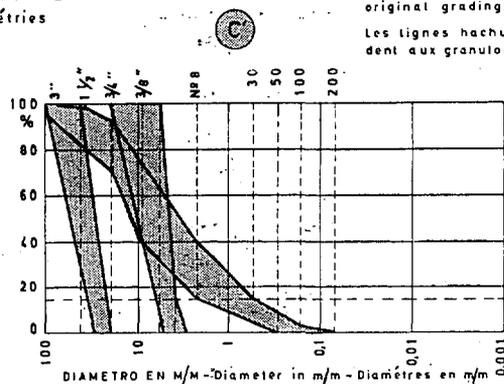
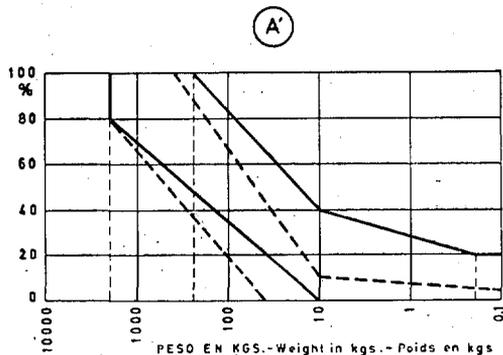


Fig. 4.^a — Portodemouros. Disposición final. (Portodemouros. Final lay-out. Disposition finale.)

bución de tamaños demasiado estrecha y una falta de regularidad en esas mismas granulometrías.

Efectivamente, la cantera de pizarra silíceas de la que se extraía este material, proporcionaba gradaciones de tamaños en una gama bastante más amplia de lo que se había supuesto, con abundancia de tamaños grandes perfectamente sanos y aprovechables. Sin embargo, para respetar los límites de tamaño máximo necesarios en relación con los espesores de tongada de 60 cm. especificados, una gran parte de este material grueso tenía que ser fraccionado posteriormente mediante taqueo, recurriéndose, en ocasiones, a pasar por machacadoras parte del material

obtenido. Estas operaciones, además de encarecer el producto, contribuían a su irregularidad. Intentar reducir la separación entre tiros en las voladuras principales para fraccionar más el material, conducía no solamente a costos elevados en perforación y explosivos, sino a un exceso de tamaños finos que no hubiera dado al relleno resultante la permeabilidad deseada.

A la vista de estos inconvenientes se reestudió la composición granulométrica y demás características de ejecución de los pedraplenes de la presa, al tiempo que se ensayaban sistemas de tiros en cantera hasta llegar a una casi completa identificación entre los productos de la

