



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

25
100

**DISEÑO DE UNA CORTINA DE
MATERIALES GRADUADOS**

TRABAJO ESCRITO

QUE EN OPCION DE TESIS PRESENTA:

JOSE RAFAEL JIMENEZ VARGAS

PARA OBTENER EL TITULO DE:

I N G E N I E R O C I V I L

MEXICO, D. F.

1984



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

INDICE

	PAGINA
1. INTRODUCCION	1
2. ALTURA DE LA CORTINA	9
2.1. Capacidad de Azolves o Capacidad Muerta	10
2.2. Capacidad de Aprovechamiento	11
2.2.1. Aportaciones del Rfo	11
2.2.2. Demandas del Aprovechamiento	12
2.3. Superalmacenamiento	13
2.4. Bordo Libre	14
3. ASPECTOS GEOLOGICOS	16
3.1. Topografía en el Embalse	16
3.2. Topografía en la Boquilla	17
3.3. Geología en el Embalse	17
3.4. Geología en la Boquilla	20
4. BANCOS DE MATERIALES. CARACTERISTICAS MECANICAS DE LOS MATERIALES	28
4.1. Material Impermeable	29
4.2. Gravas y Arenas para Filtros	30
4.3. Material de Transición	30
4.4. Enrocamiento	31
4.5. Propiedades Mecánicas de los Finos	32
4.6. Propiedades Mecánicas del Enrocamiento	35
4.7. Gravas y Arenas	36
4.8. Aspectos Importantes de la Roca de Cimentación	37
5. METODOS DE CONSTRUCCION Y CONTROL DE CALIDAD	38
5.1. Núcleo Impermeable	38
5.2. Respaldos Permeables	39
5.3. Filtros y Transiciones	40
6. CONCLUSIONES	42
BIBLIOGRAFIA	44

1. INTRODUCCION.

Debido a la diversidad, magnitud y complejidad de las estructuras que conforman un aprovechamiento hidráulico, la Ingeniería de Prensa ocupa un lugar predominante dentro del contexto de la Ingeniería Civil. De esta reflexión, aunada a la inclinación que --siento por la Obras Hidráulicas, se desprende el interés en llevar a cabo la presente tesis.

Dadas sus características, se comprende que resultaría muy --complicado presentar un trabajo donde se involucren todos los componentes de una presa (sea almacenadora o derivadora), ya que esto implicaría presentar de una manera bastante elemental los aspectos primordiales de cada uno, dando por resultado omisiones importantes y deficiencias en la calidad del mismo. Tomando en cuenta lo anterior, en este trabajo se pretende mostrar con cierta profundidad los aspectos más importantes de una de las estructuras que conforman una presa: la cortina.

Esta, es el elemento de mayor importancia pues aparte de requerir un volumen de materiales significativo en comparación con las demás y el cuidado minucioso que se tiene al construirla, son precisamente, las características de la cortina, lo que define la naturaleza de los elementos restantes de la presa. No hay que olvidar que el buen o mal funcionamiento de una presa, depende de la interrelación que existe entre las partes constitutivas de la misma; es decir, todos los elementos que la integran deben trabajar eficazmente.

Como es bien sabido, al colocar la cortina de manera transversal en el lecho del río, obstaculiza el flujo del mismo y, en consecuencia, forma un almacenamiento o derivación. Deberá cumplir ciertos requisitos tanto para su estabilidad, impermeabilidad y en general con un cuidadoso programa de construcción que involucre todas las actividades afines que tengan como meta una construcción adecuada.

La clasificación de las cortinas se lleva a cabo mediante diversos parámetros. Estos son:

- a) Su altura.
- b) Su propósito.
- c) El tipo de construcción y los materiales que la constituyen. (Cuadro No. 1).

