

LA EXPERIENCIA ESPAÑOLA EN EL PROYECTO DE LAS PRESAS DE MATERIALES SUELTOS

Dr. Ing. C. C. P. A. ALVAREZ

Dr. Ing. C. C. P. J. M. PEIRONCELY

1. MISCELANEA HISTORICA

Desde la más remota antigüedad el hombre ha construido presas para almacenar agua o para hacerla pasar a canales y emplearla con usos diversos, riegos, movimiento de molinos, etc. Sin embargo, las que han llegado hasta nosotros son normalmente presas de fábrica constituidas por un muro de mampostería, aunque intervengan también otros materiales. Indudablemente fueron también construidas presas utilizando tierras mezcladas con ramares, troncos, etc. pero éstas han sido más vulnerables a la acción destructora del tiempo y del agua.

Dejando aparte realizaciones anteriores hay que llegar hasta el siglo pasado para encontrar las primeras presas de importancia hechas con tierra, y es precisamente en regiones secas y poco habitadas en América, en especial de Estados Unidos, donde comienza a desarrollarse esta nueva forma de construir. Posteriormente se introduce en la construcción un nuevo material, la escollera, con sistemas diversos de impermeabilización, y ya es en la mitad de nuestro siglo cuando comienza el verdadero e importante desarrollo de esta técnica, aprovechando las nuevas herramientas que proporciona la mecánica del suelo, los ensayos en laboratorio y los cálculos con ordenador electrónico, para sistematizar completamente la resolución del problema y tendiendo a que la presa ha de aprovechar precisamente los materiales disponibles en la zona de que se trate, con tal de que el conjunto cumpla las dos condiciones siguientes:

- 1.^a Resistencia ante el empuje hidrostático.
- 2.^a Impermeabilidad suficiente.

Se pierde así la distinción que antes existía entre presas de tierra y presas de escollera llegándose, en cambio, al moderno concepto de presa de materiales sueltos, que se acercará más o menos a uno de los tipos anteriores, según predomine un determinado material.

En 1950 existían en el mundo más de 200 grandes presas de tierra y escollera, mientras que en España contábamos con el reducido número de solamente 6. Tenemos que llegar a los últimos años para ver cómo España despierta de esa cierta apatía para construir presas de materiales sueltos y se lanza de lleno por esta moderna técnica.

2. CAUSAS QUE HAN RETARDADO EL DESARROLLO EN ESPAÑA DE LAS PRESAS DE MATERIALES SUELTOS

Planteado el hecho de que en España ha existido un cierto retraso en la construcción de presas de materiales sueltos, a pesar de haber sido siempre uno de los primeros países en cuanto a número de presas en explotación, pasamos a examinar las razones que lo han motivado.

2.1. Tradición constructiva.

Quizá la desarrollada y antigua tradición de construcción de presas en España haya dificultado el abrir rutas nuevas, ya que sabiendo resolver con facilidad el problema de construcción de una presa de fábrica había menos necesidad de buscar materiales distintos.

2.2. Maquinaria disponible y costes comparativos.

El perfeccionamiento y puesta a punto de la maquinaria capaz para mover grandes volúmenes de material, y para compactar tierras y materiales granulares, permitiendo obtener rendimientos cada vez más elevados, y con mayor eficacia, es lo que ha facilitado el gran desarrollo moderno de las presas de materiales sueltos. Una presa de hormigón requiere siempre un porcentaje más elevado de mano de obra que otra de materiales sueltos, y el hecho de que la mano de obra tenga un encarecimiento constante, mientras que hay un abaratamiento relativo de la producción en serie y la mecanización, hace que actualmente sea siempre más elevado el coste de una presa de gravedad que otra de materiales sueltos siendo únicamente la presa bóveda la que económicamente puede competir en condiciones ventajosas si las condiciones resistentes de la cerrada permiten su construcción.

Este fenómeno de la mayor economía relativa de las presas de materiales sueltos a medida que avanza la mecanización de las obras públicas, ha sido paralelo en todos los países del mundo, y quizá se pueda fijar el entorno de 1960 como el punto de transición para España. Anteriormente a esa fecha, las menores disponibilidades de maquinaria, y una mano de obra menos cara, hacían que fuese lógico seguir pensando en presas de gravedad o de contrafuertes.

2.3. Calidad de la cimentación.

En época pasada la ingeniería española consideraba la presa de materiales sueltos como una solución en la que cabía pensar únicamente cuando la cimentación poco resistente no era compatible con la estabilidad de una presa de fábrica, pero que resultaba menos económica por el volumen mucho mayor de material requerido.

Se buscaba siempre establecer las presas en los sitios de condiciones geológicas mejores, lo cual no era difícil de lograr dada la constitución del suelo español. Recientemente, a medida que ha ido aumentando el número de presas, y esto a un ritmo considerablemente fuerte, son cada vez más numerosos los casos en que se necesitan aprovechar embalses, cuyo cierre no tiene las características que anteriormente se deseaban. Así se ha visto cada vez más la conveniencia de recurrir a la solución de materiales sueltos, y hoy día, incluso en cerradas con buena cimentación resulta más económica la presa de materiales sueltos, que otra de gravedad o de contrafuertes. Únicamente la presa bóveda sigue siendo más ventajosa, pero no siempre las condiciones topográficas y geológicas de la cerrada permiten su construcción.

2.4. Aliviadero.

Los ríos españoles son casi siempre de régimen muy irregular, con caudales de avenidas notablemente altos.

Esto determina que casi siempre las presas en España tengan un aliviadero con capacidad elevada, cuyo coste repercute considerablemente en el conjunto del proyecto.

El citado hecho de tener que disponer un aliviadero de gran capacidad puede romper el equilibrio normal entre la presa de materiales sueltos y la de fábrica haciendo que ésta sea más ventajosa.

En paralelo con el aliviadero está el problema del desvío del río durante la construcción, ya que es evidente que los riesgos por vertido en construcción son notablemente mayores en una presa de fábrica que en una de materiales sueltos.

Debemos apuntar también que es normal que un país comience la explotación de sus recursos, tanto para fines hidroeléctricos como para regadíos, en los puntos de mayor rentabilidad económica, y éstos suelen darse en aquellos lugares en que el río está ya constituido y puede tener, por tanto, avenidas fuertes. Los puntos indicados dificultan por las razones dichas anteriormente la elección de soluciones de materiales sueltos. Hoy día en cambio hay que tratar de construir presas, bien sea en ríos secundarios y con avenidas más reducidas, ya sea en los tramos de cabecera de los ríos principales y tanto en unos como en otros tienen menor importancia los problemas de evacuación de avenidas, ya sea durante la construcción, o en la vida normal de la presa.

En esta situación están las presas construidas en España con fines hidroeléctricos en las partes bajas de los ríos en que la magnitud de los aliviaderos hizo desechar cualquier posibilidad de solución en materiales sueltos.

En el caso de San Esteban en el Sil, Aldeadávila y Saucelle en el Duero, Torrejón y Alcántara en el Tajo, Mequinenza y Ribarroja en el Ebro, todos ellos con caudales de avenidas superiores a los 5 000 m.³/seg. en donde la posibilidad de verter sobre coronación ha impuesto prácticamente el tipo de presa.

3. CARACTERÍSTICAS PROPIAS DE LA PRESA DE MATERIALES SUELTOS

Ya hemos dicho anteriormente cómo hoy día en España, e incluso en cerradas con buena cimentación, resulta más barato en general la presa de materiales sueltos que una de gravedad o de contrafuertes, salvo que la importancia del aliviadero desequilibre la comparación en sentido contrario. También se ha dicho cómo la razón está en que la presa de materiales sueltos requiere menor porcentaje de mano de obra, mientras que la maquinaria a emplear en movimiento y compactación de los materiales obtiene rendimientos cada vez más favorables.

Examinemos ahora cuáles son las peculiaridades propias de la presa de materiales sueltos que la diferencian sustancialmente de una de fábrica.

3.1. Geometría de la cerrada.

En principio la presa de materiales sueltos es menos sensible a la geometría de la cerrada que una presa de hormigón, por el hecho de que al ser el precio unitario del material relativamente bajo los aumentos de volumen no condicionan la economía de la obra en el mismo porcentaje que las presas de hormigón.

Ello repercute favorablemente en las etapas iniciales de los estudios, ya que permiten conjugar el binomio máximo embalse con mínima altura de presa sin que el condicionante de la geometría de la cerrada influya de forma tan decisiva como sucede en las presas de fábrica.

En particular en emplazamientos de gran longitud de coronación, la presa de materiales sueltos suele ser más ventajosa, y tanto más cuanto mayor sea la altura por el condicionante del precio reducido del material y las menores cargas transmitidas al cimientó.

3.2. Flexibilidad para adaptarse a las condiciones características de la cerrada.

Las presas de fábrica tienen una geometría definida, de tal modo que resisten el empuje hidrostático, transmitiéndolo a la cimentación en unas direcciones determinadas, siendo imprescindible que la cimentación, tanto el fondo del cauce como las laderas, sean capaces de absorber con deformabilidad menor que la permitida, los empujes que reciben. Hay que agregar, naturalmente, a los empujes de la presa los que la cimentación recibe directamente provenientes del embalse y tener siempre en cuenta la posibilidad de existencia de presiones intersticiales que van en detrimento de la estabilidad.