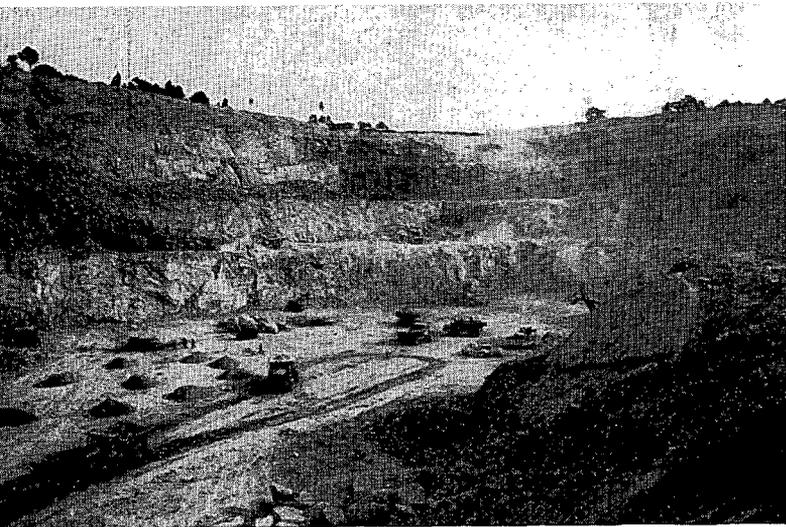
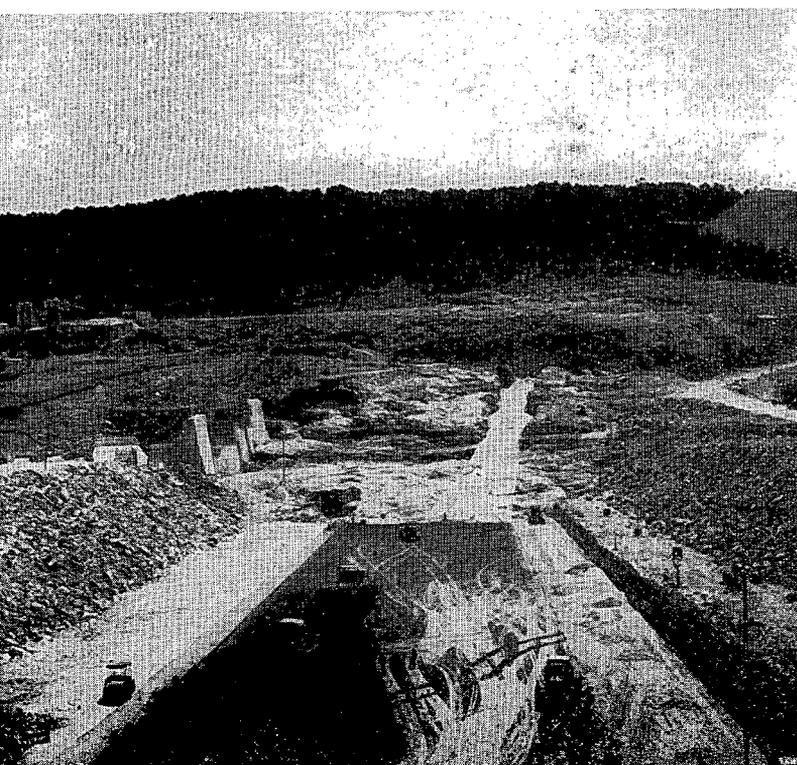


Fig. 5.^a — Cantera.
(Quarry).

explotación más económica de dicha cantera y las exigencias de los rellenos permeables de la presa.

Fundamentalmente se decidió construir la mayoría de estos rellenos permeables por tongadas francamente gruesas, admitiéndose en general tamaños máximos de 2 Ton., junto con una mayor tolerancia en la proporción de tamaños menores, tal como viene indicado en la figura 4.^a en las zonas designadas con la letra A'. Solamente en los contactos con los filtros se conservó el relleno por tongadas delgadas, aunque ampliando la tolerancia en los máximos y exigiendo, además, un porcentaje mínimo de finos, de forma que las líneas límites de la zona granulométrica admisible resultaban menos inclinadas, consiguiéndose así

Fig. 6.^a — Núcleo y filtros durante la construcción.
(Core and filters during construction.)



granulometrías más amplias en busca de una mayor compacidad. Estas zonas B' (fig. 4.^a) sirven así de transición entre los espaldones permeables y los filtros.

Por añadidura, y a la vista de los buenos resultados de densidad en los primitivos rellenos por tongadas gruesas, se suprimió la compactación de estos rellenos en el espaldón de aguas arriba.

Los resultados de todas estas medidas fueron óptimos e inmediatos. La densidad aparente de los rellenos gruesos, que venía siendo de 1,80 Ton./m.³, aumentó aún más, hasta 1,85 (con pequeñas diferencias entre la zona compactada y la simplemente vertida), siendo estos rellenos ahora la parte fundamental de la presa. En los rellenos más finos, utilizados ahora como simple transición a los filtros, las densidades, que primitivamente no pasaban de 1,65, aumentaron hasta 1,90. Todo ello, por otra parte, aprovechándose casi íntegramente los productos de la cantera, casi sin taqueo y apenas sin operaciones de separación de tamaños, las cuales se limitaban a tomar de la parte más menuda de las voladuras los elementos para las zonas de transición, cargándose todo el resto con destino a los espaldones gruesos. Por añadidura, tanto el número de taladros para las voladuras como el consumo de explosivos por metro cúbico arrancado descendieron, abaratándose considerablemente la producción.