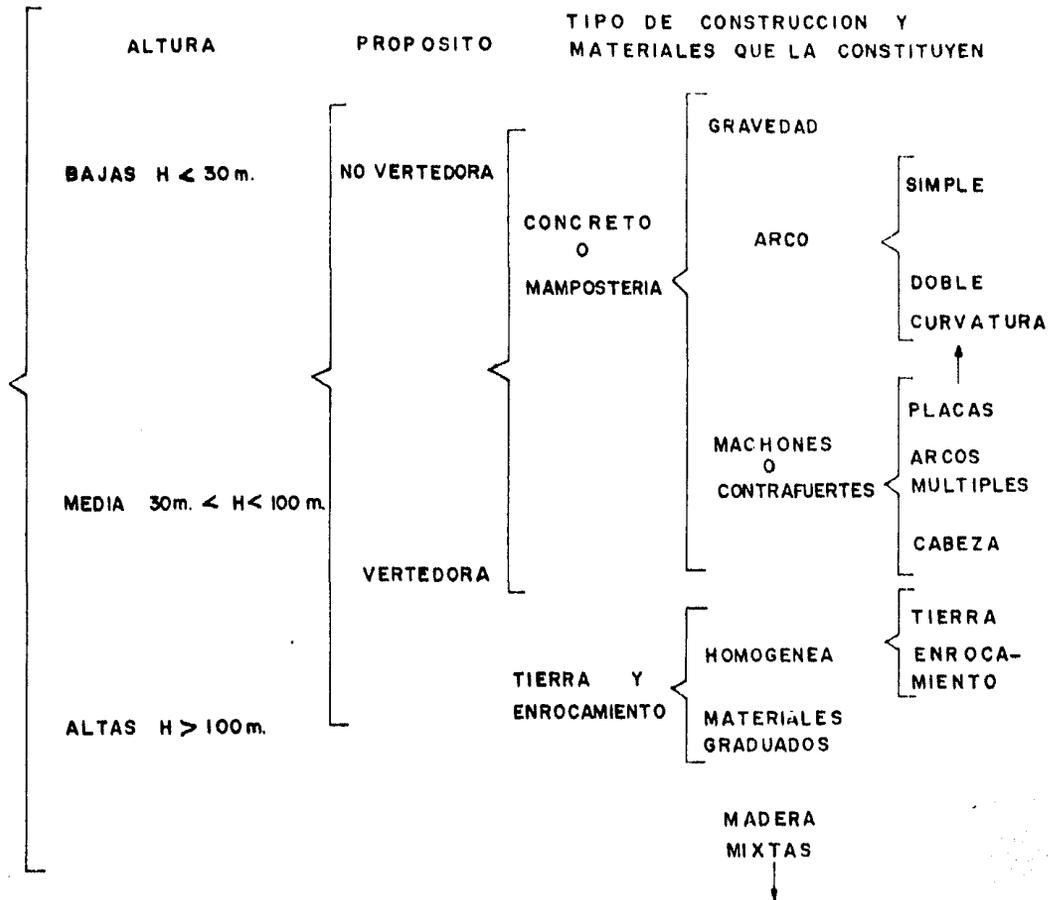
Los tipos de cortinas más socorridos en México, son:

- a) Gravedad.
- b) Homogénea.- De tierra o enrocamiento.
- c) Materiales Graduados.

Es en estos tres tipos de cortina en donde se tiene un gran experiencia y un mayor conocimiento acerca de las condiciones que deben imperar para la construcción de tal o cual cortina.

En este trabajo trataremos de presentar los aspectos más importantes y vitales de una cortina de materiales graduados. Trata

CORTINAS



CUADRO 1. CLASIFICACION DE CORTINAS

remos éstos desde la determinación de la altura de la cortina pasando por la geología y geotécnica, hasta los métodos de construcción.

Se le ha dado el nombre de cortinas de materiales graduados, a las estructuras en que los materiales se distribuyen de una manera gradual, es decir; de los materiales finos que constituyen el corazón impermeable se pasa a los filtros, después por las transiciones, hasta llegar a los enrocamientos. Es decir se pasa de una zona impermeable a una zona semipermeable y por último a una zona permeable. Estas dos últimas zonas van siendo colocadas, tanto hacia aguas arriba como hacia aguas abajo a partir del corazón impermeable de la estructura. Es importante señalar que las cantidades de cada una de las zonas dependerá principalmente de dos cuestiones:

- a) La disponibilidad que haya en la zona de dichos materiales.
- b) Las características mecánicas de éstos.

En la Figura No. 1, se presenta la sección tipo de una cortina de materiales graduados.

Es conveniente señalar que existen diversos factores que intervienen en la elección del tipo de cortina más adecuado para la boquilla.

