

Diques para almacenamiento de residuos industriales

Por JOSE R. TORAL SANTANDER

Dr. Ingeniero de Caminos, C. y P.

1. CONSIDERACIONES GENERALES

Son muy numerosas las plantas industriales que, como consecuencia de procesos de fabricación diversos, han de eliminar residuos sólidos inútiles o incluso nocivos. Frecuentemente estos residuos se evacúan por vía húmeda, en forma de lodos fluidos con proporciones de agua del orden del 70 al 80 por 100. Esta forma húmeda de evacuación se debe en muchos casos a exigencias del propio proceso de la planta; en otras ocasiones viene motivada por la facilidad y economía en el transporte de los residuos, que así puede hacerse de modo continuo por tubería y utilizando el bombeo si lo requiere la topografía de la zona. Finalmente, también puede ser aconsejable para evitar la contaminación atmosférica, pues con escombreras clásicas de material seco se corre el riesgo de que el viento forme grandes nubes de polvo; este peligro es muy de tener en cuenta, ya que los residuos industriales suelen tener abundancia de granos finos (recuérdense, por ejemplo, las cenizas volantes de las centrales térmicas de carbón).

Por regla general, no resulta admisible verter estos lodos de planta en el mar o en los ríos y arroyos, pues se produciría una inaceptable contaminación física y química de las aguas naturales. De ahí que hayan de almacenarse en depósitos artificiales, donde se produce la decantación de los residuos sólidos; esos depósitos se crean mediante diques apropiados, que deben asegurar a la balsa las condiciones de impermeabilidad y estabilidad, indispensables para no contaminar los cursos de agua y acuíferos cercanos.

A menudo el volumen total de residuos previsto en la vida útil de la planta asciende a varias decenas de hectómetros cúbicos, por lo que los embalses y los diques requeridos entran de lleno en la categoría de grandes presas, pues han alcanzado alturas cercanas a los 100 metros en España y superiores a 150 metros en otros países.

2. EXPERIENCIA EN ESTE CAMPO

En este tipo de diques han ocurrido numerosos accidentes en todo el mundo, que a veces han revestido carácter catastrófico; merecen recordarse

las recientes roturas en los diques de las minas de cobre de Chile (1965), de Aberfan, en Gran Bretaña (1966) y Buffalo Greek, en Estados Unidos (año 1972), que ocasionaron 200, 127 y 125 muertos, respectivamente.

La investigación de los accidentes ha puesto de manifiesto que generalmente se deban a una mala concepción de los diques, que a menudo se han proyectado y construido sin aplicar debidamente la tecnología de las presas clásicas de tierra; unas veces por utilizar métodos empíricos, tradicionales en diques pequeños que no pueden extrapolarse a los grandes; y otras por no dar su justa importancia al almacenamiento de los residuos, cuyos gastos parecerían no estar tan justificados como los realizados en las instalaciones principales de la planta.

Este punto de vista es un error, pues en los diques para residuos se utilizan frecuentemente materiales más delicados y métodos constructivos menos confiables que en las presas convencionales de materiales sueltos; por ello, la actual técnica de éstas debe aplicarse con más rigor en tales diques.

Las causas más frecuentes de los accidentes registrados son: mal control de las aguas que llegan a la balsa, falta de un sistema adecuado de drenaje en el dique, insuficiencia en la vigilancia y auscultación de la obra; las consecuencias de estos defectos de concepción han sido generalmente una alta saturación del cuerpo de presa y unas presiones intersticiales excesivas, lo que ha producido fenómenos tales como deslizamiento de taludes, sifonamientos en el dique y cimientos o licuefacción en la masa del dique.

En estos últimos años se ha ido tomando conciencia de la necesidad de tratar más seriamente el proyecto y construcción de esta clase de obras. Buena prueba de esto son las reglamentaciones especiales para ellas que se han puesto en vigor en diferentes países; citemos, a título de ejemplo, la "Regulatory Guide 3.11" de la U.S. Nuclear Regulatory Commission, obligatoria para los diques en plantas destinadas a obtener productos de uranio; es revelador que esta norma, en esencia, lo que exige es aplicar a fondo la tecnología moderna de las presas de materiales sueltos.

Dada la actualidad del tema, no es de extrañar que se tratara ampliamente en el XII Congreso de Grandes Presas, celebrado en Méjico en 1976, incluyendo en su cuestión Q.44 una parte dedicada exclusivamente a presas de estériles mineros; las 18 comunicaciones presentadas sobre este tema, son del mayor interés y señalan la importancia que ya se concede a tales obras.

En cuanto a diques de este tipo en España recomendamos el excelente artículo "Presas de residuos mineros", de don José Luis Berzal, publicado en esta Revista (número de marzo de 1976), que tiene amplia información sobre realizaciones españolas hasta esa fecha.

Recientemente hemos participado en el estudio de diferentes presas para almacenar residuos de centrales termoeléctricas o de plantas destinadas a la obtención de concentrados de uranio. Sobre la base de tal experiencia, el presente artículo pretende aportar algunas ideas que pudieran ser útiles en la concepción de esta clase de obras, centrándose más bien en la peculiaridad de que son diques "para" almacenar residuos (se construyan o no con ellos).

3. LOCALIZACION DE LOS DIQUES

Como es lógico interesa ubicar estos diques lo más cerca posible de la planta, para minimizar el coste del transporte de los lodos por tubería. Desde el punto de vista topográfico caben diversas posibilidades en la creación de los depósitos:

- Vaguadas o arroyos a cerrar con presas en las secciones más estrechas del valle. Frecuentemente, para aprovechar al máximo la capacidad del vaso, convendrá prolongar la presa mediante alas laterales extendidas por las divisorias inmediatas a la cerrada; por ello, suelen resultar presas mucho más largas que las clásicas y con planta más bien irregular.
- Depresiones y laderas a aislar con diques largos de baja altura. Esta disposición a media ladera es a veces conveniente para evitar los problemas de expropiaciones, vías de comunicación, concesiones de agua, etc. que presentan las zonas bajas de los valles.
- Explanadas o mesetas llanas, en las que puede formarse un recinto mediante un dique perimetral. Es una solución análoga a la que frecuentemente se utiliza para crear el depósito superior de las centrales hidroeléctricas de acumulación por bombeo.

