

OBRAS HIDRAULICAS EN LOS ESTADOS UNIDOS

Por JOSE ANTONIO GARCIA-DIEGO,

Ingeniero de Caminos.

En este tercer artículo del notable trabajo en que el autor nos da una información completa del tema del epígrafe, se trata de las presas de tierra, reseñándose datos de interés acerca de las obras de esta clase que allí se han ejecutado.

III

Presas de tierra.

En los Estados Unidos se proyectan y construyen actualmente gran número de presas de tierra. Si se consultan las estadísticas puede comprobarse que, en algunas de las organizaciones técnicas más importantes, este tipo de estructura ocupa numéricamente el primer lugar. Si bien la contribución europea al estudio de esta clase de obras es considerable — destacando las realizaciones francesas en el Norte de África —, el porcentaje de presas de tierra es, en cambio, bastante reducido.

En España su número es muy pequeño, y algunas han sufrido importantes retrasos en su construcción, posiblemente por insuficiencia del equipo mecánico, sumada, en las del Estado, a la modestia de los créditos anuales.

Creemos, sin embargo, que siendo la tendencia a construir esta clase de presas, dependiente en gran parte de factores físicos y del avance en el aprovechamiento de los recursos hidráulicos, vale la pena dedicar algunas páginas a una cuestión que tiene ya hoy cierto interés práctico en nuestro país, que creemos aumentará en el próximo futuro.

La primera razón del aumento en el porcentaje de presas de tierra construidas en América es el progresivo agotamiento del número de cerradas apropiadas para soluciones a base de hormigón. La presa de tierra es la estructura hidráulica más adaptable a toda clase de condiciones físicas y no necesita, además, cimentarse en roca. Esto explica su empleo predominante en proyectos de riego, aunque se hayan construido muchas para saltos de agua, e incluso, dentro de la técnica hidroeléctrica, representen la óptima solución en algunos casos especiales: por ejemplo, los aprovechamientos de alta montaña con presa cimentada sobre morrena glacial, cuyas dificultades han llegado a ser vencidas incluso cuando la permeabilidad del terreno es muy alta. Las cerradas con buena roca para cimentación corresponden, en términos generales, a zonas montañosas con pendientes fuertes y vasos reducidos. Por ello, el precio por metro cúbico embalsado resulta alto, y su utilización natural es el esta-

blecimiento de sistemas hidroeléctricos o para abastecimiento de poblaciones. En cambio, en las zonas de llanura, donde generalmente se presentan los vasos de gran volumen, no suele haber cierres adecuados para una obra de hormigón y a veces las cerradas son extraordinariamente amplias, por lo que únicamente la reducción de precios unitarios, lograda con el empleo de la moderna maquinaria de movimiento de tierras, permite un aprovechamiento económico.

El progreso del equipo mecánico y de los métodos de trabajo ha modificado totalmente el proceso constructivo de esta clase de estructuras. Ya en nuestro primer artículo citábamos la fuerte reducción en los plazos de construcción. En cuanto a la disminución en coste, daremos como ejemplo el estudio comparativo de distintas soluciones para la presa de Center Hill (*U. S. Corp of Engineers, 1947*), donde el precio de un metro cúbico de tierra apisonada resultó 0,52 dólares, y el correspondiente de hormigón en presa, 11,70 dólares. Se explica así la conveniencia de construir presas de tierra, aunque su volumen sea varias veces mayor que el de las de fábrica.

* * *

La presa de tierra con su sección dividida en zonas de materiales distintos — generalmente graduados desde la arcilla impermeable a la escollera — y apisonados mecánicamente, es el tipo que modernamente se ha impuesto en la construcción americana. Damos en las figuras 22 y 23 dos esquemas típicos. El primero corresponde a la presa de Vallecito (1941), de altura media y cimentada sobre un terreno compuesto de arcilla, arena y cantos rodados. El segundo a la gigantesca presa de Anderson Ranch (1947) que, con sus 139 metros de altura y 6 728 000 m.³ de volumen, establece un *record* difícilmente superable en esta clase de obras.