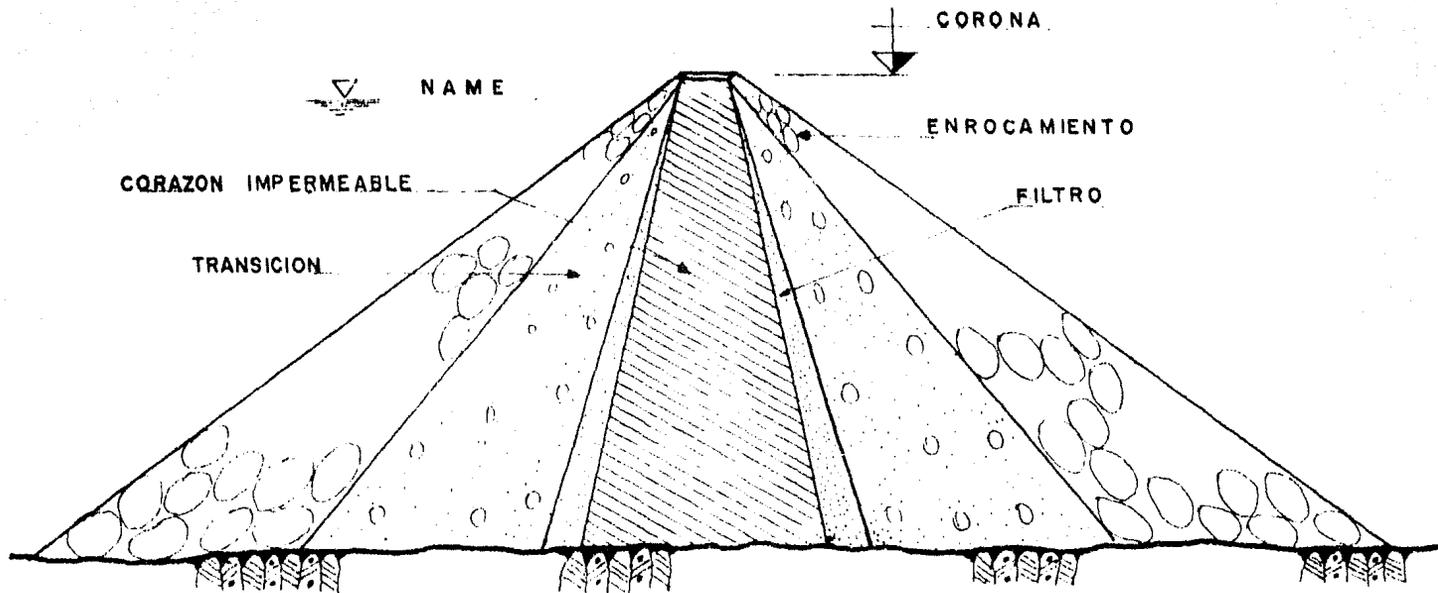


FIG. 1. CORTINA DE MATERIALES GRADUADOS.

A continuación se presentan dichos factores:

a) Función de la Obra.

Es claro que la función de la obra es un factor determinante en las dimensiones de la cortina, y con ellos de las demás estructuras y a la vez afecta al tipo de cimentación y por último a los requerimientos del talud de aguas arriba, debido a un vaciado rápido de la estructura.

b) Características de la Boquilla, Cimentación y Vaso. (Geología).

Quizá este criterio sea el fundamental para la elección del tipo de cortina, ya que dependerá del tipo de roca existente en el sitio de la cimentación para la determinación de la cortina. También la longitud de la boquilla y la topografía son factores determinantes, aunados con las características geológicas del vaso.

c) Materiales de Construcción.

Las propiedades mecánicas de los materiales será un criterio que pesará sobre la decisión del tipo de cortina, sobre todo en cortinas de tierra y enrocamiento, ya que de dichas propiedades dependerá la geometría de dicha cortina. Por otra parte, el volumen de material necesario para la estructura, las distancias de acarreo de los materiales, y el proceso de la extracción de los materiales, también son un parámetro de elección del tipo de cortina.

d) Situación Sismológica.

Dependiendo de la región sísmica donde se encuentre la estructura, se tomarán los criterios necesarios de proyecto para la misma, con la aclaración de que el diseño de una cortina es más conservador en una zona sísmica -- que en una zona que no lo es.

e) Efectos del Clima.

Los efectos del clima nos condicionan el tiempo disponible para la ejecución de las obras y si influyen de una manera determinante en el tipo de cortina. En México, el principal obstáculo climático son las lluvias y sobre todo en las cortinas de tierra y enrocamiento, pues con el agua proveniente de las lluvias, se altera de manera significativa el grado de compactación de los terraplenes ya colocados.

f) Aspectos Económicos.