Son preferibles las ubicaciones con pequeña cuenca propia, para evitar que la balsa reciba

aportaciones naturales de importancia; en caso contrario, se requerirían costosas obras de aliviaderos o desvíos, que gravarían fuertemente el importe del mismo dique. Por este motivo, no es raro que convenga renunciar a buenos vasos situados en arroyos de cierta entidad, considerando más bien sus vaguadas laterales o de cabecera aunque proporcionen menor volumen de almacenamiento.

También es deseable que los diques se encuentren a nivel inferior al de la planta, con objeto de evacuar lodos por gravedad, sin necesidad de consumir energía en bombearlos; este consumo podría ser importante, dados los grandes volúmenes de residuos usuales.

Otro condicionante que tiene mucho peso en la práctica, es el de los terrenos a ocupar con el depósito. Ofrece muchas ventajas elegir una ubicación que esté dentro del perímetro ya adquirido por la empresa propietaria de la planta o la explotación minera; y no sólo por razones de economía, sino también por asegurar la puesta en marcha de la fábrica en la fecha programada, soslayando los retrasos debidos a litigios legales de expropiación.

De todo lo anterior se deduce que, para elegir acertadamente la mejor localización del dique, han de tenerse en cuenta factores muy diversos. De ahí la conveniencia de un estudio comparativo de las varias ubicaciones posibles, en el que se consideren conjuntamente los costes del dique, obras de control de las aguas, transporte de los lodos, energía consumida en bombearlos y terrenos ocupados. Como las diferentes ubicaciones pueden tener distinta capacidad, suele ser práctico compararlas con un índice de calidad igual al coste del metro cúbico almacenado.

No deben olvidarse las alternativas consistentes en utilizar sucesivamente varios vasos menores, que se construirían a medida que transcurra la vida útil de la planta. A veces una solución de esta clase resulta más ventajosa que la de embalse única, por razones de superficie de cuenca, adquisición de terrenos o cercanía a la fábrica. En este caso de depósitos combinados, habrá de fijarse su orden de preferencia mediante el citado estudio comparativo.

4. ELECCION DE MATERIALES

Es frecuente que para la construcción de esta clase de diques se utilicen los mismos residuos de la planta, porque ello presenta diversas ventajas, como luego veremos.

Sin embargo, no ha de admitirse "a priori" que siempre deba ser así. Antes bien, en cada caso particular convendrá hacer una comparación técnico-económica de dos tipos de solución:

DIQUES PARA ALMACENAMIENTO DE RESIDUOS INDUSTRIALES

a) La construida con materiales artificiales procedentes del proceso de fabricación, sean los residuos eliminados por la propia planta o bien los estériles de la explotación minera que le suministra la materia prima.

b) La construida con materiales naturales cercanos, es decir, los suelos y rocas más idóneos que se emplearían para una presa clásica de tierra o escollera en la ubicación elegida.

La utilización de los residuos en el propio dique, tiene las ventajas de que se aprovecha el volumen de éste para almacenamiento y de que se economizan los gastos de excavación requeridos por los materiales naturales.

En cambio, esos residuos suelen tener varios inconvenientes como material para una presa:

- Exceso de humedad, por lo que necesitan una desecación si se quiere conseguir las deseables condiciones óptimas para la compactación clásica por tongadas.
- Exceso de finos, que puede exigir operaciones para eliminar parte de ellos o separar los tamaños gruesos con el fin de mejorar el material y evitar los peligros de licuefacción.
- Baja resistencia al corte, que suele traducirse en taludes más tendidos y mayor volumen de presa que la solución convencional.

El uso de los estériles de mina para el dique permite liberar espacio en las escombreras y evita las excavaciones o voladuras exigidas por los materiales naturales; pero son más irregulares y menos controlables que estos, pues están supeditados a la explotación minera y no permiten la selección que puede conseguirse en las presas convencionales al elegir libremente los préstamos o canteras a utilizar. Por ello, también darán lugar normalmente a taludes más suaves; a menudo requerirán más drenajes, para compensar la baja permeabilidad frecuente en el todo-uno que forman los desechos de la mina.

En términos generales, un dique construido con residuos tiene más volumen, es más delicado y exige más vigilancia que el clásico de materiales naturales.

La elección entre uno o otro tipo de solución dependerá de la calidad y proximidad de los materiales naturales disponibles, así como de la posibilidad de extraerlos dentro del vaso; esta última circunstancia es importante, pues permite ganar un volumen de almacenamiento igual al de la presa, como sucede al utilizar los residuos.

Si hay dentro del embalse materiales térreos suficientemente impermeables y materiales granulares de rozamiento interno elevado, lo probable es que convenga adoptar una presa de zonas diferenciadas construida con esos materiales naturales; esta solución puede resultar más económica que la de residuos, pues su mayor precio del metro cúbico colocado (por las operaciones de excavación y carga) podría quedar compensado con creces por un volumen de dique mucho menor.

Por el contrario, si los materiales naturales cercanos son de calidad mediocre, lo normal será que convenga más un dique construido con los residuos o estériles.

En ocasiones puede ser interesante una solución mixta: espaldón impermeable de residuos de planta, que suelen ser bastante impermeables, y espaldón resistente de material granular, cuando éste sea el único material natural cercano; o bien espaldón impermeable de arcillas cercanas y espaldón resistente de estériles de mina, cuando estos sean fragmentos de roca principalmente.