Una variante del tipo normal ilustrado por estas dos obras y que está siendo bastante empleada modernamente, es la presa mixta de tierra y escollera, en la que el núcleo impermeable de arcilla queda contenido entre dos espaldones de piedra, pudiéndose así obtener, en él, taludes bastante fuertes. Entre la zona de arcilla y las de escollera se interponen capas-filtro de

grava, muy delgadas. En la figura 24 se da, como ejemplo de esta disposición, el perfil de la presa de Nottely (T. V. A.). En otros proyectos americanos, al ser la roca predominante en la excavación o más eco-

terial impermeable en el paramento de aguas arriba y terminando con el permeable aguas abajo.

La construcción por el método hidráulico o semi-hidráulico ha disminuído mucho de volumen en estos

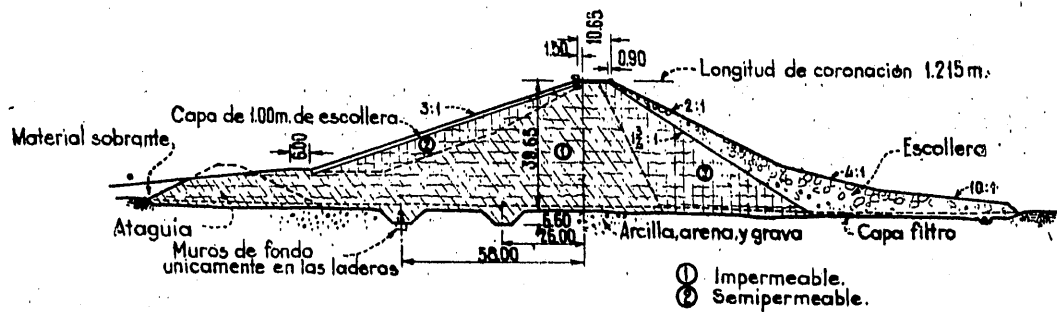


Figura 22.

nómica, se ha llegado a núcleos de dimensiones bastante menores (hasta 18 metros de base por 60 de altura), prefiriéndose, sin embargo, esta solución a la presa constituida totalmente por escollera.

últimos años, no por razones técnicas, sino económicas. La tendencia moderna parece ser también contraria a la obtención de impermeabilidad por medio de pantallas de hormigón dentro del cuerpo de la presa.

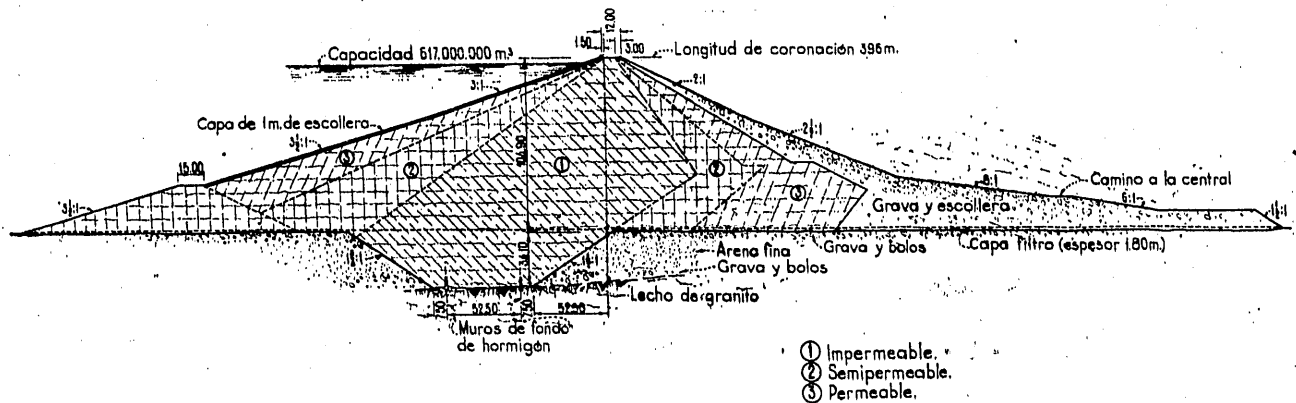


Figura 23.