En particular la presa bóveda carga sobre el cimiento de forma hiperestática con un gran coeficiente de seguridad respecto de problemas locales de cimentación, pero la presa de gravedad o de contrafuertes en valles anchos, es decir, cuando el efecto de descarga tridimensional sobre las laderas deja de ser apreciable, forma un conjunto de bloques independientes cuyo coeficiente de seguridad óptimo está definido por la resistencia del plano de contacto sobre el terreno fundamentalmente a esfuerzo cortante siendo, por tanto, mucho más sensible a problemas locales del cimiento sobre todo en los casos límites.

La presa de materiales sueltos, respecto de problemas de deformabilidad vuelve a participar de las característi-

agua arriba hasta obtener con toda sencillez la debida continuidad al sistema de impermeabilización.

7

Así, la presa de Aldehuela de Liestos, de escollera con núcleo arcilloso inclinado, ha sido proyectada a la entrada de un cañón de calizas senonenses aprovechando que la estratificación atraviesa el río con buzamiento hacia agua arriba, y que encima de las calizas existen margas. Para conseguir que el núcleo quede enlazado con las margas impermeables, tanto en el fondo de valle como en ambas laderas, y que esta condición se logre con el menor volumen posible de presa, se han adoptado en los taludes de agua arriba de la presa y del núcleo, superficies que no son planas.

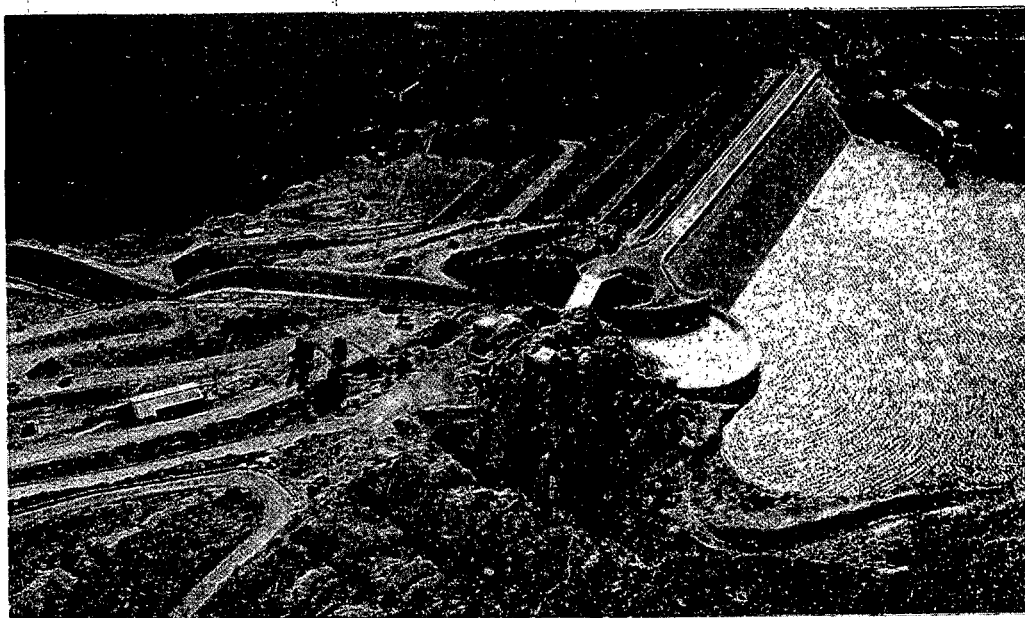


Fig. 1. — Presa de Guadarranque. Vista general.
(Guadarranque dam. General view.)

cas de la bóveda por su mayor posibilidad de acoplarse a problemas de mayores deformaciones locales, incluso de mayor grado que la bóveda.

La diferencia se acentúa considerando que las funciones, resistencia e impermeabilización pueden, de hecho, quedar separadas en la presa de materiales sueltos. Imaginemos que a la entrada de un cañón calizo y, aunque resistente, bastante permeable, existe un paquete margoso al cual podemos confiar la impermeabilidad. Una presa de fábrica tendrá dificultades de realización, ya que no podrá apoyarse en el paquete blando, mientras que puesta sobre el cañón de calizas resultará difícil obtener la debida continuidad de estanqueidad. En cambio, una presa de materiales sueltos desarrollará su espaldón resistente en la parte estrecha y prolongará su núcleo hacia

En Guadarranque (fig. 1) se aprovechó la existencia de un paquete delgado de areniscas orientadas en sentido normal al eje del río para la cimentación del núcleo impermeable de arcilla seleccionada al que se le adosaron dos espaldones de tierras.

La indicada adaptabilidad de la presa de materiales sueltos a las condiciones de la cerrada (geométricas y de calidad del cimiento) hace que sea mucho menos sensible que la presa de fábrica a variaciones de coste por imprevistos con respecto a la cimentación. Ello, a nuestro juicio, tiene una gran importancia en la valoración comparativa de soluciones. Nos parece evidente la afirmación de que no es posible, por muchos reconocimientos que se hagan, predecir en un proyecto el tratamiento de todos y cada uno de los accidentes de un cimiento de presa y es

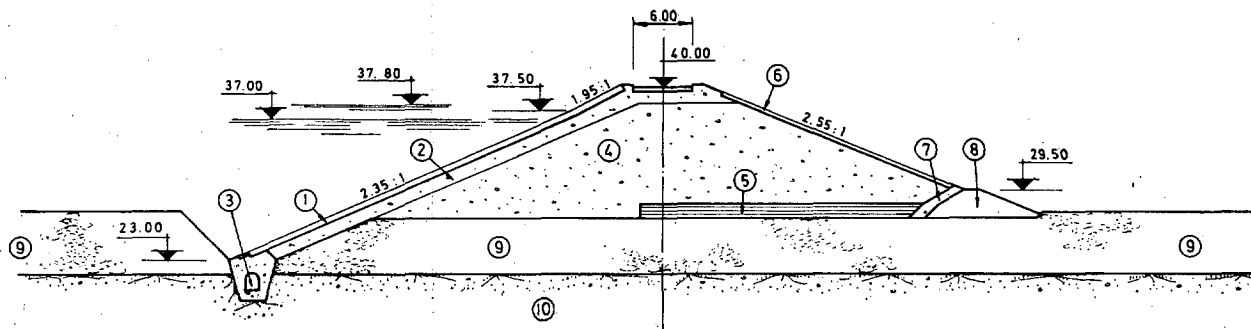


Fig. 2. — Presa de Aboño. Sección principal. 1, pantalla bituminosa; 2, grava y arena fina con compactación complementaria normal al paramento; 3, galería perimetral; 4, grava y arena fina compactadas; 5, dren; 6, protección de hierba; 7, escollera fina; 8, escollera gruesa; 9, sedimentos; 10, marga.

(Aboño dam. Main section: 1, bituminous membrane; 2, gravel and fine sand with complementary compaction normal to slope; 3, perimetral gallery; 4, compacted gravel and fine sand; 5, drain; 6, grass protection; 7, fine rockfill; 8, coarse rockfill; 9, streambed material; 10, marl.

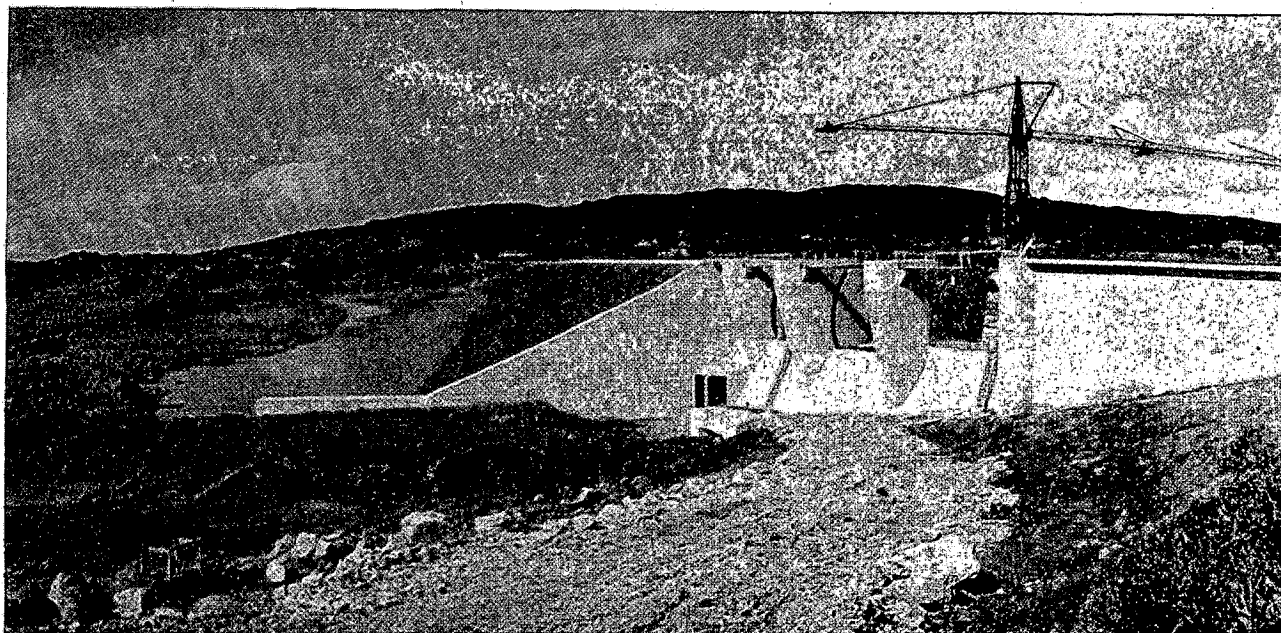


Fig. 3. — Presa de Aboño. Vista de agua arriba.
(Aboño dam. Upstream view.)

también claro que cuando en todos y cada uno de estos accidentes se debe conseguir simultáneamente estanqueidad y deformabilidad admisible, el problema puede ser mucho más complicado que cuando los límites admisibles de la deformabilidad son mucho más amplios, por lo cual los imprevistos en una presa de materiales sueltos suelen ser notablemente menores.