5. PECULIARIDADES DEL PROYECTO DE ESTE TIPO DE DIQUES

Una primera particularidad es el mayor cuidado requerido en los estudios de la cimentación del dique, insistiendo especialmente en el aspecto de la impermeabilidad; pequeñas filtraciones que en un embalse convencional carecen de importancia, pueden ser en este caso inadmisibles por producir una contaminación inaceptable de arroyos o mantos freáticos próximos. Cuando la impermeabilidad del cimiento o del vaso sea insuficiente, puede reforzarse mediante pantallas continuas o de inyecciones o bien con tapices impermeables en las zonas de posibles fugas (a veces los mismos lodos sedimentados hacen este papel de tapiz); otra solución será recoger las filtraciones mediante sistemas de drenaje adecuados, devolviéndolas al embalse mediante bombeo.

Es frecuente que los almacenamientos de residuos se sitúen en la proximidad de las minas que abastecen de mineral a la planta. En tal caso deberá tenerse en cuenta la influencia de las labores mineras existentes o futuras en la estabilidad del dique y la estanqueidad del vaso; las grandes excavaciones usuales en las minas a cielo abierto pueden comprometer la estabilidad de una ladera del vaso o de un estribo del dique, pues el talud de excavación podría deslizar debido a las presiones intersticiales generadas por el embalse cercano; las galerías y pozos de las minas subterráneas pueden producir asientos que fisuren el dique o produzcan grandes filtraciones en el vaso. No es raro tener que renunciar a buenos embalses

demasiado cercanos a la explotación minera, por causa de estos peligros.

Otra peculiaridad de estos diques es que no suelen estar sometidos a la solicitación de vaciado rápido, ya que generalmente el embalse se irá llenando por un proceso continuo; solamente sufrirán descensos de nivel pequeños y muy lentos debidos a la evaporación en los meses secos. Debido a esta circunstancia el talud agua arriba sólo estará sometido a las presiones intersticiales generadas en la construcción y normalmente podrá disponerse más escarpado que en una presa convencional de los mismos materiales. Por ese mismo motivo a menudo convendrá simplificar la sección tipo clásica de presa heterogénea (núcleo impermeable entre dos espaldones resistentes), pasando a una más sencilla formada por un espaldón impermeable agua arriba y otro resistente de material granular o escollera agua abajo.

Es muy deseable reciclar a la planta las aguas decantadas en el embalse, al menos parcialmente, pues ello tiene muchas ventajas: se precisa menos caudal de agua limpia, que en muchos casos es escasa y cara (por requerir su captación bombeos o largas conducciones); se reduce el volumen de almacenamiento necesario; se aminoran los problemas de contaminación y de control de las escorrentías al embalse.

En general, convendrá disponer en el pie de la presa una recogida de las posibles filtraciones y bombas para incorporarlas de nuevo al vaso, impidiendo que puedan contaminar agua abajo.

Lo normal es que estos diques se construyan por fases sucesivas, creando la capacidad de almacenamiento a medida que lo exige al ritmo de producción de residuos de la planta. Esta particularidad influye decisivamente en el proyecto, pues los diferentes métodos de construcción por etapas difieren en cuanto a la resistencia al corte y presiones intersticiales en el cuerpo del dique, es decir, en sus condiciones de estabilidad.

Como es sabido, en este tipo de diques pueden usarse en esencia los siguientes métodos constructivos:

1.º Método "agua arriba".

Cada fase se dispone encima y un poco agua arriba de la anterior, con lo que el cuerpo del dique va incorporando los residuos ya sedimentados en el embalse durante las etapas precedentes.

2.º Método "agua abajo".

El dique se inicia por su pie agua arriba y cada fase se apoya sobre la anterior pero desplazándose un poco hacia agua abajo. El cuerpo del

dique queda fuera de los límites de los residuos depositados.

3.º Método "por el eje".

Es un híbrido entre los dos anteriores, en el cual cada fase se apoya en la anterior de modo que el eje de la coronación se mantenga en un plano vertical. La mitad agua arriba del dique incorporará residuos y la mitad agua abajo puede construirse con otros materiales.

De los tres métodos citados para construir por etapas, el más recomendable es el de agua abajo, del dique, controlando su densidad y humedad, así como disponer drenajes en caso de que se precise reducir las presiones intersticiales. En cambio, los otros dos métodos tienen el inconveniente de que buena parte del dique está construido por residuos depositados hidráulicamente, con baja densidad, reducida resistencia al corte y condiciones de drenaje mal conocidas.

Es necesario tomar medidas apropiadas cuando se abandona el embalse por estar ya relleno de residuos. En primer lugar debe evitarse la contaminación de la atmósfera con nubes de polvo procedentes de los lodos desecados, para la cual puede cubrirse el vaso con capas de escollera o grava, plantaciones, riego con sustancias especiales tipo polímeros, etc.; otras medidas estarán dirigidas a garantizar que se siguen controlando las aguas naturales que llegan al vaso. Por otra parte, siempre será deseable recuperar el terreno del embalse para fines útiles, integrándolo en el paisaje circundante; estos fines pueden ser: la agricultura, previa extensión de una capa de tierra vegetal; el bosque o monte, con plantación de especies arbóreas o arbustivas de la región; o incluso la utilización para solares, si el embalse abandonado está junto a núcleos de población.

6. EVACUACION DE LAS AGUAS DECANTADAS Y NATURALES

La evacuación de las aguas decantadas de los lodos no presenta problemas de importancia por tratarse de caudales pequeños. Una solución es darles salida mediante una estación de bombeo flotante que los recicle a la planta. Otra posibilidad es evacuarlos mediante pequeños desagües de fondo bajo el dique, que llevan chimeneas recrecibles en su embocadura de entrada y se taponan con lechada o mortero de cemento al abandonarlos; esas chimeneas pueden ser verticales, construidas de anillos prefabricados, o bien inclinadas sobre la ladera o el paramento agua arriba del dique, en cuyo caso se forman con tubos que se van agregando a medida que sube el nivel de los residuos; las aguas evacuadas se bombean a la

DIQUES PARA ALMACENAMIENTO DE RESIDUOS INDUSTRIALES

planta o se vierten a un cauce natural, depurándolas previamente si es necesario.

Más problemas suele presentar el control de las aguas naturales que afluyen al embalse, pues éstas suponen a menudo caudales y volúmenes apreciables. Tal control se puede hacer por varios procedimientos:

a) Por evaporación en el embalse.