Cuando no se prevén desembalses rápidos se proyectan también, a veces, presas con las zonas distribuidas de modo no simétrico, empezando con el ma-

En cuanto a las presas con sección uniforme — o casi uniforme, pues siempre se procura colocar el material más grueso cerca de los paramentos, teniéndose por

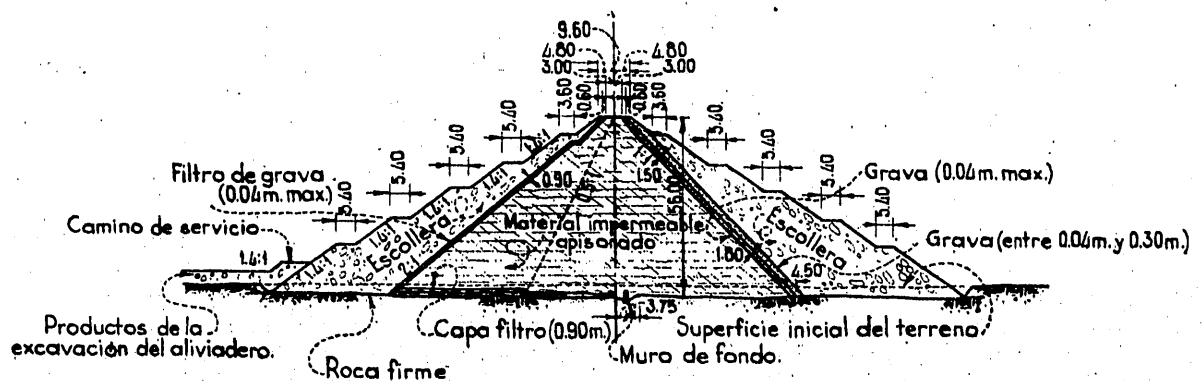


Figura 24.

tanto que establecer, de todos modos, un sistema de control, aunque sea rudimentario — se construyen cuando la excavación no puede suministrar más que un solo tipo de material, lo que suele ocurrir únicamente en obras de poco volumen.

* * *

El proyecto de una presa de hormigón puede considerarse representa la obra que va a ser construida, salvo algunos detalles que por falta de tiempo o previsión se hayan omitido y la imprecisión del conocimiento de la cimentación, que siempre existe aunque se ejecute un buen programa de sondeos y perforación de galerías. En cambio, en una presa de tierra, proyecto y construcción se entremezclan y dependen íntimamente uno del otro. Así, muchas veces, los métodos de construcción y el equipo mecánico disponible influyen de modo importante la solución elegida y, en otros casos, las dimensiones proyectadas se alteran fundamentalmente, después de empezada la obra, por variaciones de consideración en las propiedades supuestas a los materiales o al cimiento.

Ya hemos indicado en el primer artículo de esta serie los métodos más empleados para comprobar una sección de presa de tierra desde el punto de vista de la estabilidad. Diremos, además, que en el proyecto de esta clase de estructuras las investigaciones de laboratorio tienen un lugar destacado. Para la aplicación de los métodos de fotoelasticidad ha de vencerse la dificultad de reproducir los esfuerzos debidos al peso propio. Parece que el sistema, hasta hoy, más perfecto es el empleo de la gelatina como material para el modelo (1). Para estudiar la permeabilidad de la presa se utiliza, generalmente, el método de analogía eléctrica.

* * *

El sistema más corriente de derivación del río es hacer pasar éste por los desagües de fondo — que suelen disponerse en galería, atravesando una de las laderas — o por el canal aliviadero y construir una ataguía de tierra o escollera que queda más tarde englobada en la presa principal. Pudimos ver empleado este sistema en la presa de Davis (Arizona), en la que se construyó previamente un puente de pilotes de madera, desde el que se vertía con camiones escollera y, por último, tierra en el paramento de aguas arriba para impermeabilizar.