Los ritmos de construcción pueden ser también más rápidos, lo que ha hecho que en algunos casos (presa de Santillana) este motivo haya sido el condicionante de la elección del tipo de presa.

3.3. Adaptación a los materiales existentes.

En general en toda obra, pero mucho más en una presa de materiales sueltos, debe el Ingeniero buscar cómo realizarla con materiales disponibles en las inmediaciones, a fin de conseguir la máxima economía. Es decir, evitará el dejarse llevar por la apetencia de construirla con un volumen mínimo, de lograr taludes que sean un alarde por sus pendientes y, en general, no deberá proyectarla con arreglo a un determinado tipo concebido de antemano.

Lo que siempre deberá ser mínimo dentro de los már-

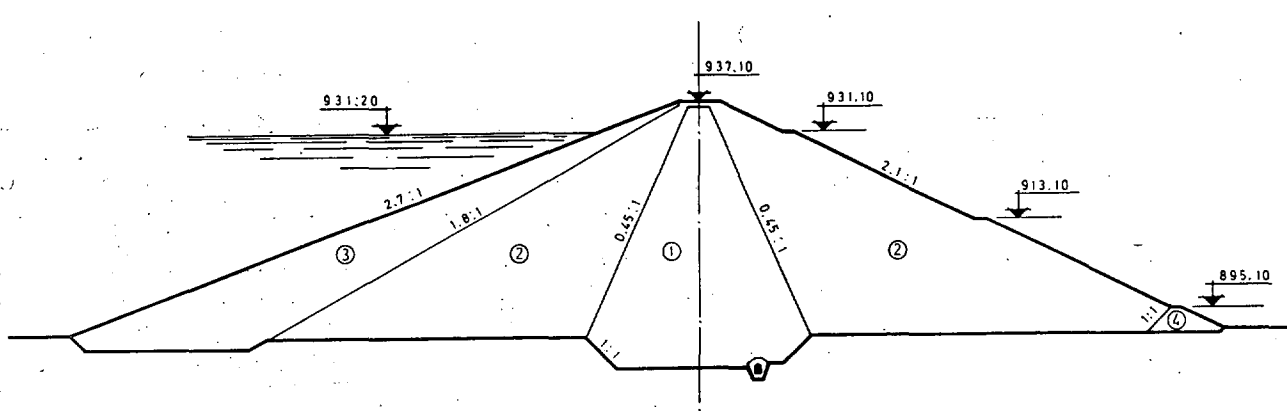


Fig. 4. — Presa de Retuerta. Sección principal: 1, núcleo impermeable; 2, grava con arena y arcilla compactadas; 3, grava gruesa.

(Retuerta dam. Main section: 1, impervious core; 2, compacted gravel with sand and clay; 3, coarse gravel).

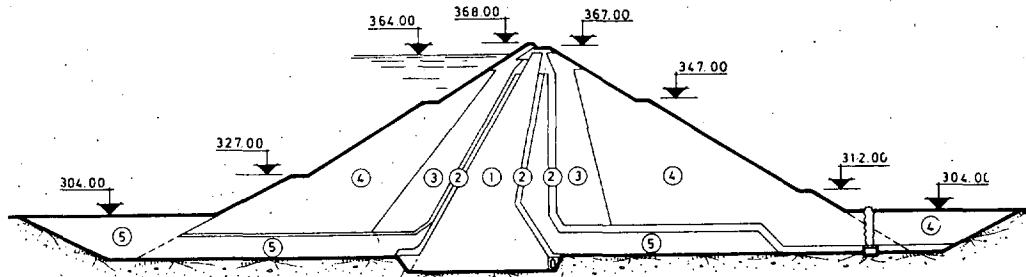


Fig. 5. — Presa de Guadalteba. Sección principal: 1, núcleo impermeable; 2, filtro; 3, escollera compactada; 4, escollera vertida; 5, arenisca compactada.

(Guadalteba dam. Main section: 1, impervious core; 2, filter; 3, compacted rockfill; 4, dumped rockfill; 5, compacted sandstone.)

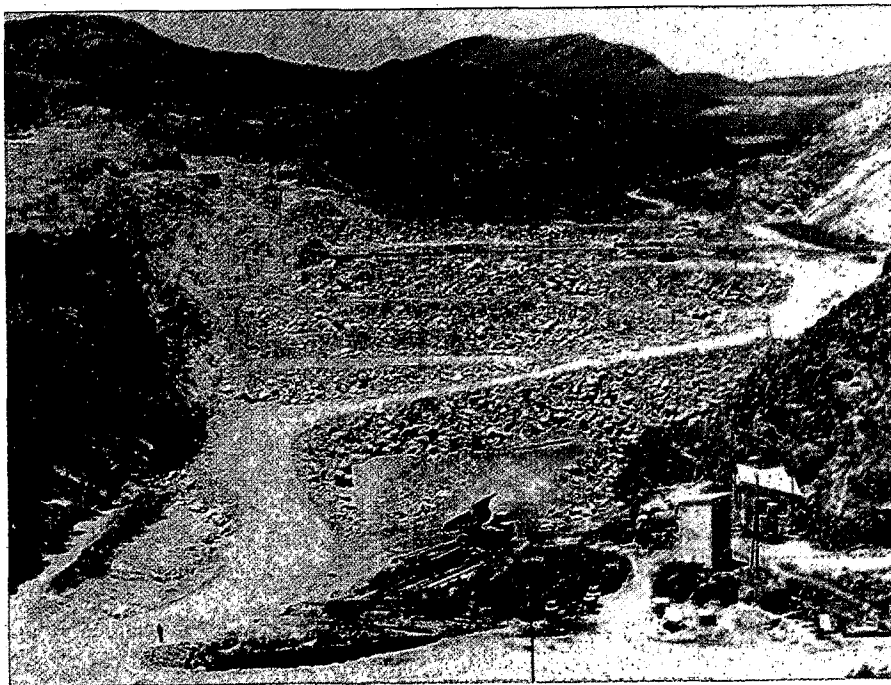


Fig. 6. — Presa de Guadalteba. Colocación de escollera en el espaldón de agua abajo.
(Guadalteba dam. Construction of the downstream fill.)

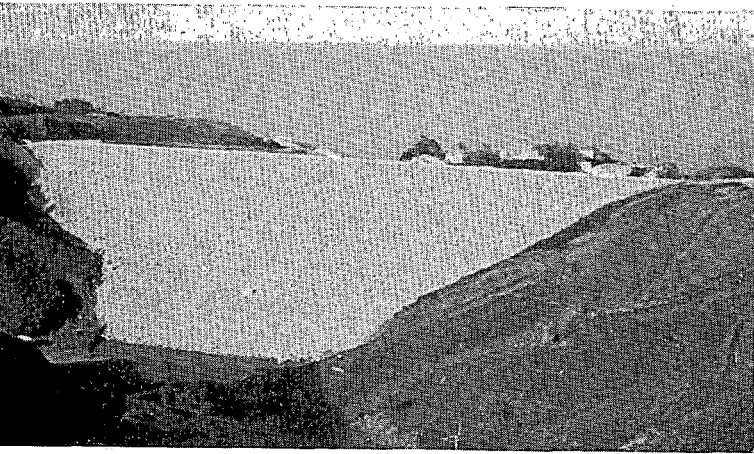


Fig. 7. — Presa del Renegado. Vista de agua abajo.
(El Renegado dam. Upstream view.)

genes de seguridad exigidos será el coste total, es decir, el producto volumen total por precio unitario.

La presa de materiales sueltos, más que ninguna otra estructura, deberá proyectarse de acuerdo con las disponibilidades de materiales, ya que los volúmenes a mover son siempre muy grandes. Habrá que estudiar cómo combinar los materiales existentes en la zona en la forma que resulte más económica y ventajosa y se tenderá a que sólo en casos excepcionales hay que llevar materiales de zonas alejadas.

Este ha sido el caso de las tierras de Guadarranque

posteriores, consecuencia de los movimientos tectónicos, se fragmentan con facilidad al compactar. Podemos decir que se trata de una presa de microescollera y arena.

El conjunto tiene un ángulo de rozamiento medio $\phi = 40^\circ$ y un coeficiente de permeabilidad $K = 10^{-5}$. Después de la compactación, con un rodillo vibrante ABG de 11 toneladas, se llega a obtener una densidad $\gamma = 2,3$.