Este método, que es el más sencillo y económico de todos, es factible en cuencas de pequeña superficie ocupada en su mayor parte por el vaso. Lógicamente la evaporación media anual en éste deberá ser superior a la aportación media que recibe el embalse; pero se requiere un resguardo apropiado para almacenar los excedentes de aportación en meses o años húmedos, a evaporar en los períodos secos subsiguientes.

b) Por desvío del arroyo.

La idea es derivarlo agua arriba del embalse mediante un pequeño azud, que puede ser un simple terraplén, y conducirlo hasta agua abajo del dique mediante una tubería por el fondo del embalse o bien mediante un canal que contornee éste o vierta a otro arroyo próximo a través de algún collado lateral.

Es preferible la solución de canal, pues la de tubería enterrada ofrece riesgos de rotura por asentamientos debidos al peso de los residuos que rellenarán el vaso; también puede fallar por obstrucción, sobre todo después del abandono del embalse. En cambio, un canal de contorno puede revisarse y repararse fácilmente en todo momento, garantizando su funcionamiento aun después de terminar la vida útil de la planta.

c) Por un aliviadero.

Este procedimiento se puede aplicar cuando resulte admisible verter aguas naturales que se hayan mezclado con los lodos del embalse, sea porque baste la decantación en éste para reducir a límites aceptables su efecto contaminante o porque se prevea una depuración agua abajo.

Tal aliviadero tiene la particularidad de que habrá de evacuar a varios niveles de embalse, correspondientes a las diferentes fases de construcción del dique. Para ello puede disponerse la embocadura en una torre recrecible o con tomas a varias alturas, que enlace con una conducción (túnel o tubería) pasando bajo la presa. Otra posibilidad es proyectar varios desagües a diferentes alturas, pero en general esta solución resultará más cara y complicada.

d) Sistemas mixtos.

A veces es práctico almacenar las aportaciones naturales en las fases intermedias (previando el resguardo necesario en cada una de ellas) y controlarlas en la fase final, bien sea por evaporación, pues el vaso habrá alcanzado su mayor superficie, o bien con un aliviadero clásico dispuesto para el nivel máximo del embalse.

7. VIGILANCIA Y AUSCULTACION DEL DIQUE

En esta clase de presas tiene particular interés cuidar la vigilancia del comportamiento de la obra. Y ello por varios motivos: la posible contaminación que acarrearían las filtraciones; el uso frecuente de materiales delicados y poco conocidos, como son residuos de características variables y difícilmente previsibles; el empleo de algunos métodos constructivos, tales como los de agua arriba y por el eje, que no permiten el control usual de la compactación y de las presiones intersticiales.

En muchas ocasiones será ventajoso utilizar los resultados que se vayan obteniendo en la auscultación, para reajustar o modificar el proyecto del dique aprovechando la circunstancia favorable de que éste se construye progresivamente por fases.

Debe ponerse especial énfasis en la observación y aforo de las filtraciones en el dique y zonas agua abajo, para poder tomar a tiempo medidas correctoras en caso de que dieran lugar a una contaminación inaceptable de las aguas naturales.

También es importante la auscultación continua de las presiones intersticiales mediante piezómetros, con objeto de suplir las incertidumbres debidas a los materiales y métodos constructivos mencionados, así como para comprobar la eficacia de los sistemas de drenaje dispuestos. Si en la primera fase se midieron presiones superiores a las previstas en el proyecto, se tendrán datos para suavizar taludes o ampliar los drenajes en las fases siguientes.

Cuando se empleen residuos en la construcción del dique, convendrá tomar frecuentemente muestras in situ del mismo para ensayarlas y reunir una amplia estadística de estos materiales, cuyas características suelen ser muy variables en función de la materia prima que llega a la planta, la forma de vertido en la balsa y el tiempo transcurrido.

Deberá establecerse un plan de vigilancia de los niveles de residuos en el embalse y las cotas de la coronación del dique en las diferentes fases, para garantizar que el calendario de construcción asegura en todo momento los resguardos mínimos previstos en cada fase.

8. ALGUNOS EJEMPLOS DE DIQUES PARA ALMACENAR RESIDUOS

A continuación comentamos tres casos recientes de diques destinados a almacenar residuos de plantas diversas, que pueden servir como ilustración práctica de las ideas expuestas en los apartados anteriores.

8.1. Diques para una central termoeléctrica de carbón.

Se trata de una central que eliminará por vía húmeda las cenizas procedentes de la combustión. Requiere un volumen total de 25 Hm³ para almacenar los residuos producidos durante su vida útil.

Se consideraron tres embalses posibles en las cercanías de la central, todos ellos factibles en el aspecto geológico:

- Embalse número 1, que da el volumen total y se ubica en un arroyo de cierta importancia (cuenca de 30 Km²).
- Embalse número 2, con 7 Hm³ de capacidad y situado en una pequeña vaguada de tres kilómetros cuadrados de cuenca solamente.

— Embalse número 3, de capacidad 18 Hm³, ubicado en otra vaguada próxima con cuenca de 5 Km².

El embalse número 1 se desechó por razones económicas, pues exigía un aliviadero costoso y unas expropiaciones importantes. Se adoptó una solución compuesta por los embalses 2 y 3, más barata debido a la poca importancia de sus aliviaderos y al hecho de estar situado el vaso 2 en terrenos pertenecientes a la empresa propietaria de la central; por este motivo se realizará primeramente el dique del embalse número 2.

Como materiales para construir los diques, se dispone de las propias cenizas de la térmica o bien de arcillas y gravas a extraer principalmente dentro de los embalses. Los ensayos geotécnicos de laboratorio dieron los siguientes resultados:

a) Cenizas.

Se comportan como arenas limosas sin plasticidad.

Granulometría muy fina y uniforme, ya que el 99 por 100 pasa por el tamiz número 40, y el 49 por 100 por el número 200.