En ríos muy caudalosos el método anterior puede resultar irrealizable, siendo necesario recurrir a una

(1) Se ha propuesto también por M. A. Biot un método por el que podría trabajarse con los materiales normales, y por el investigador soviético Prof. G. I. Pokrovsky, otro, en el que la fuerza de la gravedad se sustituye por la centrífuga, haciendo girar el modelo a gran velocidad. Ambos, sin embargo, presentan dificultades de aplicación.

ataguía de células de tablestacas o, si el cimiento es sólido, a cajones flotantes de madera con el fondo perfectamente adaptado a la sección del río. Partiendo de esta idea básica se empleó una vez, como ataguía, un monolito de hormigón. Las soluciones a base de tablestacas o cajones suelen ser muy costosas y sólo se aplican en obras de excepcional importancia y después de una investigación cuidadosa, que suele incluir la construcción de modelos reducidos.

Para la derivación del río e incluso para la confección del plan general de construcción, debe estudiarse en el proyecto la máxima crecida que puede razonablemente preverse durante las obras. Suelen tomarse normalmente valores que oscilan entre la cuarta parte de la supuesta para el proyecto del aliviadero y la probable para un período de veinticinco años, cuando la determinación de la primera se ha hecho por métodos estadísticos.

* * *

El estudio de los cimientos, desde el punto de vista de su impermeabilidad, es asunto de importancia en todo proyecto de presa, y aun más si ésta es de tierra y no se apoya en roca firme.

La protección contra las aguas filtrantes se logra, bien disponiendo un espaldón aguas arriba, o una zanja rastrillo. Ambas zonas se proyectan como prolongaciones del núcleo central y, lógicamente, la solución óptima es combinar las dos, lo que, sin embargo, en muchos casos resulta antieconómico.

La planta de la zanja rastrillo suele ser paralela al eje de la presa en su parte central y converger hacia él en las laterales. Una ventaja adicional de esta zanja es la de darnos, al comienzo de la construcción, una idea bastante exacta de la naturaleza de los cimientos. Así, en varias ocasiones, y aunque con anterioridad se habían realizado campañas de sondeos, se localizaron vetas permeables, e incluso cambios en el cauce del río acaecidos en otros períodos geológicos. Cuando la roca no está muy profunda se aconseja llegar hasta ella con la zanja rastrillo, y suplementar entonces la protección disponiendo uno o varios muros de fondo de hormigón armado, cuya sección normal se representa en la figura 25.

Cuál de los dos dispositivos — zanja rastrillo o espaldón — debe elegirse, cuando la combinación de ambos sea demasiado costosa o se considere innecesaria, es cuestión sobre la que no existe acuerdo. Los proyectos del U. S. Bureau of Reclamation llevan siempre zanjas y sólo en ciertos casos espaldones. Sin embargo, la tendencia contraria se observa en otros trabajos, principalmente en los proyectados o inspirados por Proctor. En último término, creemos que la cuestión puede resolverse por consideraciones económicas. Determinado el coeficiente de permeabilidad del terreno — lo que debe hacerse por medio de ensayos *in situ* antes del comienzo de la obra — puede calcularse el

caudal filtrante para espaldones y zanjas de distintas dimensiones y comparar los costes de las soluciones que permitan llegar al valor mínimo admisible. Aunque aparentemente el espaldón suele dar mayor volumen, debe tenerse en cuenta que estando éste generalmente por debajo del mínimo nivel del embalse no es necesario recubrirlo de escollera, como suele hacerse con el paramento de aguas arriba, lo que puede establecer cierta compensación desde el punto de vista económico.