En la presa de Retuerta (fig. 4), tanto en la cerrada como en sus inmediaciones, son muy abundantes sedimentos oligógenos constituidos por gravas redondeadas y arcilla. El ángulo de rozamiento del conjunto es $\phi = 35^\circ$, pero resulta bastante impermeable, y por eso ha sido necesario adoptar una disposición con zonas drenantes ejecutadas con los elementos gruesos del material separados por cribado.

En Guadarranque (fig. 1) el material de la localidad proporcionó unos excelentes espaldones. En Guadalteba (figs. 5 y 6) se han conseguido los tapices impermeables con las arenas arcillosas procedentes de la excavación de las areniscas miocenas aprovechando las posibilidades de mejorar las condiciones impermeables del material en el proceso de compactación.

En El Pardo las arenas miocenas de la zona, tan abundantes en las proximidades de Madrid, han suministrado el material de los espaldones.

Por otra parte, siempre que ha habido una cantera de piedra fácilmente explotable en las proximidades se han utilizado para la ejecución de escolleras. Este es el caso de los granitos de Guadarrama para Santillana y Valmayor, las calizas cretáceas de las vascongadas para Undurraga, las calizas jurásicas de la presa de Guadalteba

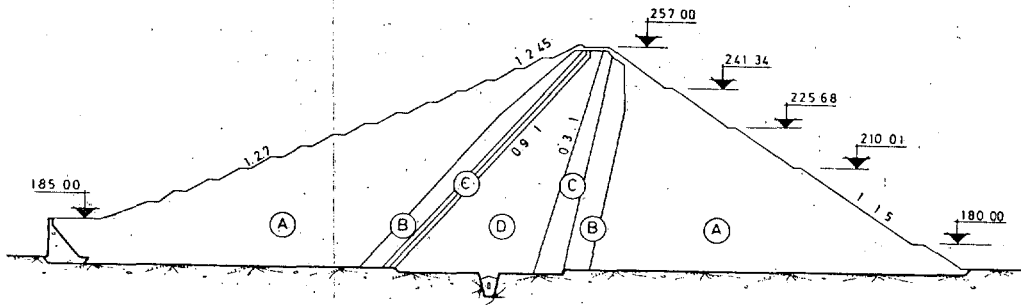


Fig. 8. — Presa de Portodemouros. Sección principal: A, escollera gruesa (vertida agua arriba, compactada agua abajo); B, escollera de pequeños tamaños (compactada); C, filtros; D, núcleo impermeable.

(Portodemouros dam. Main section: A, rockfill larger sizes (dumped upstream, compacted downstream); B, rockfill smaller sizes (compacted); C, filters; D, impervious core.)

(fig. 1), en donde la utilización de material local condicionó la estructura, las gravas con arenas finas de Aboño, etcétera.

La presa de Aboño (figs. 2 y 3) se ha construido aprovechando unos depósitos cretácicos, muy abundantes en las proximidades, y que por ser de formación litoral están constituidas por gravas redondeadas mezcladas con arena fina. Los granos de grava, por efecto de fuertes presiones

y de la presa de El Renegado (fig. 7), las grauwackas del Piedras y las pizarras de Portodemouros (fig. 8).

La posibilidad de utilizar acarreos fluviales para los espaldones ha sido utilizada en Argós y nos parece que será utilizada con profusión en un futuro próximo, dada la economía de manejo y facilidad de compactación de este material, existiendo ya varias presas propuestas de estas características (Villamarchante y La Balmá entre ellas).



Fig. 9. — Presa de Undurruga. Excavación del aliviadero.
(Undurruga dam. Excavation of the spillway.)

3.4. Posibilidad de modificar el proyecto durante construcción.

La presa de materiales sueltos ofrece otra ventaja que es su adaptabilidad. Especialmente la bóveda, pero también una de gravedad o de contrafuerte, una vez comenzada deberá seguirse con las directrices iniciales tanto de formas geométricas como de características de materiales.

Es siempre un problema modificar una presa de fábrica, añadiendo masa en ciertas zonas, pues será difícil lograr una buena unión entre ambos materiales, si esto es lo deseable.

Un caso realizado con éxito es el de la presa de Los Angeles de San Rafael, pequeña bóveda construida exclusivamente con fines turísticos deportivos, en que iniciada la construcción se decidió aumentar el espesor en la base; se creaba una junta semivertical entre el hormigón ya colocado y el nuevo hormigón, y aunque en ella los esfuerzos tangenciales resultaban pequeños se utilizó resina Epoxi para lograr mejor adherencia.

En cambio no hay ningún inconveniente en añadir material en cualquier parte de una presa de materiales sueltos, ya que con facilidad se consiguen condiciones de enlace adecuadas. Además, mientras que la presa de fábrica parece exigir una continuidad y regularidad en sus formas externas, no repugna una presa de materiales sueltos cuyos taludes sean completamente irregulares, asemejándose a los taludes naturales.

En este sentido no hay inconveniente en introducir modificaciones cuando esté mediada la construcción para adaptarse a nuevas circunstancias o condiciones que pudiesen surgir en los materiales que se utilicen.

La anterior condición de continua adecuación y adaptación del proyecto durante la construcción, si fuese necesario, tiene ventajas, ya que así podemos empezar sin gran riesgo la presa, aunque su proyecto no esté totalmente ultimado, ganando tiempo en el plazo total.

Ello tiene un particular interés en la cimentación sobre terrenos no muy impermeables, en donde la ejecución de tapices de arcilla adosados al parámetro de agua arriba

para alargar el recorrido de las filtraciones es siempre posible, como de hecho se hizo en Guadalupe, aprovechando el material procedente de las excavaciones.

3.5. Aliviadero y desvío del río.

Hemos examinado ventajas importantes a favor de las presas de materiales sueltos; en cambio, la parte negativa de las mismas fundamentalmente procede de su posible vulnerabilidad en caso de que el agua vierta por encima de ellas.

Esto supone que, hasta el presente, no estamos en condiciones, aunque es posible pueda conseguirse en un futuro próximo, de disponer el aliviadero sobre la propia presa, tal como es normal en la presa de gravedad, en la que tenemos fácilmente un aliviadero con un gasto adicional mínimo. En una presa de contrafuerte también será relativamente barato adaptarla para hacerla vertedero y, finalmente, en la presa bóveda el sobre coste resultará casi despreciable si es posible un vertido sobre coronación, sin tener una lámina de agua incompatible con las características de la estructura o si se pueden establecer compuertas a media altura.

En cambio, en la presa de materiales sueltos y sobre todo para grandes caudales, el aliviadero puede plantear inconvenientes, aunque la construcción de aliviaderos laterales, aprovechando collados existentes, como Guadalupe, para 2 000 m.³/seg. de capacidad, o centrales con vertido en canales enterrados dentro del cuerpo de hormigón. De esta última forma se ejecuta el aliviadero de la presa de Undurraga (fig. 9), capaz para 200 m.³/seg.

En general consideramos que siempre será preferible emplear el mínimo volumen posible de hormigón, a costa de que haya que aumentar el volumen de excavaciones, ya que normalmente los productos procedentes de la excavación del aliviadero podrán emplearse en ejecución de propia presa. Sin embargo, este aprovechamiento tiene como lado negativo el hecho de que la excavación con formas definidas es siempre más cara que la explotación de una cantera y que los materiales que se obtengan pueden tener cualidades que no sean idóneas.

En presas de materiales sueltos de mediana altura la solución del vertedero sobre un cuerpo de hormigón puede ayudar a resolver la desviación del río haciéndola a través de dicho cuerpo, evitando de esta manera la ejecución de túneles de desvío. Ello puede resultar particularmente interesante en valles relativamente anchos, en los que es posible situar dicho cuerpo de hormigón fuera del cauce del río.

En la presa de Aboño (fig. 3), de poca altura pero con 400 m. de longitud, se construyó un macizo de hormigón en el que se dispusieron el aliviadero, las tomas de agua y los desagües de fondo. Este macizo se situó en el estribo derecho y no en el centro, para que la colocación de escollera pudiese desarrollarse en un único tajo con toda la longitud; se construyó al principio de la obra y se dejó en él un conducto de suficiente amplitud para desviar el río a través de dicho conducto. Gracias a las disposicio-

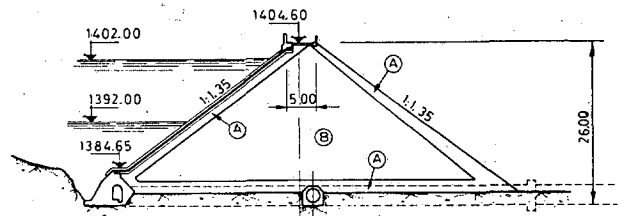


Fig. 10. — Presa de Aiguamoix. Sección principal: A, escollera colocada; B, escollera vertida.

(Aiguamoix dam. Main section: A, placed rockfill; B, dumped rockfill.)

nes que se dejaron, el cierre de este desvío pudo hacerse con toda facilidad cuando se terminó la presa.