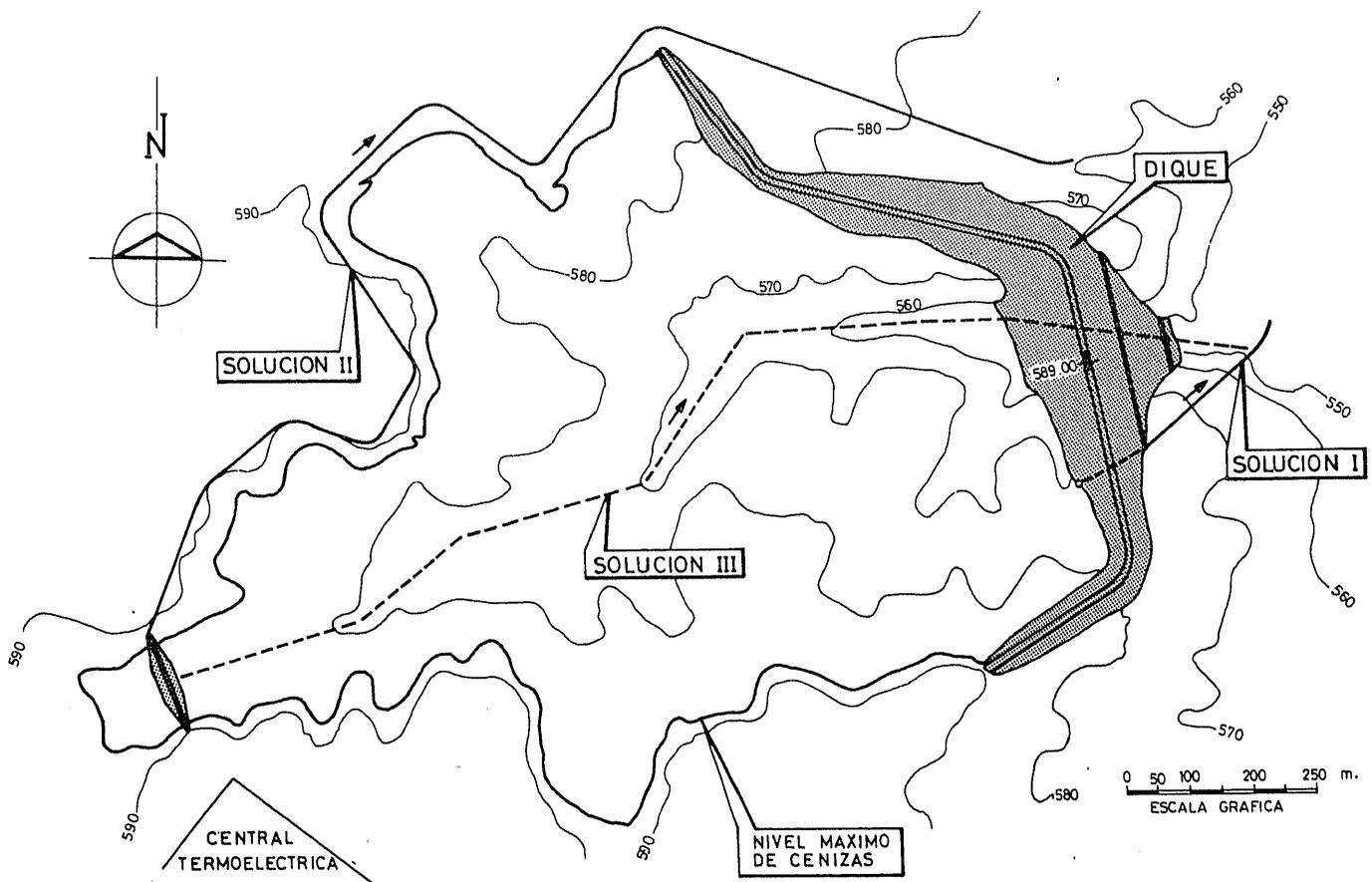


Fig. 1.—Planta del embalse número 2.

DIQUES PARA ALMACENAMIENTO DE RESIDUOS INDUSTRIALES

Coefficiente de permeabilidad $K = 10^{-7}$ cm/s.
Densidad máxima Proctor 1,2 Tn/m³ y humedad óptima 29 por 100.

Angulo de rozamiento interno efectivo 30°.

b) Gravas.

Tienen finos arenosos y limosos no plásticos, en proporción del 6 al 13 por 100.

Densidad máxima Proctor de 2 a 2,2 Tn/m³ y humedad óptima del 10 por 100.

Angulo de rozamiento interno entre 35 y 40°.

c) Arcillas.

Son más bien limosas y de baja plasticidad (índice cercano a 10).

Coefficiente de permeabilidad $K = 10^{-7}$ cm/s.
Densidad máxima Proctor de 1,7 a 1,9 Tn/m³ y humedad óptima del 13 al 16 por 100.

Angulo de rozamiento interno de 29 a 35° y cohesión efectiva despreciable.

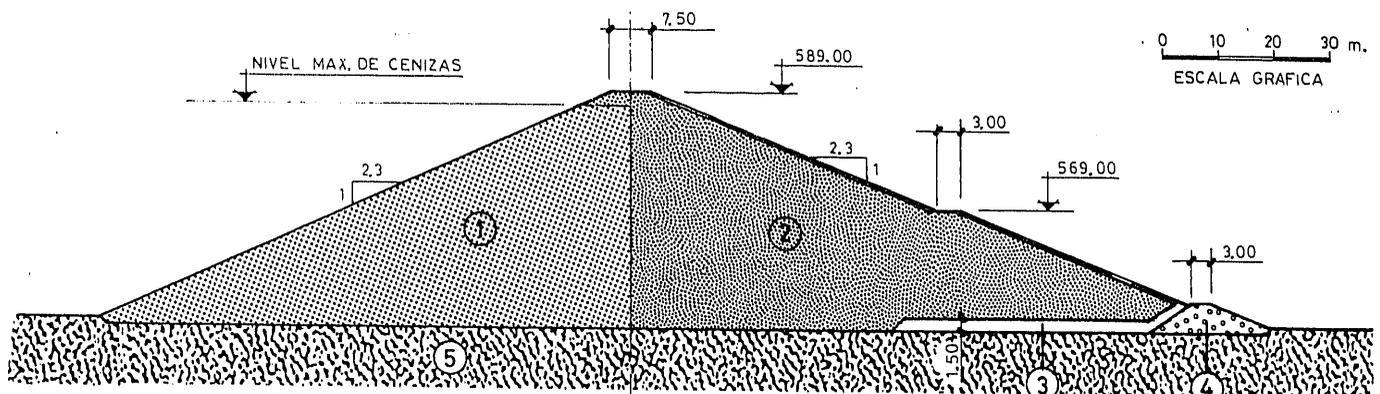
De lo anterior se deduce que puede construirse un dique homogéneo con el material artificial (cenizas), ya que es suficientemente impermeable y tiene una resistencia al corte aceptable, si bien presenta el inconveniente de una densidad muy baja; las cenizas se compactarían por el método clásico, pues es factible tomarlas en seco en la térmica y colocarlas en tongadas con la humedad óptima.