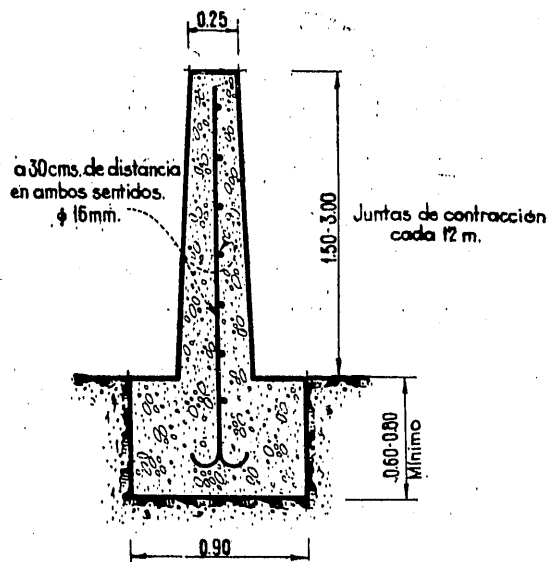


Figura 25.

Otra solución eficaz para lograr la impermeabilidad de los cimientos es el establecimiento de una pantalla de tablestacas, bien en el fondo de la zanja rastriillo, o al pie del paramento de aguas arriba. No es aplicable cuando se encuentren bolos en el cimientto. En algunos casos, en que la zanja a cielo abierto resultaba antieconómica, se han construido pantallas de hormigón, empezando por perforar una galería horizontal que se rellena en parte, ampliándose sucesivamente la excavación por encima de ella y repitiendo el proceso en la misma forma.

Las inyecciones de cemento — a veces con adición de arena, bentonita o mezclas arcillosas — suelen hacerse bajo el muro de fondo o bien repartidas en toda la base de la presa, en este último caso, generalmente, para cegar manantiales. La eficacia de tales inyecciones, si se hacen en tierra, es muy pequeña.

Desde hace algunos años se han ensayado distintos compuestos químicos para lograr un aumento de cohesión en los terrenos que lo necesiten. Estos tratamientos no parecen haber alcanzado la necesaria seguridad para ser empleados en la práctica constructiva normal. Sin embargo, y a pesar de algunas experiencias de laboratorio discordantes, se esperan grandes

avances en este campo de investigación para un próximo futuro.

Desde el punto de vista de la construcción, el tratamiento superficial de la zona de cimientos suele hacerse con *bulldozers* o traillas, empleando dragalinas o excavadoras si los depósitos son profundos. Para agotamientos se utilizan preferentemente taladros-pozos y, a veces, pozos comunicados por colectores desde los que se bombea.

Como a pesar de todos los dispositivos indicados es generalmente imposible suprimir totalmente las filtraciones, se dispone siempre un dren al pie del paramento de aguas abajo y, en algunos casos, filtros de grava y arena bajo una o varias de las zonas en que se divide la sección.

* * *

Los tres materiales básicos que se emplean en una presa de tierra de sección heterogénea son:

1. *Material para el núcleo central.* — Impermeable y con tendencia a la inestabilidad mecánica, está compuesto, en su mayor parte, por elementos de muy pequeño diámetro, predominando la arcilla. Su excavación suele resultar económica y, controlando la cantidad de agua, puede llevarse fácilmente al grado de óptima compacidad.

2. *Material para las zonas laterales interiores.* — Semipermeable y con buenas características de estabilidad, su composición granulométrica comprende desde materiales muy finos a árido grueso, predominando la arena y grava fina. Es generalmente fácil de excavar y colocar, teniendo el grado de humedad poca influencia en la facilidad de manipulación, aunque sí, en cambio, en la compacidad.

3. *Material para las zonas laterales exteriores.* — Permeable y con muy buenas características de estabilidad, está compuesto fundamentalmente de escollera y grava gruesa. Su excavación suele ser costosa y el apisonado, cualquiera que sea el método que se emplee, le afecta muy poco. El grado de humedad tiene en él una influencia prácticamente despreciable.

El gráfico de la figura 26 puede servir como indicación de las zonas dentro de las cuales suelen moverse las composiciones granulométricas de estos distintos tipos de materiales.

* * *

El programa de construcción de una presa está siempre condicionado por la capacidad de una máquina fundamental, y el resto del equipo mecánico debe proyectarse sólo con el volumen preciso para mantener la primera en el rendimiento fijado.