El problema de Undurraga (fig. 9) se resolvió con criterios similares en este caso en un cuerpo central por dificultades geológicas para la cimentación de un cuerpo de hormigón en las laderas y situando en él todos los elementos necesarios para la toma, desviación provisional y aliviadero.

La vulnerabilidad de las presas de materiales sueltos al paso del agua por encima de ellas influye también des-

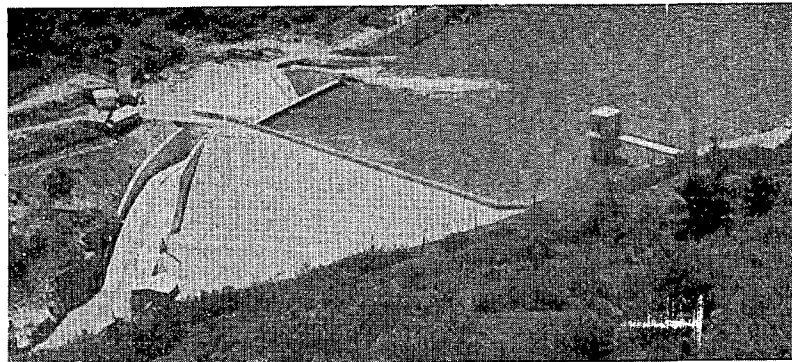


Fig. 11. — Presa de Aiguamoix. Vista general.

(Aiguamoix dam. General view.)

favorablemente en el desvío del río. Este deberá ser dimensionado con capacidad amplia para que no sea posible tal vertido por encima de la presa, o habrá que condicionar la construcción de la presa desarrollando un programa que permita ganar la altura suficiente en épocas en que no sean de tener avenidas. Todo ello redundará en encarecimiento de la obra.

En cualquier caso la vulnerabilidad de la presa a un vertido sobre la coronación depende en gran modo del material de la misma. Es decir, consideramos debe evitarse cualquier riesgo de vertido sobre tierras o acarrees, aunque la presa de Cubillas, de tierra, sufrió durante su construcción el paso por encima de una avenida de cierta consideración, a pesar de lo cual fue muy reducida la

7

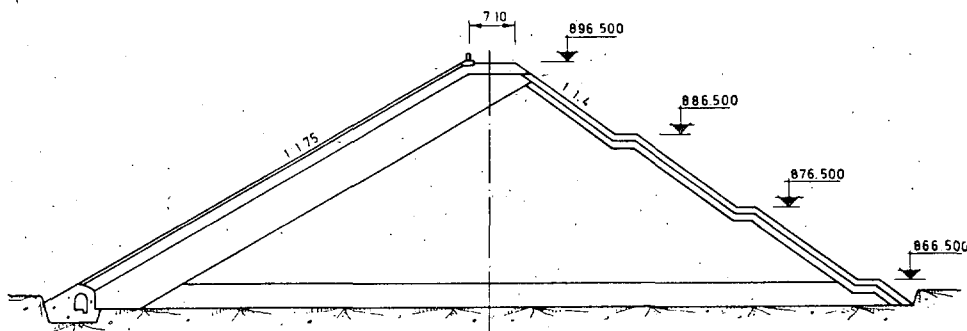


Fig. 12. — Presa de Santillana. Sección principal.
(Santillana dam. Main section.)

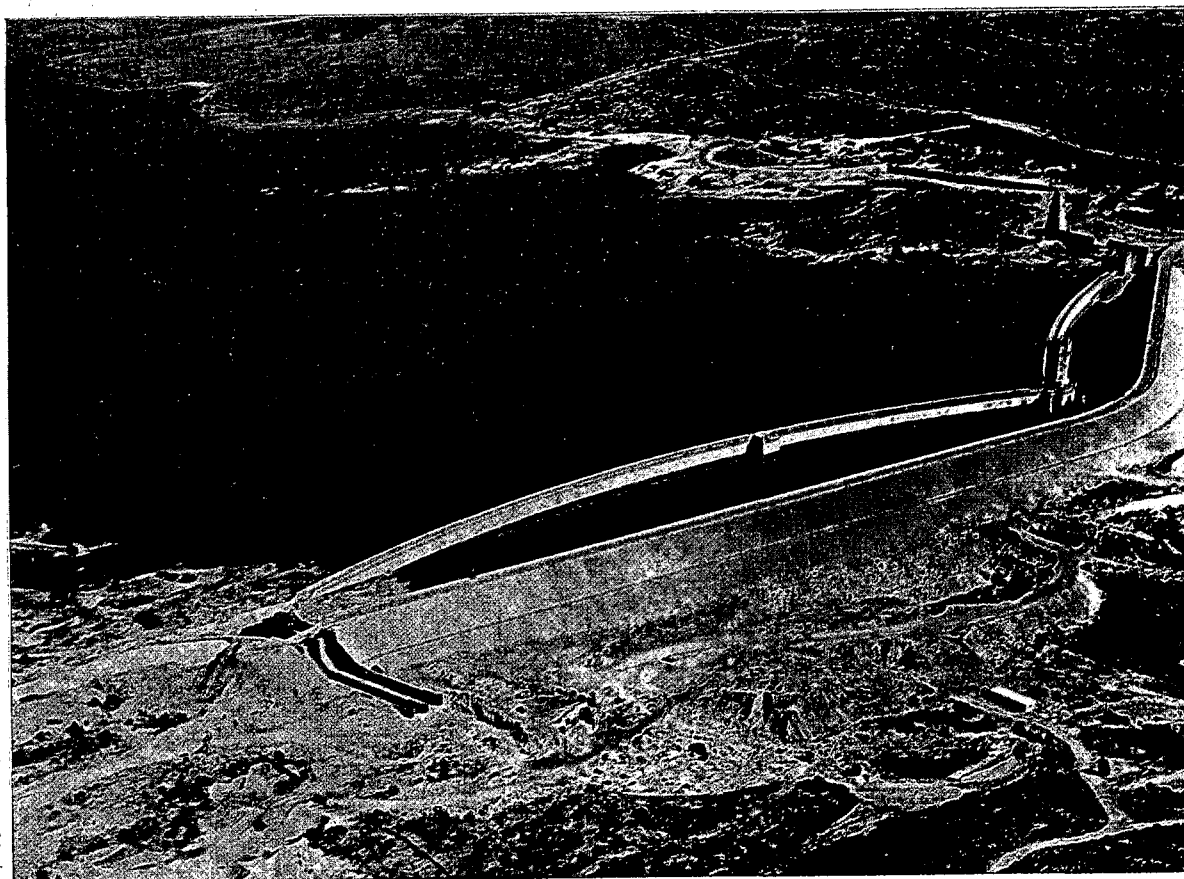


Fig. 13. — Presa de Santillana. Vista general.
(Santillana dam. General view.)

erosión producida. En escolleras compactadas en la que una selección de tamaños para colocar piedras de gran tamaño en el paramento de agua abajo y la precaución de impedir movimientos aislados de las mismas mediante sujeción con hierros redondos a modo de gaviones gigantes parece no haya grave inconveniente en el paso de avenidas por encima.

El vertido sobre coronación ocurrido en la presa del Piedras de grauwacka compactada, en la que se observaron las precauciones antedichas, es un ejemplo positivo a favor de este tipo de presas, ya que la estructura fue

capaz de soportar una sobreelevación y vertido en construcción de 0,60 m., sin que se acusara ningún desperfecto en el material.

Es evidente que las posibilidades de vertido dependen en gran modo del espesor de lámina vertiente que sea lógico esperar en las avenidas evacuadas; es decir, en valles anchos, en que el caudal de avenida se repartirá en gran longitud de presa; originando una altura de lámina pequeña no habrá inconveniente grave en vertidos sobre la presa, tanto durante su construcción como en su fase definitiva, con tal de que se adopten las dispo-

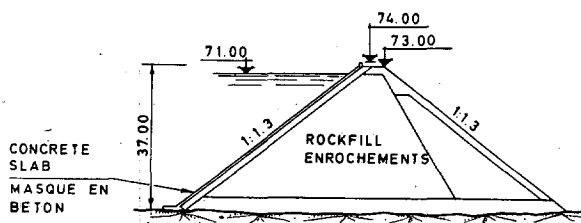


Fig. 14. — Presa del Piedras. Sección principal.
(Piedras dam. Main section.)