Es uno de los factores más importantes para la elección del tipo de cortina, pues de acuerdo a los requerimientos de una presa, se elige el tipo de cortina, pero tenemos que conocer si ese tipo de cortina se justifica económicamente ante dicho proyecto. Aquí en México, suele ser práctica común, el de presentar para determinado proyecto, varios anteproyectos (estudios de gran visión) y de estos anteproyectos escoger el más adecuado. En ocasiones, la solución es la integración de varios anteproyectos; es decir, se toman las partes más funcionales de

dichos anteproyectos para que, al fusionarlos, obtener la solución más viable del problema.

g) Aspectos Hidráulicos.

Con frecuencia, y desde el punto de vista económico, es la obra de excedencias la estructura más importante que influye en la determinación del tipo de cortina, siguiéndole en su orden la obra de desvío y la obra de toma.

De lo expuesto anteriormente, se concluye que es importante tomar en cuenta a cada uno de dichos factores, ya que dada la diversidad de los problemas a resolver, en algunos casos serán unos los factores que tengan más ingerencia en la decisión final que otros.

2. ALTURA DE LA CORTINA.

Para conocer la altura de la cortina, es necesario la realización de los estudios correspondientes, tanto para definir la -- curva masa de aportaciones del río, como también la curva masa de las demandas. Dichos estudios son de carácter hidrológico e hidrométrico. Es, en base a éstas curvas, como podemos conocer la relación existente entre la oferta y la demanda, y esto a su vez nos proporciona un indicio acerca de la altura hidráulica de la cortina.

En este capítulo nos referimos a la altura de la cortina -- (H), como altura hidráulica.

La altura queda definida mediante la suma de las alturas -- que satisfacen los requerimientos de cada uno de los factores hidráulicos que intervienen en dicha altura. Dichos factores son:

- a) Capacidad de azolves o capacidad muerta: (h_1).
- b) Capacidad de aprovechamiento: (h_2).
- c) Superalmacenamiento: (h_3).
- d) Bordo libre: (h_4).

Entonces, la altura de la cortina es:

$$H = h_1 + h_2 + h_3 + h_4$$

Para los tres primeros puntos anteriores, es indispensable la curva Elevaciones -- Capacidades, ya que en base a ella, obtene-

mos los volúmenes correspondientes para cada concepto y en consecuencia su elevación. En cuanto al punto d), las condiciones que definen esta altura son debidas a la variación de la S.L.A. por efectos del viento (oleaje y marea) en el embalse.

Se define también, que la altura H es la diferencia en elevación entre el punto más bajo en el lecho original del río y el término de la cortina, es decir el punto más alto de dicha estructura que es la corona.

Dado que el presente trabajo se enfoca hacia el diseño de la cortina, sólo mencionaremos los aspectos principales de los factores hidráulicos que definen la altura de la cortina, omitiendo la explicación de los métodos más comunes para la obtención de las alturas, por ser éste un tema de Obras Hidráulicas.

2.1. Capacidad de Azolves o Capacidad Muerta.

Al circular el río sobre su cauce, transporta cierta cantidad de material sólido. Dicho material lo denominamos Q_s , es decir, gasto sólido; este gasto sólido se compone de dos grupos que son: gasto de arrastre y gasto en suspensión.

Debido a la colocación de la cortina, ésta impedirá el paso del flujo de agua, ocasionando que el material sólido transportado se deposite en el fondo del embalse. Es precisamente la denominada "Capacidad de Azolves", la necesaria para retener los azolves que lleguen al -

vaso de la presa, durante la vida útil de la misma.

Para evaluar el gasto sólido, es indispensable recurrir a un estudio por medio de muestreos en el río, donde Q_s es una función de la velocidad del río y de las características del material.

Una vez determinado el gasto sólido, se determina el coeficiente α , que relaciona el gasto sólido con el gasto total Q_T del río, es decir: $\alpha = \frac{Q_s}{Q_T}$.

Finalmente, multiplicando a α por el volumen total de agua (V) que entra al embalse, durante la vida útil de la presa, obtendremos la Capacidad Muerta y sólo restará entrar con el volumen correspondiente a la capacidad muerta, a la gráfica de Elevaciones-Capacidades, para definir la elevación de dicha capacidad y restar la elevación del punto más bajo en el lecho del río para conocer la altura h_1 .

2.2. Capacidad de Aprovechamiento.

Principalmente, la capacidad útil depende de dos factores importantes que son: las aportaciones del río y las demandas del aprovechamiento.