Esta máquina fundamental es, en una presa de fábrica, la estación de hormigonado. En una presa de tierra es la excavadora, lo que sí, por una parte, permite una mayor flexibilidad de operación y dificulta

la aparición de averías que puedan interrumpir totalmente la construcción, por otra hace aún mayor la necesidad de un control firme y bien estudiado.

Las excavadoras que generalmente dan mejor resultado son las de 1,50-2,00 metros cúbicos de capacidad. En varias obras se ha sustituido todo o parte del equipo de excavadoras por dragalinas, excavadoras-cargadoras (fig. 27) o traíllas. Aunque se han obteni-

do con estas máquinas resultados muy favorables, tienen siempre la desventaja de no ser económicas más que operando en ciertos tipos de terreno, mientras que la excavadora tiene un empleo casi universal.

Para el transporte de los materiales, las vagonetas tiradas por locomotoras fueron siendo desplazadas, a partir de 1930, por los camiones-volquete, generalmente de capacidades entre 4 y 6 m.³. Hoy día, en

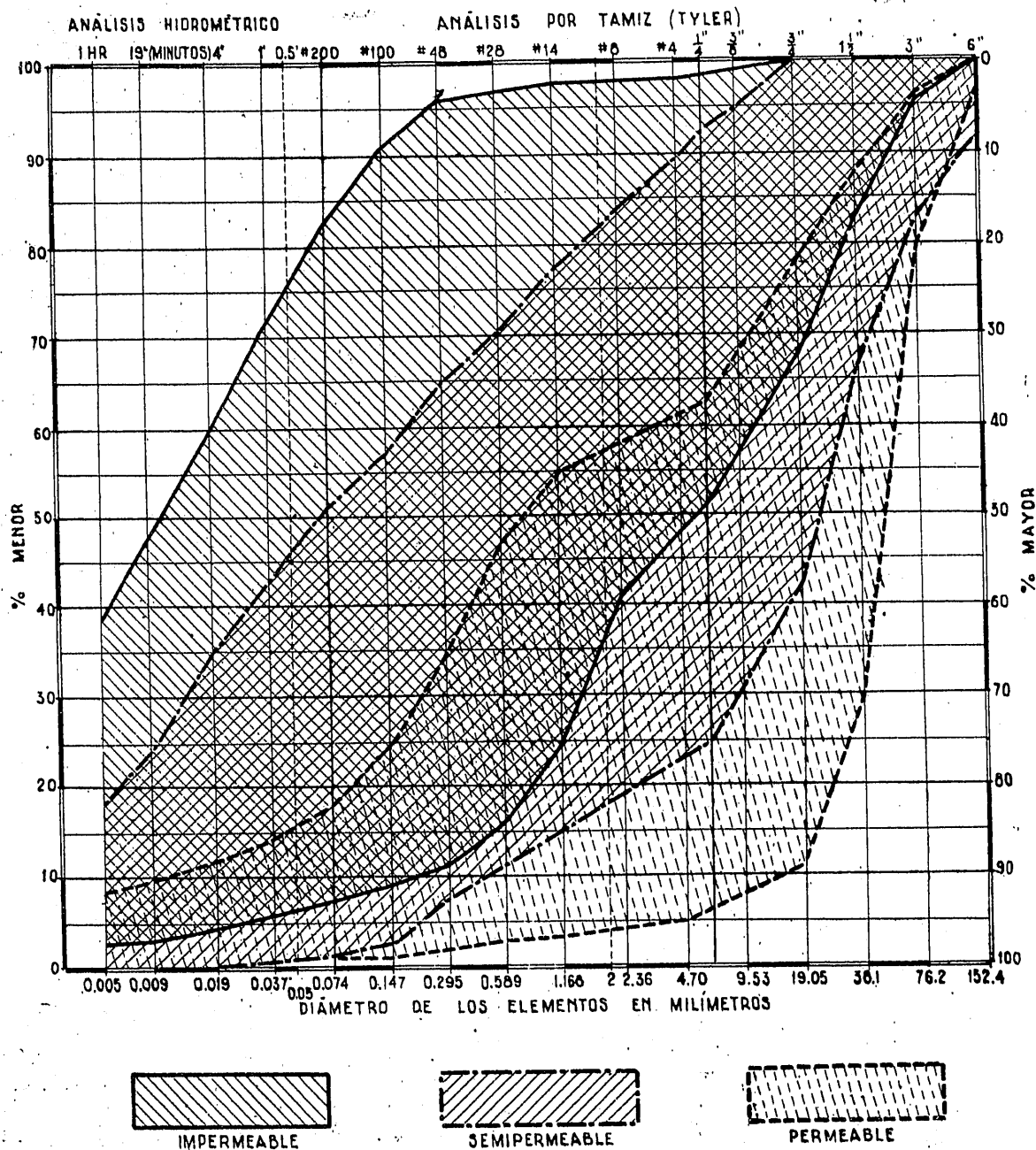


Figura 26.

obras importantes, se emplean camiones de mayor volumen (entre 9 y 12 m.³) y de gran robustez, para cortar en lo posible el coste de las reparaciones que suele ser bastante elevado, como consecuencia de la deficiente calidad del terreno sobre el que se rueda.

Otros tipos de material de transporte corrientemente utilizados en esta clase de obras son:

1. Camiones con dispositivo oruga en el eje trasero, o tractores que arrastran remolques orugas. Generalmente llevan el dispositivo de vuelco hacia uno de los lados y se construyen hasta capacidades de 19



Figura 27.

metros cúbicos. La figura 28 muestra un modelo, con neumáticos, especialmente indicado para transporte desde cantera.