El sistema, finalmente, adoptado para la explotación de esta cantera, consiste en la explotación por bancos escalonados de 12 a 15 m. de altura cada uno (fig. 5.^a), paralelamente, a cuyo frente se perforan dos filas de taladros, ligeramente más largos que la altura del frente, con 80 mm. de diámetro, espaciados unos 3 m. entre sí, cargados en su tercio inferior con dinamita-goma 2 (26 por 100 de nitroglicerina), mientras el resto se carga con sabulita 0-1 (16 por 100 entre perclorato potásico y tri-nitrotolueno), espaciando estos últimos cartuchos en mayor o menor proporción según la naturaleza local de la roca. La explosión se realiza con detonadores eléctricos con micro-retardos, usándose hasta 10 tiempos diferentes de explosión. El consumo de explosivos por metro cúbico, que había comenzado siendo de 600 gramos, se redujo luego a poco más de 200. Las voladuras suelen arrancar de 15 a 20 000 m.³ en cada vez, aunque en algún caso se llegó a los 50 000 m.³.

La carga se efectúa con palas mecánicas de 2 m.³ y de 1,5 m.³ de capacidad de cuchara y el transporte con camiones Euclid de 30 y 20 Ton. de capacidad.

El vertido de todos los rellenos gruesos se ha realizado por tongadas de 2 m. de espesor con riego de agua a presión y en el espaldón de aguas abajo se completa, además, con rodillos vibrantes de 4 y 7 Tons. de peso estático. Los rendimientos mensuales de colocación de pedraplenes llegaron a ser de casi 180 000 m.³, aunque una cifra normal puede considerarse la de 100 000 m.³ al mes.

Por otro lado, se cambió también la disposición original de los filtros, sustituyéndose el de aguas abajo por una capa única, variable de 6 a 10 m. de espesor, de material "todo uno", en el cual se utilizaron ampliamente los tamaños menudos de la explotación de la cantera y que suprimían la importante participación de mano de obra

necesaria en la construcción de filtros diferenciados, que obligan al uso de encofrados metálicos de separación entre sus distintas capas.

Algunas modificaciones adoptadas en el tipo de aliviadero impusieron, por otra parte, la necesidad de recrecer en 2 m. la altura total de la presa. También, por conveniencias de la construcción, se adoptó en el paramento de aguas arriba una disposición escalonada, utilizándose entre las distintas banquetas los taludés naturales de vertido de la roca.

El conjunto de todas estas modificaciones se refleja en la figura 4.^a, en la cual se pueden comparar directamente las exigencias granulométricas primitivas (representadas por líneas de trazos) con las finalmente adoptadas.

La enseñanza, a nuestro juicio, que se deriva de todo este conjunto de medidas y sus resultados es que la construcción de una presa fundamentalmente de escollera, debe adaptarse a los resultados de la explotación de la cantera de la cual proceden estos materiales, buscándose siempre el mejor aprovechamiento de ellos y la máxima economía y rapidez, ya que siempre se puede encontrar una utilización adecuada para los materiales que se obtengan dentro de la infinita gama de variantes posibles. Los modernos métodos de cálculo electrónico facilitan la rápida y continua comprobación de las condiciones de estabilidad de la presa, de acuerdo con las variaciones en los materiales que se vayan usando en ella.

b) Núcleo impermeable.

La colocación de materiales arcillosos para el núcleo no ha presentado imprevistos de importancia. Únicamente se hicieron algunas correcciones en los límites granulométricos especificados, ampliándose algo las tolerancias en el sentido de admitirse mayores proporciones de los tamaños gruesos y medios respecto a lo primitivamente exigido (fig. 4.^a).