2.2.1 Aportaciones del Río.

La medición de las aportaciones del río, se pueden ---

efectuar de diversas maneras. Dichos métodos son:

- a) Sección - Velocidad.
- b) Sección - Pendiente.
- c) Sección de Control.

Dependiendo de la importancia de la presa en proyecto, y de los instrumentos de medición existentes en las estaciones hidrométricas, será el método de medición a escoger para tal proyecto. - Es evidente que entre más información obtengamos, mejor conoceremos el comportamiento del río y por consiguiente nos proporciona un panorama más amplio del problema a solucionar.

2.2.2. Demandas del Aprovechamiento.

Las demandas del aprovechamiento hidráulico, están en función de las necesidades por satisfacer de la presa. Dichas necesidades son:

- a) Abastecimiento de agua potable a poblaciones.
- b) Agua requerida para riego.
- c) Generación de Energía Eléctrica.

Abastecimiento de agua potable a poblaciones.

Para conocer esta demanda, solamente es necesario conocer - la población por servir (incluyendo un incremento demográfico) y - la dotación de agua por habitante diaria, con lo cual podemos obtener el Qmed. diario que se requiere extraer de la presa.

Agua requerida para riego.

En cuanto a este concepto es necesario efectuar una evaluación de las necesidades de agua. Esta evaluación se efectúa a través de la evapotranspiración o uso consuntivo.

Generación de Energía Eléctrica.

Bastará con establecer la Potencia Efectiva requerida de la planta hidroeléctrica y después analizar la relación existente entre la Potencia Efectiva y el Producto QH , para saber si la planta hidroeléctrica es de pequeña o gran caída.

2.3. Superalmacenamiento.

Se le conoce con el nombre de superalmacenamiento o sobrecapacidad al volumen retenido para la regulación de avenidas y se expresa en millones de m^3 , es decir; es el volumen existente entre el Nivel de Aguas Máximo Ordinario (NAMO) y el Nivel de Aguas Máximo Extraordinario (NAME).

Para la obtención del NAME, es indispensable conocer la avenida máxima de diseño, para lo cual, existen métodos estadísticos para determinarla. Una vez determinada la avenida máxima de diseño y conociendo las características geométricas del vertedor, se procede a efectuar el tránsito de dicha avenida por el vaso, con el objeto de determinar la descarga máxima en el vertedor y también, conocer el volumen retenido, ya que con este último, conoce

remos la elevación correspondiente al NAME.

En cuanto a los métodos existentes para la ejecución del -- tránsito de la avenida, éstos son:

- a) Métodos Analítico.
- b) Método Semigráfico o de Puls.
- c) Método Gráfico.

Se recomienda el uso del método semigráfico por la razón de que es muy exacto y también, porque se comprende perfectamente lo que está ocurriendo durante el tránsito, cosa que no ocurre con -- los otros dos métodos.

2.4. Bordo Libre.

El bordo libre es una longitud dada en metros y que mide el desnivel existente entre el NAME y la corona de la cortina, y de-- pende principalmente de las siguientes características:

- a) Marea y Oleaje de Viento.
- b) Pendiente y Características del Paramento Mojado.
- c) Factor de Seguridad.

a) Marea y Oleaje de Viento.

La marea de viento es la sobreelevación del agua, arriba -- del nivel de aguas tranquilas, debida al arrastre provocado por el

viento, en su mismo sentido. El efecto del oleaje del viento es - una función de la altura de la ola H_o y de la altura que dicha ola pueda remontar el paramento mojado de la cortina. Las gráficas de Saville son de gran utilidad para la resolución del problema.

b) Pendiente y Características del Paramento Mojado.

Para este punto también existen gráficas que relacionan: -- las características del oleaje (altura y longitud) con la pendiente y el acabado del paramento y de las cuales obtenemos el remonte R de la ola para tales o cuales condiciones existentes.

c) Factor de Seguridad.

El factor de seguridad es una cantidad en m , que el proyectista debe estimar y que puede variar entre 0.5 y 1.0 m . Es aquí donde se pueden hacer algunas consideraciones sobre la seguridad - en la relación con oleaje del sismo.

3. ASPECTOS GEOLOGICOS.

La geotécnica ocupa dentro del contexto de la Ingeniería de Presas, un lugar primordial, ya que es en ésta en donde se apoyan todas las decisiones referentes a las características de diseño de los elementos que conforman una presa; y particularmente es en el diseño de la cortina donde alcanza una importancia relevante, dado que esta estructura, desde cualquier punto de vista ingenieril es la más importante de todas. Debido a lo antes expuesto, se le dará un mayor énfasis en el presente trabajo a dichos aspectos.