2. Camiones con la carga en la parte delantera, para que puedan ser guiados al lugar de vertido y efectuar éste sin perder tiempo en dar marcha atrás (fig. 29).

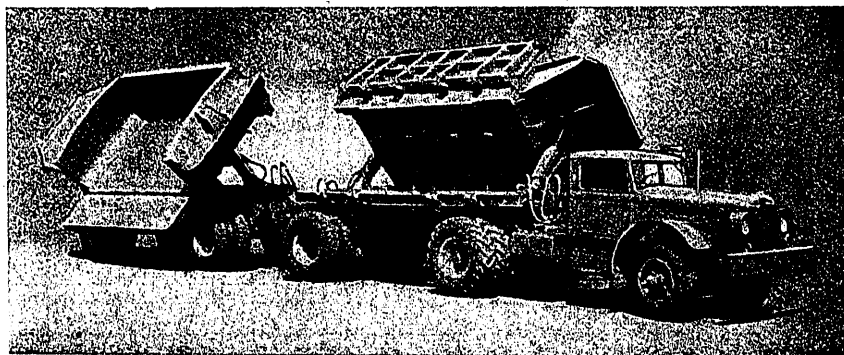


Figura 28.

3. Tractores con neumáticos que arrastran un remolque que vierte por el fondo. Estos vehículos, que depositan el material en hileras sin interrumpir la marcha, constituyen el equipo de transporte mejor adaptado a la construcción de presas de tierra. El modelo más empleado tiene 15 yardas cúbicas (11,50 m.³) de capacidad, pero se construyen hasta un volumen de 23 m.³. Son vehículos rápidos y de alto rendimiento y a la vez suficientemente duros para que las repa-

ciones no pesen demasiado en los gastos de explotación (fig. 30).

La organización de movimiento de tierras con cinta transportadora ha sido probada en algunos casos, con resultados no demasiado satisfactorios. En cuanto a las traíllas, se emplean más bien como elemento auxiliar, pues, en general, los ensayos de transporte en gran escala han resultado poco económicos y el te-



Figura 29.

rraplén no tan uniforme como el construido a base de excavadoras y camiones.

* * *

En bastantes casos se hace necesario separar guijarros y bolos del material que ha de formar el núcleo

impermeable. En obras poco importantes esta separación se hace a mano y, en las de volumen medio, con *bulldozers* provistos de una cuchilla dentada. Pero en presas muy importantes o cuando es grande el porcentaje de piedras, suele ser económica la instalación de una estación separadora. Estas no difieren, en esencia, de las clasificadoras de áridos para hormigón, y a veces se han construido móviles.