Se preveía la utilización de rodillos de pata de cabra con cargas unitarias bastante elevadas para conseguir la trituración de los materiales de tránsito (pizarras perfectamente meteorizadas) combinados con otros rodillos más ligeros para terminar la labor de compactación. En la práctica se ha empleado, en promedio, aproximadamente, una hora de trabajo de equipo de compactación por cada 150 m.³ de material compactado, descomponiéndose este trabajo en una primera fase con rodillos de cargas unitarias de 50 Kg./cm.² de sección de las patas y el resto con cargas de unos 25 Kg./cm.². Los tiempos absolutos y las proporciones han variado, naturalmente, de acuerdo con las características del yacimiento, ligeramente cambiantes de unos períodos a otros. La compactación se ha hecho en general manteniéndose ligeramente del lado seco de la humedad óptima y las densidades resultantes se han mantenido siempre por encima de 1,60, alcanzándose con frecuencia 1,80 sin grandes dificultades.

El control de esta densidad se ha realizado por los métodos convencionales de medición directa en cavidades excavadas en el material compactado. El número de

ensayos de control ha sido en término medio de 1 cada 60 m.³ de material puesto, lo cual significa un control superior al que normalmente se acostumbra. Se justifica esto por las características del yacimiento, relativamente heterogéneas por ser el resultado de un proceso de meteorización no completamente terminado.

La única verdadera dificultad en el núcleo ha sido la causada por la frecuencia de las lluvias que impedían a veces la compactación en la zona de humedad óptima Proctor. De cinco a diez días de lluvia en el mes ya producían interrupciones frecuentes y, en consecuencia, disminuciones notables en el rendimiento, y cuando el número de días lluviosos se acercaba a quince en un mismo mes, llegaba a ser prácticamente imposible la compactación de materiales impermeables. La cifra máxima puesta en un mes ha sido de 73 000 m.³, pero en varios meses de verano no ha podido pasarse, por estas razones, de los 30 000 m.³. Se tomaron, por supuesto, todas las precauciones habituales en estos casos, aplanando con rodillos lisos la superficie recién compactada cuando eran de temer lluvias y cubriendo además esta superficie con láminas de plástico extendidas en el suelo durante los períodos de lluvia.

También en el yacimiento de las tierras se hizo lo posible por evitar la penetración de la humedad o por facilitar su eliminación; se excavaron zanjas de drenaje alrededor de la parte en explotación y hasta se llegó a recubrir con un revestimiento asfáltico la superficie en algunas zonas durante el período de invierno.

Las operaciones de carga se hicieron siempre con excavadoras; en caso de haberse podido arrancar siempre el material directamente de un frente vertical se habrían reducido las posibilidades de empapamiento, pero, en general, era necesario escarificar previamente ese material para permitir el trabajo de las palas mecánicas, y este trabajo previo tiene el inconveniente de facilitar la entrada de lluvia por la superficie así removida. En general el yacimiento no era muy impermeable en su estado natural, por la presencia de fisuras y restos de diaclasas de la pizarra, lo cual hacía relativamente rápida, tanto la penetración de las aguas como su eliminación una vez que se presentaba el tiempo seco.

Estas dificultades de colocación de tierras en las épocas lluviosas, al frenar la elevación de la zona del núcleo acababan frenando también la colocación de materiales permeables a ambos lados de él, ya que la posibilidad de elevación de estos espaldones por encima del nivel del núcleo es, naturalmente, limitada. En la figura 6.^a puede verse un ejemplo de desnivel permisible entre núcleo y espaldones.

En estas condiciones la marcha de la obra acusa un paralelismo bastante exacto entre la colocación de materiales impermeables y la de núcleo, como puede apreciarse en la figura 7.^a. Se comprueba en este gráfico la paralización completa en la colocación de rellenos de piedra durante el invierno 1966-67, debido a la imposibilidad de seguir construyendo los pedraplenes mientras no se pudiera reanudar con regularidad la colocación del núcleo.