Con el fin de obtener mayor claridad sobre el tema, trataremos primeramente los aspectos topográficos (grosso modo) para continuar propiamente con los aspectos geológicos. Para ambos aspectos, se estudiarán tanto la boquilla como el embalse.

3.1. Topografía en el Embalse.

Generalmente, el levantamiento topográfico en el embalse se realiza mediante poligonales alrededor del vaso en estudio y el levantamiento detallado con plancheta. Es práctica común el uso de fotografías aéreas para estos casos, ya que dada las dimensiones del embalse, se trabaja con mayor rapidez. Pero dicha práctica, tiene una desventaja; que cuando el embalse en estudio se encuentra cubierto por bosques, los levantamientos suelen ser afectados por errores importantes. Dichos errores se traducen en la elección errónea de las características de diseño de las estructuras, lo que provoca un aumento considerable en el presupuesto de la - -

obra en caso de que sea necesario realizar modificaciones a las estructuras. Por ello, es recomendable verificar dicho levantamiento mediante la realización de una topografía terrestre.

3.2. Topografía en la Boquilla.

Dado que es en este sitio en donde se localizan las estructuras componentes de la presa, es necesario contar con una topografía detallada de la boquilla para poder diseñarlas lo mejor posible. - Es por esto que se requiere que la escala de la topografía no sea grande, y por otra parte, es en base a la topografía como obtenemos las cantidades de excavación y materiales requeridos para la ejecución del proyecto.

Es recomendable que la topografía abarque también los caminos de construcción, o en su defecto sirva para el trazo de dichos caminos en caso de que no existan.

Finalmente, es usual realizar este trabajo con plancheta, -- aunque en ocasiones se recurren a otros métodos de levantamiento para verificar dicho levantamiento.

3.3. Geología en el Embalse.

Simultáneamente a la realización de los trabajos topográficos, es necesaria la iniciación de los trabajos geológicos en el embalse y su boquilla del proyecto en estudio.

La información recopilada en los trabajos geológicos efectuados en la zona del proyecto son de gran valía, ya que nos permite conocer el estado geológico general del sitio, es decir, sus condiciones favorables y desfavorables; y en base a estas condiciones poder desechar el sitio o en su defecto, señalar las recomendaciones que se deben seguir para el buen funcionamiento de la presa.

En cuanto a la información recopilada, ésta debe ser lo suficientemente completa como para poder definir las formaciones geológicas, fallas, fracturamientos, plegamientos y planos de contacto. Por otra parte, conocer el grado de intemperismo de la zona.

Referente a la geología del embalse, es importante señalar que, aunque de un estudio geológico realizado con anterioridad se conozcan las características geológicas del sitio, es recomendable por seguridad, destacar una brigada geológica que confirme o rectifique dicho estudio, o si no existen estudios previos, conocer las características geológicas del sitio.

La fotogeología es en estos casos un elemento de gran ayuda pero no es suficiente, por lo cual una vez realizado el estudio fotogeológico, se procede a efectuar un recorrido por parte de la brigada de geólogos en todo el embalse, a fin de detectar las zonas del mismo, que merezcan de un estudio detallado, como puede ser: - la presencia de estratos permeables, sistemas de fracturamiento y fallas significantes, estabilidad de las paredes del embalse y derrumbes.

Es también en este estudio geológico, donde se visualizan - las posibles alternativas para los caminos de acceso al sitio, y - en el caso de que se afecten algunos caminos por la construcción - de la presa, localizar los nuevos trazos para dichos caminos.

Regresando al recorrido por el embalse de parte de la brigada de geólogos, es aquí donde el ingeniero debe de aplicar su gran experiencia y todos sus conocimientos para poder determinar si el embalse es o no apto para el proyecto; y en caso de ser apto, señalar la manera de mejorar las condiciones geológicas del sitio.

Dadas las dimensiones de un embalse, resultaría antieconómico realizar pruebas para poder determinar la aceptación del sitio; de ahí que la experiencia y amplios conocimientos geológicos del ingeniero sean su principal arma para dicha evaluación.