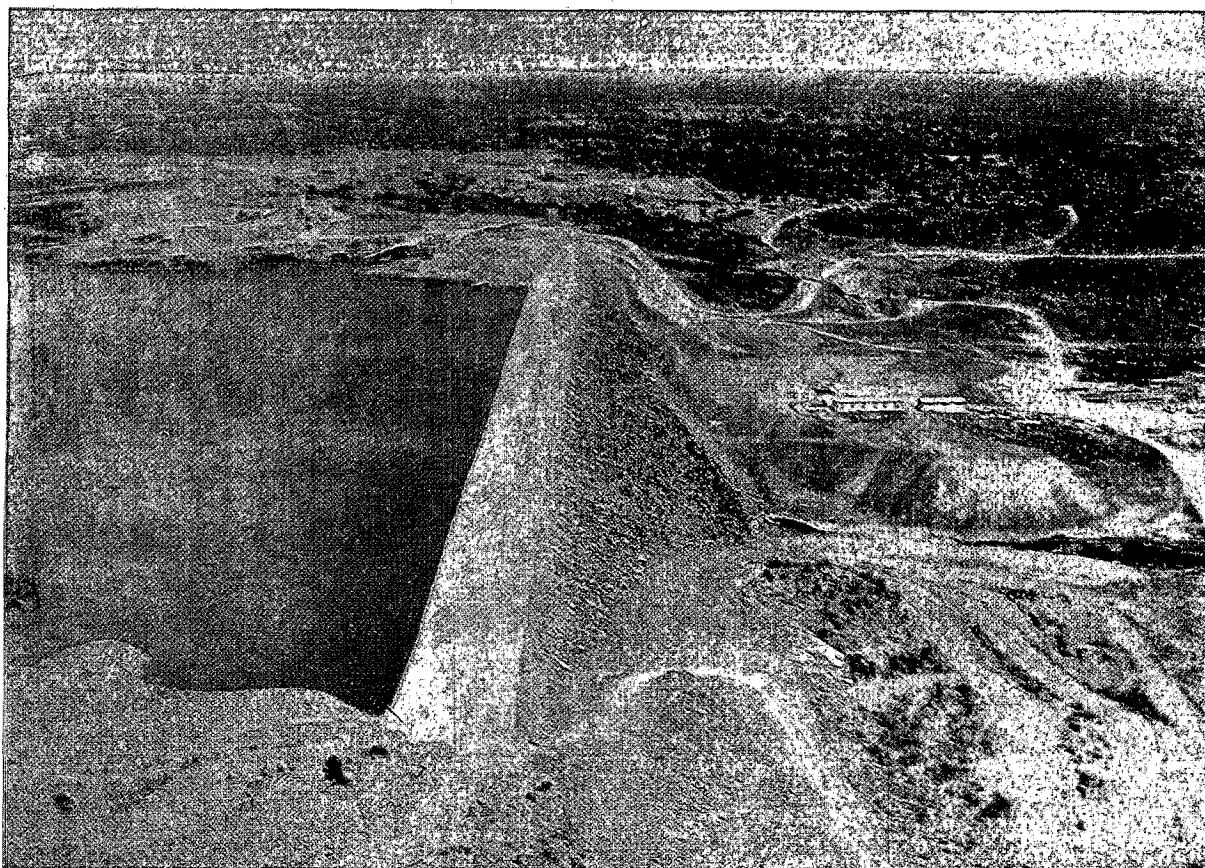


Fig. 15. — Presa del Piedras. Vista de la pantalla de hormigón armado sin juntas.
(Piedras dam. View of the reinforced concrete screen without joints.)

siones indicadas anteriormente. Esto permitirá reducir considerablemente los costes del aliviadero y de las operaciones de desvío del río.

Podremos incluso pensar en presas de escollera sin aliviadero con evacuación de las avenidas por encima de la presa, siempre que las láminas sean reducidas, lo cual puede suceder en presas de gran longitud de coronación.

Actualmente se realizan investigaciones, y éstas deben intensificarse, encaminadas a determinar qué tipo de protección sería necesario en el paramento de agua abajo, en función de la máxima lámina de agua potable, para asegurar que no se producirán ninguna clase de erosiones ni daños.

4. TIPOLOGIA DE PRESAS DE MATERIALES SUELTOS

Las exigencias de resistencia e impermeabilidad necesarias en una presa pueden satisfacerse con un material homogéneo, participando las diversas zonas en una y otra función. Tenemos así la clásica presa de tierras, cuyas primeras realizaciones se remontan a tiempos lejanos.

Al establecer una diferenciación clara de cometidos resulta más idóneo confiar la resistencia a materiales gruesos, y en este sentido surgió a primeros del presente siglo la presa de escollera, en la cual un determinado dispositivo realiza la función de impermeabilización.

Actualmente, y para tratar de adaptarse mejor a los materiales más ventajosos, se realizan también presas que están en una escala intermedia entre los extremos antes indicados y en las que una parte tiene fundamentalmente misión resistente, mientras que otra actúa como impermeabilizadora.

De todas formas podemos concebir un esquema que abarca los diferentes posibles tipos de presas de materiales sueltos y que comprende también las de escollera y de tierra.

Es el siguiente:

a) Espaldón de agua abajo que ha de resistir el empuje hidrostático y que está en condiciones más desfavorables con el embalse lleno.

b) Dispositivo de impermeabilización.

c) Espaldón de agua arriba que ha de resistir los empujes que originan las presiones intersticiales cuando se produce un desembalse rápido.

En las presas de tierra, el sistema de impermeabilidad, núcleo, está hipertrofiado y llega a abarcar toda la presa, pero consideramos interesante señalar la tendencia a incorporar un drenaje central en chimenea a las presas de tierra homogénea para disminuir el efecto de las tensiones intersticiales (presa de El Pardo y presas de la Compañía Minera Riotinto). En las presas de escollera con pantalla superficial se reduce a cero el espaldón de agua arriba, ya que se supone no existirán presiones intersticiales como consecuencia de un desembalse, y que el espaldón de agua abajo, sobre el cual se apoya la pantalla, tiene estables ambos taludes, tanto con carga en el embalse como con éste vacío.

Examinaremos a continuación los distintos dispositivos de impermeabilización que, aparte de su propio coste, tienen influencia decisiva sobre los taludes de los espaldones y, por consiguiente, sobre el coste total de la presa.

4.1. Pantalla agua arriba.

La pantalla en el paramento de agua arriba presenta la gran ventaja de poder ejecutar la presa con un volumen mínimo y, por consiguiente, con la máxima economía en espaldones, ya que todo el volumen de la presa queda libre de presión intersticial.

En España se han realizado presas con pantalla constituida por losas de hormigón armado, y también otras con revestimiento de hormigón asfáltico, existiendo, finalmente, una presa, la de Aiguamoix (figs. 10 y 11), en la cual la pantalla está constituida por láminas de productos sintéticos. No ha habido, en cambio, ninguna con pantallas de otro tipo como es el caso de la presa Salazar, en Portugal, cuyo sistema de impermeabilización lo constituyen plantas metálicas soldadas con pliegues o fuelles cada ciertos intervalos para permitir dilataciones y contracciones.

Las pantallas bituminosas tan desarrollados hoy día en Europa han tenido franco éxito en España, donde han sido construidas recientemente las presas de Almendra, Santillana (figs. 12 y 13) y Aboño (figs. 2 y 3). Se logra con facilidad una excelente impermeabilidad, aunque queda la incógnita de cuál podrá ser el comportamiento del betún, con posibles agrietamientos o fisuraciones en el mismo. Claro está que este inconveniente podrá remediarse con facilidad, haciendo unas impregnaciones superficiales con productos asfálticos o similares.

En general, en España se ha utilizado el esquema de la triple pantalla bituminosa con una capa drenante entre dos impermeables, conectada a una galería de servicio con excelentes resultados de explotación (filtraciones inferiores a un l./s.).

Sin embargo, nosotros pensamos que en presas de mediana altura, sobre cimiento de buena calidad y con escollera drenante puede hacerse un sistema más económico, suprimiendo el drenaje propio de la pantalla y la galería de servicio, lo que puede suponer un ahorro importante en los proyectos.

Por otro lado hay otra característica importante desfavorable para las pantallas bituminosas, y es el hecho de que hoy día, y para conseguir una buena compactación del conglomerado, bituminoso, no está resuelto el poder hacer pantallas con taludes más inclinados que 1,75 o a lo sumo 1,70. Esto, en casos de utilizar espaldón con escollera de buena calidad como es la procedente de bloques de cantera, supone un desaprovechamiento de material; es decir, el tener que construir el espaldón de la presa con mayor volumen de lo que estrictamente sería necesario por razón de su estabilidad.

Las pantallas de hormigón armado resultan más baratas que las de conglomerado asfáltico y tienen la gran

ventaja de poderse hacer en buenas condiciones con taludes más inclinados, llegándose sin dificultad al talud de 1,3 con el consiguiente ahorro de volumen de espaldón. Sus inconvenientes proceden de que asientos de cierta magnitud en la escollera podrán producir fisuraciones de la pantalla, ya que ésta es mucho menos flexible que la pantalla asfáltica.

El antiguo concepto de las losas conjuntas, formando una especie de teclado de piano con losas rígidas y juntas deformables, se está sustituyendo por el de losas continuas sin juntas horizontales con armadura central, admitiendo el trabajo del hormigón en fisuración para adaptarse a las deformaciones impuestas por la escollera.

Este concepto tiene la ventaja de permitir una mayor deformabilidad local y eliminar los puntos de discontinuidad, que suponen las juntas y las experiencias realizadas hasta ahora en España con pantalla conjunta de zócalo como única junta horizontal y juntas verticales cada 15 m. han sido muy positivas. Así está la presa del Piedras (figs. 14 y 15) con resultado francamente bueno.

Es discutible si conviene seguir manteniendo la junta del zócalo o no, y, a nuestro juicio, la conveniencia o no de junta perimetral depende de la altura de la presa y de las condiciones geométricas de la cerrada.

En cualquier caso, la junta de zócalo siempre merece una atención especial, pero no debe olvidarse que un tapiz de material impermeable, obtenido vertiendo arcilla en el contacto zócalo-pantalla, puede resolver el problema de la estanqueidad de la junta y que esta operación puede o bien preverse desde el principio, o realizarse *a posteriori* incluso a embalse lleno.