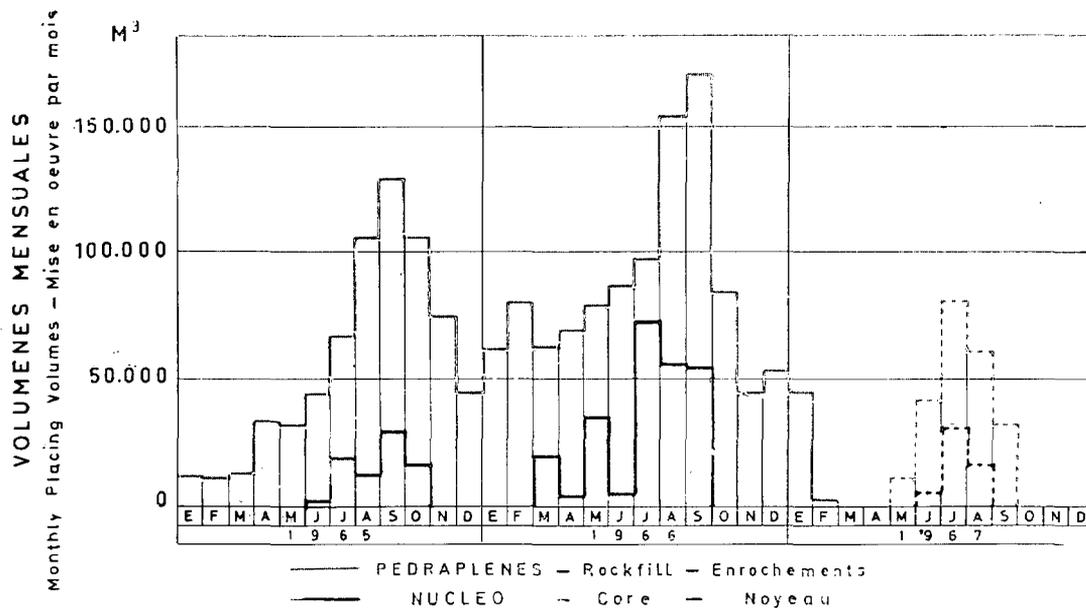


Fig. 7.a — Desarrollo de la obra.
(Progress of the construction).

c) Asientos de construcción.

La presa no está totalmente terminada en la fecha de redacción de estas líneas (junio 1967), pero ya se tienen los primeros datos de los asientos registrados por las varillas telescópicas que se han dejado empotradas en el espaldón de aguas abajo. La reducción de altura de una columna vertical de material de la presa es del orden del 4 por 100, a nivel de cimientos, con una carga de pedraplén de unos 70 m. de altura, es decir, con la presa ya próxima a su mayor elevación; esta cifra se considera normal para este tipo de obras.

CONCLUSIONES

Creemos conveniente resaltar las dos enseñanzas principales que la construcción de esta presa nos ofrece.

La primera es que en lo referente a rellenos de piedra fragmentada el proyecto debe seguir, por decirlo así, a la construcción. Es prácticamente imposible predecir mediante ensayos a pequeña escala los resultados de la explotación de una cantera de la que se van a extraer quizá millones de metros cúbicos. Son esos resultados reales los que, al descubrirnos la naturaleza exacta de los materiales obtenidos, permitirán definir con detalle las

características y dimensiones de los rellenos en la presa adaptando, dentro de unos ciertos límites, el proyecto de ésta continuamente a la producción de la cantera, en la seguridad de que esto dará siempre la solución más económica. Volvemos a decir que hoy día es fácil recalcular cuantas veces sea preciso la estabilidad de una presa de materiales sueltos en el curso de la obra con la rapidez necesaria para no producir en ésta demoras que trastornen su ejecución.

Por otro lado, aunque se trata de una cuestión cuya importancia es teóricamente reconocida por todos, conviene insistir en que las perturbaciones que en los trabajos de compactación de materiales impermeables pueden producir las lluvias, deben ser consideradas cuidadosamente y con un prudente pesimismo, ya que su importancia práctica creemos que no ha sido siempre bien apreciada. La utilización de núcleos exteriores, al permitir ejecutar los pedraplenes con casi absoluta independencia de la colocación de tierras, da una flexibilidad a la obra que puede compensar con mucho los aumentos teóricos de costo de esta solución respecto a la de núcleo interior. En esta cuestión tienen la palabra los constructores de estas obras que, en sus proposiciones para la ejecución de ellas, deben valorar con el mayor realismo estas circunstancias para no ser víctimas de ellas posteriormente.