Otra alternativa es utilizar los buenos materiales existentes en las cercanías para construir un dique heterogéneo, con zonas diferenciadas de arcillas y gravas.

En el dique del embalse número 2 se tantearon las dos soluciones indicadas, resultando que la de cenizas costaba un 40 por 100 más que la de arcillas y gravas, por lo cual se adoptó ésta finalmente. Así, pues, estamos ante un ejemplo típico en la que la utilización de materiales naturales de buena calidad situados cerca del dique, es más ventajosa que la de los residuos de la planta, por ser estos un material más bien mediocre.

En la figura 1 puede verse la planta del embalse número 2, incluyendo las diversas soluciones consideradas para el control de las aguas naturales, que luego comentaremos.

En la figura 2 aparece la sección tipo adoptada para el dique, de acuerdo con los materiales naturales elegidos. Dado que no hay vaciado rápido, se ha simplificado la sección disponiendo un espaldón arcilloso agua arriba y otro de gravas agua abajo. Obsérvese que el talud del paramento agua arriba es tan escarpado como el de agua abajo, en vez de ser más suave como sucede en las presas convencionales; ello se debe, a que las presiones intersticiales durante la construcción, únicas a tener en cuenta en la estabilidad del espaldón agua arriba, han resultado ser muy reducidas en las arcillas limosas y de baja plasticidad que lo constituyen. No es necesario disponer un filtro entre los dos espaldones, pues los finos limo-arenosos de las gravas cumplen las condiciones de filtro respecto a las arcillas. Como el espaldón agua abajo resulta poco permeable, para reducir sus presiones intersticiales se coloca un manto de drenaje en su contacto del cimiento. No es necesario proteger el talud agua arriba, pues sólo habrá una capa de agua muy somera sobre las cenizas sedimentadas y el efecto del oleaje será despreciable.



- 1 ARCILLAS LIMOSAS DE BAJA PLASTICIDAD
- 2 GRAVAS CON FINOS ARENOSO-LIMOSOS
- 3 MANTO DE DRENAJE
- 4 PIE DE PROTECCION DE ESCOLLERA
- 5 CIMIENTO DE MARGAS IMPERMEABLES

Fig. 2.—Sección tipo del dique.

En este caso no se prevé construir el dique por fases; debido a su volumen modesto y a la corta vida del embalse, resulta más económico realizarlo de una vez empleando maquinaria potente, que no se justificaría en la construcción escalonada.

Como el embalse tiene una superficie pequeña respecto a la de su cuenca, no es factible controlar por evaporación las escorrentías que recibe. Para este control se han comparado tres soluciones posibles (ver esquemas en la figura 1):

Solución I.

Aliviadero formado por una torre con tomas a varias alturas, una tubería alojada en una galería visitable bajo la presa y un canal de descarga. Se dimensiona para un caudal reducido, pues el embalse lamina muy fuertemente las avenidas, pero requiere una cierta depuración antes de verter al arroyo.

Solución II.

Desvío del arroyo mediante un azud en cola del embalse y un canal de contorno. No mezcla las aguas naturales con las decantadas en el vaso, pero ha de dimensionarse para la punta de crecida apenas laminada en el azud.

Solución III.

Desvío del arroyo mediante un azud y una tubería enterrada bajo los residuos del embalse. Tiene las mismas ventajas e inconvenientes que la anterior.

Una valoración aproximada de las tres soluciones, puso de manifiesto la ventaja económica de la primera, cuyo coste es del orden de la mitad de la segunda y de la tercera parte del de la tercera. Así, pues, conviene adoptar la solución I, aunque exija algunos gastos para depurar el pequeño caudal vertido.

8.2. Diques para una fábrica de concentrados de uranio.

Los diques en cuestión servirán para almacenar los lodos evacuados por una planta, actualmente en estudio, que tratará los esquistos extraídos de una gran explotación a cielo abierto. Se precisa un volumen de 15 Hm³ para depositar los residuos producidos durante veinte años.

Se analizaron cinco ubicaciones posibles de los diques, que aprovechan arroyos o depresiones cercanas a la planta (fig. 3). La solución B ha de desecharse a pesar de sus buenas características topográficas, pues tiene una cuenca de cierta importancia y exigiría una obra de desvío del arroyo muy costosa, que es imprescindible para no contaminar sus aguas. También se rechazó la solución D, por sus interferencias graves con las instalaciones de la mina actual.

Las tres ubicaciones restantes tienen cuencas pequeñas y no ofrecen problemas geológicos. Se compararon económicamente tres alternativas, que tienden a apurar las capacidades de los vasos:

- Dique A para un embalse de 15 Hm³.
- Dique C para un embalse de 5 Hm³.
- Dique E para un embalse de 2,3 Hm³.

Partiendo de la sección tipo que luego veremos, se cubicaron aproximadamente los diques y se obtuvo en cada uno de ellos el valor de un índice de calidad económica: volumen de embalse obtenido por cada metro cúbico de dique. El valor de este índice resultó ser 4,2 para el dique A; 7 para el C, y 1,7 para el E.