Por otro lado, los inconvenientes que hemos expuesto pueden tener las pantallas de hormigón armado con consecuencia de los asientos que puedan producirse en la escollera después de terminada la pantalla. Ahora bien, es un hecho cierto que se han reducido notablemente los asientos registrados en las presas actuales, gracias a que normalmente se realiza durante la construcción una compactación enérgica y eficaz. No cabe hablar hoy día de una pantalla construida sobre un espaldón de escollera, vertida sin compactación. La razón estriba en que la compactación apenas encarece la obra ni disminuye su ritmo de ejecución, y con escasas pasadas del rodillo compactador se consiguen los resultados deseados. Como consecuencia lógica de ello resultará en el futuro un mayor desarrollo de las presas con pantalla de hormigón armado, ya que parece quedan resueltos los problemas que anteriormente existían y que además su coste es hoy día bastante inferior al de las pantallas bituminosas, sobre todo por una menor exigencia de taludes. En cualquier caso, la elección entre ambos tipos de pantalla depende de la importancia relativa de las filtraciones respecto del caudal regulado.

4.2. Núcleo impermeable.

La impermeabilización con pantallas en el paramento de agua arriba, aparte de permitir una reducción en el

volumen total de presa, tiene la gran ventaja de que el tajo de puesta en obra queda reducido a una sola unidad, cuya ejecución económica puede afinarse al evitar las interferencias con elementos diferentes. Esta consideración es especialmente importante en las presas de altura reducida, en que los anchos del tajo son pequeños y, por tanto, casi incompatible con la existencia de elementos diversos.

En cambio, las presas de pantalla tienen una limitación clara: nos referimos a los casos en que la impermeabilidad del cimientado sea escasa.

La pantalla impermeable da lugar a un fuerte gradiente de presiones, ya que con poca diferencia de espesor tiene agua arriba la carga total del embalse, mientras que agua abajo, la presión es prácticamente nula. De aquí que si el cimientado no es muy impermeable y no se ha creado en el mismo una eficaz cortina de inyecciones pudieran producirse filtraciones importantes a través de dicho cimientado.

Una buena solución al problema indicado consiste en disminuir el gradiente de presiones, disponiendo un sistema de impermeabilización con mayor espesor que el de las pantallas. Resulta de aquí una ventaja importante a favor del núcleo impermeable, constituido por materiales arcillosos y con espesor adecuado a las condiciones del problema.

Si se encuentran en el lugar de la obra materiales apropiados y el clima es seco o contiene una estación libre de lluvias resultarán los núcleos a coste más reducido que la pantalla de impermeabilización. En cambio, requieren un volumen mayor de espaldones, principalmente por razón de la estabilidad del espaldón de agua arriba en caso de un desembalse rápido, ya que el núcleo quedará con presiones intersticiales fuertes.

Si el núcleo impermeable es delgado existe cierto peligro de que se produzcan por retracción fisuras en el mismo, quedando partes del núcleo como colgadas de los espaldones que están a ambos lados. La posibilidad de este fenómeno, que de producirse tiene difícil reparación, y que en algunos casos pudiera llegar a producir consecuencias catastróficas, desaparece completamente si el núcleo es suficientemente grueso.

Opinamos que, si se quiere lograr una presa con las máximas garantías de durabilidad a lo largo del tiempo, la solución más idónea será la de un núcleo bastante grueso, y espaldones de características adecuadas. Esto puede redundar en contra de la economía, y por ello, ser menos favorable para casos en que se trate de resolver un problema inmediato.

Es interesante observar cómo los primeros núcleos arcillosos dispuestos en presas de escollera pueden considerarse como una evolución de las primeras pantallas creadas a base de un núcleo de hormigón y quizá, por ello, se les exija una calidad casi extrema. Así, por ejemplo, en la presa de Gocheneralp se realizó un núcleo muy cuidado y dosificado, ejecutando un verdadero hormigón de arcilla en amasadores especiales, al

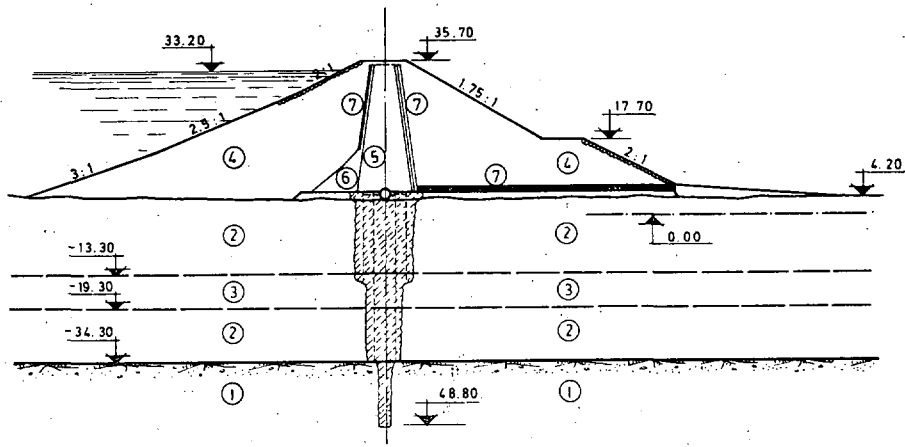


Fig. 16. — Presa de Arbón. Sección principal: 1, pizarras; 2, aluviones; 3, limos y arenas limosas; 4, escollera de pizarra; 5, núcleo impermeable; 6, arena limosa; 7, filtros.

(Arbon dam. Main section: 1, slate; 2, streambed materials; 3, silt and silty sands; 4, slate random rubble fill; 5, impervious core; 6, silty sands; 7, filters.)

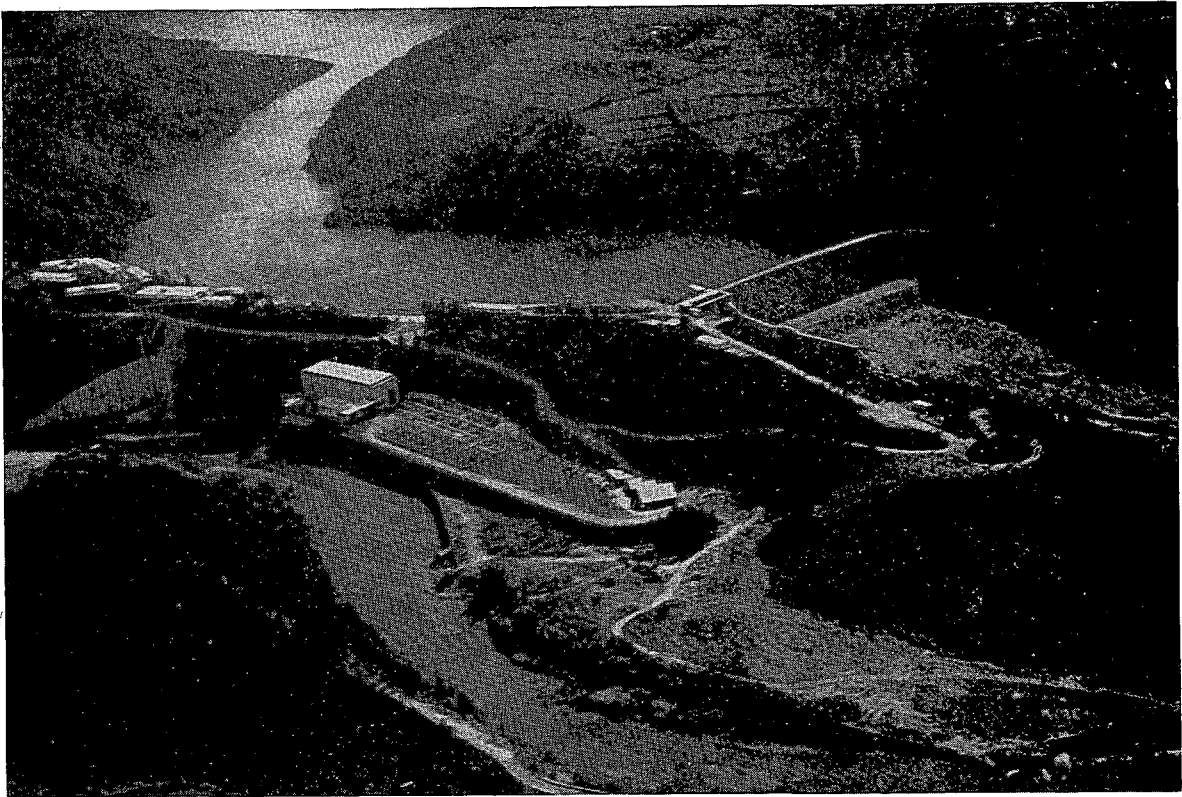


Fig. 17. — Presa de Arbón. Vista general.

(Arbon dam. General view.)

que se le agregaba bentonita, transportada desde gran distancia, para aumentar la impermeabilidad.