El estudio de la cantidad de agua que debe añar-

dirse al terraplén y el método más económico de hacerlo, son puntos muy importantes a considerar. Para el contratista suele ser ventajoso reducir la cantidad de agua al mínimo; pero entonces, para obtener buenos resultados, se verá obligado a reforzar el apisonado.

Sigue siendo lo normal añadir el agua en la zona de excavación, construyendo pequeños diques que acotan estanques, desde donde se filtra por gravedad. Es necesario recalcar la necesidad de hacer ensayos cuidadosos del comportamiento del terreno en estas condiciones. Así, revisando datos del archivo del U. S.



Figura 30.

Bureau of Reclamation, hemos podido ver que, en una de sus obras, la humedad óptima se obtenía inundando dos semanas antes de excavar, mientras que en otra se necesitaban tres meses para llegar al mismo resultado.

En algunos casos se prefiere regar el terreno con surtidores giratorios, y en otros, si se emplea estación separadora, se humedecen los áridos en los silos y, caso de utilizarse cinta transportadora, en el último tramo de ésta. Aun en los casos más desfavorables se evita el añadir toda el agua en la misma presa, limitándose a suplementar la necesaria, generalmente con camiones-tanque o mangueras.

Debe impedirse tanto la colocación de material seco como demasiado húmedo. Esto último puede producir retrasos de cierta importancia en regiones sujetas a fuertes lluvias, pues después de una de éstas es necesario detener el trabajo hasta que el agua sobrante se haya evaporado. Como solución extrema, citaremos la de una presa — en cerrada muy estrecha — que fué construída bajo toldo.

* * *

La calidad de los materiales que componen una

presa de tierra se mide fundamentalmente por su densidad. Es práctica normal que ésta sea de un 1 a un 2 por 100 inferior a la determinada en el laboratorio.

Para lograr esto, el contratista ha de combinar, del modo más económico, una serie de factores, los más importantes de los cuales son: peso y forma del rodillo de pata de cabra, espesor de las capas, número de pasadas y grado de humedad. Con el tipo *standard* de rodillo empleado por el U. S. Bureau of Reclamation pueden darse como valores normales 15 cm. para el espesor de las capas y doce pasadas de rodillo.

Al colocarse cada una de las capas, inspectores de la Administración las ensayan con la aguja de Proctor, determinando el grado de humedad y, partiendo de él, la densidad. Estas pruebas no excluyen la necesidad de instalar, en obras de cierto volumen, un laboratorio cuya función es aún más importante que en la construcción de una presa de hormigón. En él, además de repetir los ensayos de control de humedad, se realizan constantemente otros de filtración, influencia del apisonado, resistencia mecánica, densidad, consolidación, resistencia al esfuerzo cortante, etc.

En cuanto a la escollera, suele transportarse en camiones-volquete y colocarse en capas de un metro de espesor. La superficie de éstas se alisa solamente lo necesario para impedir la formación de grandes cavidades y permitir el paso de nuevo a los camiones.

El recubrimiento del paramento de aguas arriba se hace generalmente cuando el trabajo en la zona de tierra está terminado o detenido durante el invierno. El material se deposita también con camiones-volquete, que bajan por el paramento sostenidos por un cable enganchado a un tractor.

* * *

Para terminar con estas breves notas sobre construcción de presas de tierra, nos referiremos al aspecto estético de las obras. Cuando éstas son importantes, suele imponerse en el Pliego de Condiciones la obligación de dejar las excavaciones con un talud agradable a la vista, extender sobre el terreno los materiales sobrantes, quemar el ramaje, etc. En muchos casos se indica también deben destruirse los caminos provisionales y edificios auxiliares.

En el tipo de presa que nos ocupa se cuida especialmente la apariencia del paramento de aguas abajo. Se logra esto, bien por medio de una capa de escollera o grava o, si la zona externa es de tierra, sembrando hierba o plantas de poca altura. La coronación lleva un bordillo en la parte de aguas abajo y un pretil de hormigón o mampostería en la de aguas arriba.