La primera característica (y principal) que se busca en el embalse, es que sea relativamente impermeable; es decir que las -- pérdidas de aguas existentes, sean razonables, de acuerdo a la magnitud del proyecto. Estas pérdidas son debidas principalmente a:

- a) La alta permeabilidad existente en el material componente del embalse.
- b) Dado el sistema de fallas y el agrietamiento presentes - en el sitio, éstos sean capaces de producir pérdidas con siderables de agua en dicho embalse.

En cuanto al primer inciso, será necesario determinar el ma

terial que forma el embalse y determinar su permeabilidad por medio de algunas pruebas, si es necesario.

Por lo que respecta al segundo inciso, solamente dependerá de la capacidad de los ingenieros geólogos en cuanto a la interpretación de las condiciones geológicas existentes del sitio para la determinación de la presencia o no de pérdidas.

Existen otras características que definen un embalse adecuado; como puede ser: la inexistencia de derrumbes en las laderas debido a la saturación, pero considero, que la primera y más importante que debe tratarse es la permeabilidad del vaso.

Para finalizar, existen recursos que nos permiten mejorar la impermeabilidad y evitar las pérdidas a través de las fallas en el embalse. Dependerá de las condiciones existentes en cada caso en particular, para la aplicación de tal o cual recurso.

3.4. Geología en la Boquilla.

Una vez determinado el eje de la boquilla, se procederá a la ejecución de los trabajos geológicos que nos permitan conocer las condiciones de despiante de la cortina; y es ahí donde radica la importancia de dichos estudios, ya que nos proporciona los criterios de diseños para las estructuras componentes del aprovechamiento y especialmente para la cortina. En este tema trataremos desde las exploraciones más sencillas, hasta la descripción de las pruebas más complicadas.

Las exploraciones más sencillas, y las que se realizan - - primeramente, son las trincheras, y consisten en pequeñas excavaciones realizadas a mano (con pico y pala), con el objeto de remover el material intemperizado y conocer la roca existente en estado natural, es decir; podemos conocer el grado de intemperismo de la roca, así como determinar la profundidad de la limpia del terreno.

Las exploraciones que a continuación se presentan, se realizan con la finalidad de conocer: el tipo de formación, fracturamiento, la existencia de fallas. Esta es su finalidad principal, aunque también se aprovechan para la recolección de roca para - - pruebas de resistencia en el laboratorio y por último efectuar ensayos "in situ" en cuanto a permeabilidad.

Dichas exploraciones se les conoce como:

- a) Pozos a cielo abierto.
- b) Túneles (Galerías).

En cuanto a los pozos a cielo abierto, éstos se elaboran con la finalidad de conocer las condiciones geológicas en la cimentación de la cortina. Generalmente, estos pozos son elaborados exclusivamente con pico y pala; esto es con el objeto de conocer la roca en estado natural, con un mínimo de alteraciones provocadas por la ejecución del pozo.

Por lo concerniente a las galerías, éstas son realizadas -

en ambas laderas de la boquilla, con la finalidad de conocer principalmente el fracturamiento y el sistema de fallas de la formación para conocer la factibilidad de algún deslizamiento de cualquiera de las laderas, durante la etapa de construcción o bien, durante su funcionamiento. Estas exploraciones generalmente se llevan a cabo mediante el uso de explosivos, lo cual hace que sean exploraciones costosas. También estos túneles, sirven para conocer las características geológicas de la cimentación para el desplante de otras estructuras, tales como: la obra de toma y el vertedor.

El número de galerías y pozos a cielo abierto, su localización, longitud y profundidad, dependen de la incertidumbre existente en la geología de la boquilla y por otra parte, de la importancia del proyecto.

Por lo general, las dimensiones de estas exploraciones son tales, que permita la circulación, sin ningún obstáculo de los ingenieros que realizan la Inspección; dichas dimensiones son: 2m x 2m ó 1.5m x 2m., dependiendo de las características de la roca.

Dada la magnitud de la inversión requerida para las presas, es necesario profundizar las investigaciones geológicas, con el objeto de garantizar en mayor grado la estabilidad de la obra. Es por esta razón que en Ingeniería de Presas sea práctica común y obligada la elaboración de sondeos (perforaciones) sobre el eje de la boquilla. Las razones por las que se recurre a este procedimiento, son de carácter económico y topográficas. Primeramente,

de carácter económico, por la sencilla razón de que resulta muy costoso explorar ciertas zonas con galerías abiertas, y en segundo término, que las zonas en estudio sean -- inaccesibles, tanto para el factor humano, como para el equipo.