En cambio hoy día la tendencia es a:

1. Realizar el núcleo únicamente con los materiales disponibles a pie de obra, con tal de que su permeabilidad sea igual o menor que 10^{-5} .
2. No extremar la condición de impermeabilidad y compensarla engordando el núcleo.
3. Tratar de disminuir las presiones intersticiales durante la construcción, y para ello, procurar que el núcleo contenga un porcentaje apreciable de materiales granulares, es decir, que no sea muy plástico.
4. Como hemos señalado anteriormente incorporar drenes intermedios en las presas de tierra homogéneas.

La posición del núcleo tiene gran influencia sobre la economía de la presa. Un núcleo vertical permite reducir, apreciablemente, el espaldón de agua arriba sin que apenas se aumente el talud de agua abajo; lo cual supone un ahorro más o menos importante de volumen de obra. Pero existe un aspecto que puede tener importancia decisiva, y es el de que en un clima lluvioso, no todos los días, puede ejecutarse y compactarse núcleo. Si éste es vertical no hay posibilidad de construir los espaldones con independencia del núcleo, por lo que todo retraso del núcleo implica un retraso de los espaldones. Huelga decir que si la parada en el trabajo es suficientemente larga puede dar al traste con la economía esperada del menor volumen de obra.

En cambio, un núcleo inclinado y próximo al paramento de agua arriba permite la ejecución previa de casi toda la escollera, de tal modo, que cuando el tiempo sea desfavorable para el núcleo puede concentrarse el esfuerzo en la colocación de escollera. El núcleo se retrasa, pero en los días favorables para el mismo pueden volcarse en su construcción todos los medios disponibles en la obra.

4.3. Zonas permeables. Drenes. Filtros.

Nosotros creemos que el concepto que debe guiar, tanto el proyecto, como la construcción de una presa mixta es el de la erosionabilidad del material.

Entendemos por erosionabilidad del material la capacidad de ser arrastrado por agua a presión procedente de filtraciones de alguna parte de la presa o del cimiento.

Los materiales naturales tienen una capacidad de resistencia a la erosión motivada bien por su cohesión o por su granulometría.

En la escala de materiales resistentes por cohesión estarían en el punto máximo las arcillas (resistentes), y en el bajo las arenas pobremente graduadas y las arenas finas (poco resistentes) por el concepto de granulometría los materiales más resistentes son las escolleras gruesas y las gravas bien graduadas y en el punto bajo vuel-

ven a estar las arenas pobremente graduadas y las arenas finas.

Las presas de materiales sueltos deben prevenirse contra la erosión por arrastre de material buscando que cada capa sea un filtro de la de agua arriba en la dirección en la que pueda aparecer una filtración, tanto por fallo de los elementos de estanqueidad, como procedente del propio terreno.

En general será preferible siempre un material poco erosionable, escolleras o gravas bien graduadas a uno más erosionable, arenas.

Por razones de presión intersticial es conveniente que los espaldones sean lo más permeables posible, lo que puede hacerse así, ya que la estanqueidad de la presa se confía, exclusivamente, al núcleo impermeable o la pantalla en el paramento de agua arriba.

Ahora bien, no siempre será posible en condiciones económicas encontrar material que sea permeable con seguridad, tal como son las escolleras de piedra gruesa. En muchas ocasiones será lo más económico utilizar depósitos naturales, en los que un porcentaje alto de finos les confiere cierta impermeabilidad tal como ocurre con frecuencia en acarreo de procedencias torrencial o fluvio-glaciar.

Se podría, naturalmente, tratar de eliminar los finos mediante un cribado con objeto de lograr permeabilidad suficiente, pero esta operación suele ser costosa. Incluso en ciertos casos el material a emplear podrá ser una mezcla de granos gruesos y de elementos limosos o arcillosos teniendo rozamiento suficiente alto, pero sin impermeabilidad también elevado. Así ocurre en muchos depósitos terciarios de facies costera que resultan idóneos para la construcción de presas de materiales sueltos.

En los casos referidos tenemos un sistema suficientemente eficaz para eliminar presiones intersticiales en el espaldón de agua abajo: consistirá en disponer una capa permeable en toda la base del espaldón, capa que será más o menos horizontal y otra capa también drenante en el contacto entre el sistema de impermeabilización y el propio espaldón.

Así se ha hecho en las presas de Aboño y de Retuerta. En Aboño (fig. 2) el material empleado en todo el cuerpo de presa tiene un coeficiente de permeabilidad $K = 10^{-5}$ y de este mismo material se han preparado los tamaños retenidos en una criba de 12 mm. para formar las capas permeables indicadas. En Retuerta (fig. 4) el material disponible es aún más impermeable y tiene abundante arcilla que haría difícil el cribado; por eso se realizarán las capas permeables con depósitos de aluviones que existen en zona próxima.

En general, las capas drenadas indicadas deberán cumplir las condiciones de los filtros. Así la capa horizontal en la base del espaldón deberá impedir la migración de las partículas finas que contenga el espaldón y también proteger el cimiento en caso de que en éste existiesen finos. La capa inclinada o vertical entre núcleo y espaldón debe servir de protección a uno y a otro.

En consecuencia las capas han de ser por una parte permeables para servir de dren, pero al mismo tiempo sus huecos deberán ser lo suficientemente pequeños para no dejar paso a las partículas finas de los materiales que se trata de proteger.

Como en todo filtro, es evidente que cuanto más delgada sea la capa con tanto mayor rigor deberá satisfacer las condiciones exigidas y, por tanto, se requiere mayor cuidado en su granulometría, puesta en obra, etc. Por el contrario, si la capa se dimensiona con exceso, se puede ser más tolerante en sus características.

Por nuestra parte consideramos preferible ejecutar capas con suficiente grosor y que tengan en todo su espesor iguales características, es decir, no introducir diversas subcapas con permeabilidades distintas. Se logra así la gran ventaja de la sencillez en la ejecución y en definitiva se obtiene mayor economía.

Si se trata de una presa con pantalla en el paramento de agua arriba podrá ser interesante disponer un filtro entre pantalla y espaldón, en caso de que éste tenga una permeabilidad baja, para evitar en el mismo presiones intersticiales por agua procedente de lluvia, de las laderas, o incluso de una fisura en la pantalla, que pudieran tender a un levantamiento de la pantalla. Comunicando este dren con el sistema drenante de la parte inferior se conseguirá que no exista ningún peligro en caso de desembalse.

Finalmente, cuando se trata de construir presas con núcleo y para la realización del espaldón de agua arriba, hay necesidad de emplear materiales cuya permeabilidad sea baja interesará al estudiar el caso de desembalse considerar la posible existencia de presiones intersticiales en dicho espaldón, además del núcleo. En estos casos convendrá disponer una zona permeable próxima al paramento de agua arriba logrando dicho material permeable mediante cribado de los materiales existentes o incluso si fuese necesario transportando escollera de mayor distancia. Se crearán así dos zonas distintas en el espaldón de agua arriba, una permeable y libre de presiones intersticiales con embalse vacío y otra más o menos impermeable inmediata al núcleo. La zona permeable podrá no llegar hasta la base de la presa, si no existe posibilidad de desembalses totales, es decir, deberá prolongarse inferiormente por lo menos hasta el máximo desembalse que puede ser previsible.

En cualquier caso las condiciones de filtro suponen una selección de material de una importancia muy grande en el proyecto.

En general, debe procurarse que los filtros se obtengan de materiales naturales obtenibles en el emplazamiento, ya que cualquier proceso mecánico de obtención como cribado o machaqueo puede encarecer notablemente la obra.

Es también evidente que las presas de núcleo son más exigentes que las de pantalla en cuanto a filtros, lo que puede condicionar una elección hacia este último tipo si los filtros exigen una obtención procesada.

RESUMEN

Nosotros creemos que la tecnología de la construcción de las presas de escollera podría resumirse del modo siguiente:

- A medida que la relación coste de mano de obra a coste de máquina aumenta, la presa de materiales sueltos es más competitiva.
- En la situación actual de España en cerradas que no admitan estructuras en bóveda y para aliviaderos no demasiado grandes, la presa de materiales sueltos es en general más económica que la de fábrica.
- En cimientos de buena calidad la presa de pantalla es más barata que la de núcleo por la menor diversificación del material empleado.
- La experiencia habida con pantallas, tanto asfálticas como de hormigón, ha sido positiva apreciándose una mejor calidad en aquellas unida a un mayor coste.
- Tratándose de presas de pantalla es indispensable compactar las escolleras con rodillo vibratorio, que se ha revelado en los últimos años como procedimiento claramente aconsejable de construcción.
- En cimientos deformables o de menor impermeabilidad las presas de núcleo son más adecuadas por las mayores posibilidades de deformación sin fisuración y el mayor ancho de contacto con el cimiento.
- Las presas mixtas deben proyectarse con el objeto principal de buscar una adecuada utilización de los materiales existentes en el emplazamiento.
- El criterio principal de seguridad que debe buscarse en una presa de materiales sueltos es el de evitar el riesgo de erosionar el material por arrastres de agua procedentes de la propia presa o del cimiento.
- En cualquier caso, y tanto por buscar un procedimiento cómodo de ejecución como una mayor seguridad en la retención de finos, deben proyectarse filtros de espesor relativamente grande.
- En presas de escollera y para láminas vertientes de poca altura es admisible prever un vertido sobre coronación en construcción y, en fase definitiva, si se han tomado las precauciones adecuadas.