Desde el punto de vista estrictamente económico, la alternativa más ventajosa es la del dique C. Pero según las más recientes prospecciones en la mina, la futura excavación de ésta se acercará peligrosamente a la ladera derecha de la ubicación del dique; la estabilidad de dicha ladera quedaría seriamente comprometida, debido a las elevadas presiones intersticiales que produciría el

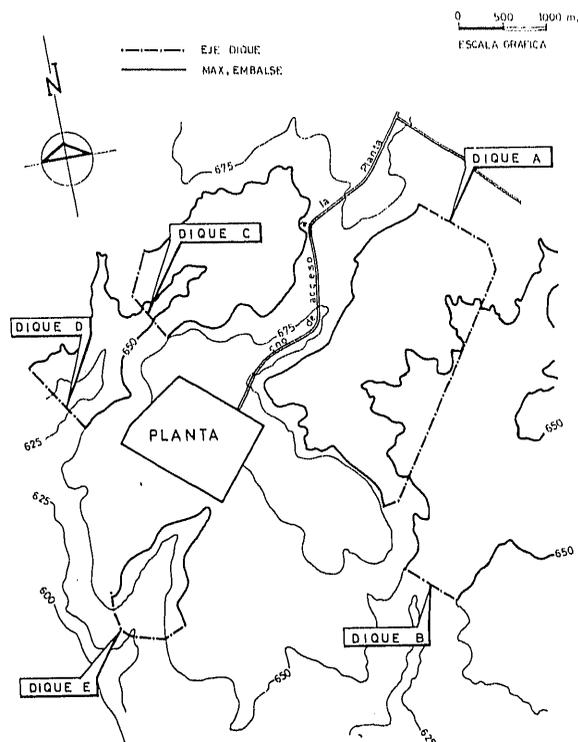


Fig. 3.—Ubicaciones posibles de diques.

DIQUES PARA ALMACENAMIENTO DE RESIDUOS INDUSTRIALES

agua del próximo embalse en el talud de la excavación, que será notablemente escarpado y alcanzará gran profundidad (50 a 80 metros); también serían de temer importantes filtraciones desde el embalse a la mina, por el fuerte gradiente hidráulico de aquéllas y por el agrietamiento previsible en la masa rocosa de la ladera, sometida a la acción de enormes voladuras.

Descartando el dique C por razones de seguridad y el E por su bajo índice económico, se seleccionó la solución A para obtener el volumen total de 15 Hm³ requerido.

Los materiales disponibles para construir el dique, son los siguientes:

- Sólido contenido en los lodos eliminados por la planta.
- Estériles de la mina cercana, constituidos por las pizarras y esquistos excavados que se desechan por no llegar al contenido mínimo exigido de minerales de uranio.
- Arenas arcillosas existentes dentro del embalse.
- Terraza cuaternaria de la meseta en que se ubica la planta.

El sólido de los lodos de planta es inaceptable para el dique, pues contiene un 13 por 100 de yesos resultantes de neutralizar con cal el agua sulfúrica empleada en el proceso de fabricación. Si usáramos este material para un núcleo o espaldón impermeable, se producirían fenómenos de disolución análogos a los que se presentan en los terrenos yesíferos naturales, con peligro de sifonamientos en el cuerpo del dique.

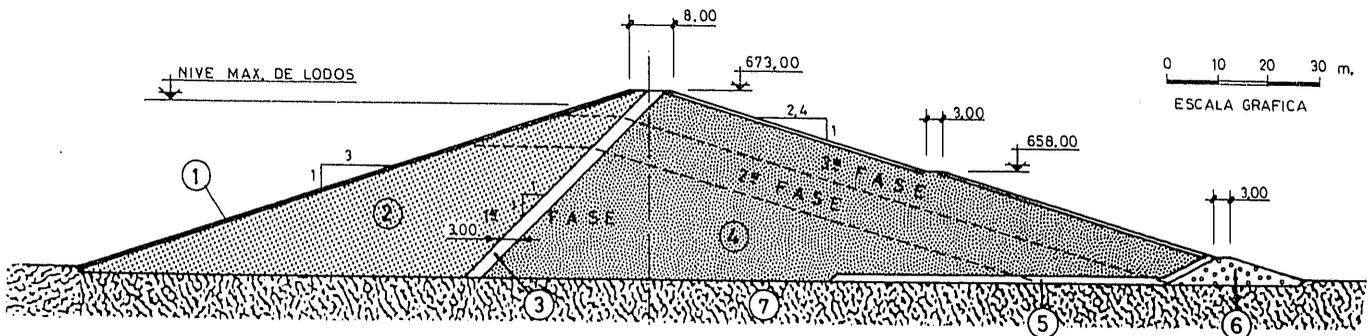
Las arenas arcillosas del vaso resultan adecuadas como material impermeable. Según los primeros ensayos de laboratorio tienen entre el 20 y el 30 por 100 de finos que pasan por el tamiz ASTM-200, índice de plasticidad de 16 a 26 y coeficiente de permeabilidad del orden de 10⁻⁶ cm/seg.

Para material granular no es conveniente la terraza mencionada, pues resulta difícilmente explotable debido a su espesor reducido; además daría una cantidad muy inferior a la necesaria. Por ello es preferible utilizar la escollera que forman los estériles de la mina, cuyo ritmo de producción supera con mucho a las necesidades en el dique; la gran ventaja económica de ahorrar en éste los costes de la excavación y carga, compensa con creces el inconveniente de que tal escollera no será limpia, sino mezclada con finos procedentes de los estratos más blandos.

En la figura 4 puede verse la sección tipo del dique prevista en principio, que habrá de reajustarse como consecuencia de los ensayos detallados de materiales que se están realizando actualmente.

También en este caso se dispone una sección simplificada, constituida por un espaldón impermeable agua arriba y otro de escollera agua abajo, separados por un filtro; dado que es dudosa la condición drenante del espaldón agua abajo, se prevé asimismo un drenaje en su cimentación. El filtro y drenaje citados se construirán con arenas limpias de un río relativamente próximo. El paramento agua arriba se protege con una capa de escollera vertida, pues el agua decantada en el embalse alcanzará espesores importantes.

Como el dique tendrá un volumen considerable, que asciende a unos 3,5 millones de metros



- 1 PROTECCION DE ESCOLLERA VERTIDA
- 2 ARENA ARCILLOSA DE PLASTICIDAD MEDIA
- 3 FILTRO DE ARENA
- 4 ESTÉRILES DE MINA (esquistos y pizarras con finos)
- 5 MANTO DRENANTE
- 6 REPIÉ DE ESCOLLERA SELECCIONADA
- 7 CIMENTACION DE PIZARRAS IMPERMEABLES

Fig. 4.—Sección tipo del dique.

DIQUES PARA ALMACENAMIENTO DE RESIDUOS INDUSTRIALES

cúbicos, y el embalse tardará veinte años en llenarse, se cuenta con una ejecución por fases. Para la definición de éstas (fig. 4) se han tenido en cuenta los siguientes criterios:

- No conviene multiplicar demasiado el número de fases, pues interesa que cada una tenga un volumen suficientemente grande para hacer económico el uso de equipo pesado en el transporte y compactación del material; de lo contrario podría aumentar notablemente el coste unitario del metro cúbico colocado.
- Es ventajoso que el plano de contacto entre los dos espaldones tenga inclinación hacia agua arriba, con objeto de reducir el volumen de las primeras fases.
- La banda que agrega cada fase agua abajo de la anterior, es deseable tenga un ancho horizontal holgado (unos 15 metros al menos) para facilitar las operaciones de extensión y compactación de las tongadas.

Las aguas decantadas se evacuarán mediante unas bombas sobre plataforma flotante, para su reutilización en la fábrica.

El control de las aguas naturales que recibe el embalse se hará por evaporación, pues casi toda la cuenca aportadora está ocupada por el vaso (figura 3); la precipitación anual media en la zona es de 640 mm y resulta muy inferior a la evaporación media en el embalse, que será de 1.320 mm por año. En la primera fase la evaporación se complementará con un almacenamiento parcial de las escorrentías en un resguardo apropiado.

8.3. Dique para la ampliación de una térmica existente.

En una central térmica de carbón, que funciona desde hace años, se plantea una importante ampliación agregando nuevos grupos termoeléctricos. Se precisa un volumen de 20 Hm³ para almacenar las cenizas producidas por esa ampliación, evacuadas en forma de lodos.

Se compararon tres ubicaciones posibles para el embalse, todas ellas con la capacidad de 20 Hm³ deseada:

- Solución 1, que va adosada a una ladera inmediata a la central. Como dicha ladera es bastante pendiente, para conseguir la capacidad citada se requiere una presa de 63 metros de altura y 13,7 millones de metros cúbicos de volumen.
- Soluciones 2 y 3, en arroyos más alejados de la central. Resultan diques de unos 30

metros de altura, que cubican 4,2 y 5,1 millones de metros cúbicos respectivamente.

Valoradas las tres soluciones teniendo en cuenta las diferentes distancias de transporte del material al dique, resultó que la 2 era la más económica. En este caso la elección no viene influida sensiblemente por la obra de control de las aguas naturales, pues la cuenca aportadora tiene una superficie pequeña y comparable en las tres soluciones. Por ello, se ha seleccionado la referida solución 2, cuya planta puede verse en la figura 5.

Para la construcción del dique puede utilizarse dos clases de materiales, disponibles en las cercanías del embalse:

a) Arcillas miocenas.

Se extraerían de préstamos situados fuera del embalse.

Tienen un porcentaje de finos superior al 70 por 100, índice de plasticidad entre 7 y 17, coeficiente de permeabilidad de 10^{-11} a 10^{-8} cm/seg., densidad máxima Proctor 1,7 Tn/m³, humedad óptima del 12-15 por 100, ángulo de rozamiento interno de 24 a 32° y cohesión despreciable.

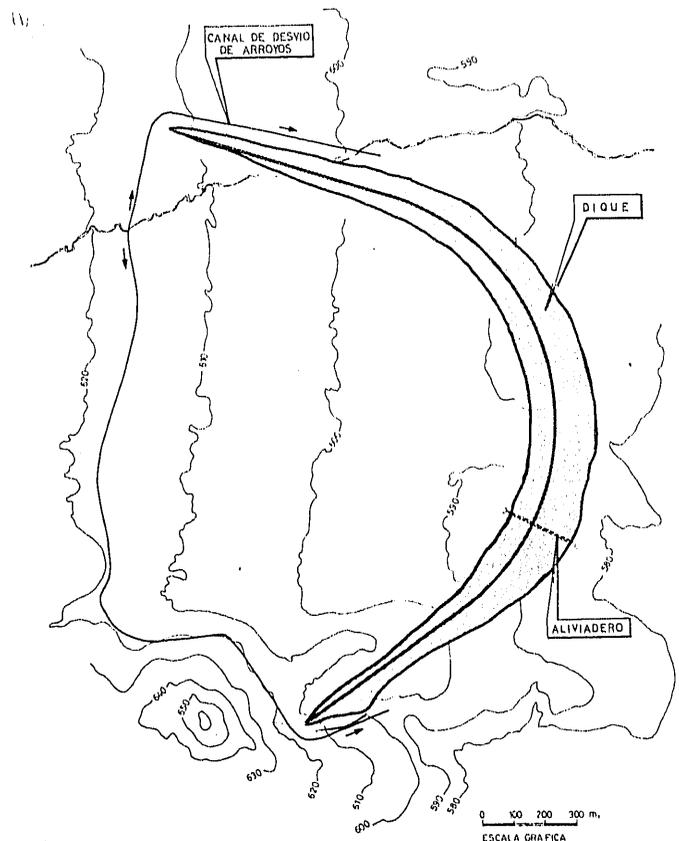


Fig. 5.—Planta del embalse.