Estas perforaciones se utilizan para realizar pruebas de permeabilidad y para la aplicación de los métodos geofísicos.

Dentro de los métodos geofísicos, el más usual, es el que consiste en medir la velocidad de propagación de una onda producida con explosivos a través de las formaciones de las laderas del lecho del río; este método nos proporciona una idea de la estratigrafía del lugar y de la presencia de fallas.

Es un método relativamente económico, que complementado -- con los sondeos, puede ser un elemento de gran valía.

Regresando a los sondeos, su número, localización, dirección, inclinación y profundidad, dependen principalmente de la geología de la zona y a la magnitud del proyecto. No existen criterios generalizados, ya que cada caso es diferente. Lo que es posible hacer, es seguir muy de cerca los resultados obtenidos en la exploración e ir proponiendo modificaciones al programa original de perforaciones, esto último depende de la intuición y capacidad interpretativa del ingeniero que tiene a su cargo dichos -- sondeos. A manera de sugerencia, se propone que la profundidad de los sondeos sea cuando menos igual a la altura hidráulica -- (H) de la cortina, ya que se ha visto en la práctica que es una

longitud en la cual sus resultados son confiables.

Para estas perforaciones, se usan máquinas rotatorias y se tiene que ir ademando la perforación. También es común el uso de equipo que trabaja por percusión.

Los sondeos son de gran ayuda, ya que por medio de la extracción de las muestras de roca podemos conocer la estratigrafía de la boquilla y efectuar pruebas de permeabilidad en el sitio, - amén de que nos proporciona muestras para la determinación en el laboratorio de sus características mecánicas.

Es un trabajo complicado, el cual requiere de un personal capacitado, dada la importancia que representan para nosotros los resultados.

Dada la importancia que tiene la permeabilidad de la roca en la Ingeniería de Presas, las pruebas de permeabilidad se han convertido en un elemento indispensable de los sondeos geológicos es decir que deben de aparecer de manera sistemática en la realización de un sondeo.

La determinación de la permeabilidad de la roca se efectúa con la finalidad principal de conocer los problemas de circulación de agua que puedan presentarse a través de la cimentación de la presa y principalmente de la cortina. Dicha permeabilidad se puede determinar por medio de la ejecución de las pruebas de permeabilidad tipo Lefranc y Lugeon, que a continuación se explican-

de manera expedita.

Prueba Lefranc.- Esta se realiza generalmente cuando la profundidad del sondeo es poca y sobre todo que sean terrenos aluviales por explorarse. La perforación del sondeo, se convierte en un simple permeámetro de carga constante, con la siguiente descripción. En la entrada de la exploración se proporciona un gasto, necesario para mantener fijo el nivel hidráulico. Con este dato, aunado a la carga de agua, la longitud del tramo de prueba y el diámetro del pozo, puede calcularse la permeabilidad de la roca. Entonces tenemos:

$$k = \frac{CQ}{H}$$

Siendo:

k = Coeficiente de permeabilidad en $m/seg.$

Q = Gasto necesario, en $m^3/seg.$

H = Carga de agua, en $m.$

C = Coeficiente que depende de las dimensiones y forma de la cámara filtrante en $m.$

$$C = 0.366 \frac{\log \left[\frac{1 + \left(\frac{l^2}{D} + D^2 \right)^{1/2}}{1} \right]}{1}$$

La permeabilidad obtenida, es una permeabilidad puntual, ya que la naturaleza de las condiciones de la prueba no permite una permeabilidad promedio, a menos de que se trate de un permeá-

metro de carga variable, donde la permeabilidad obtenida, si es -- promedio. Esta última manera de realizar la prueba Lefranc en Mé- xico, es la más común y sencilla y consiste, en llenar la perforación con agua hasta la boca y medir al descenso del espejo en función - del tiempo, o bien, abatir el nivel original mediante bombeo y re- gistrar la recuperación del manto de agua a intervalos de tiempos - conocidos. El coeficiente de permeabilidad se calcula de manera - similar al anterior.

Prueba Lugeon.- Esta consiste en medir el gasto de agua, -- en litros por minuto y por metro lineal de perforación, que fluye por la roca bajo una presión de 10 kg/cm^2 ; la absorción así regis- trada es la unidad Lugeon. La prueba se realiza en tramos de 3 a - 5 m. de longitud, aislándolos con empaques de cuero o de hule. El equipo necesario para la ejecución de la prueba es: una bomba de - inyección, el manómetro que se instala en el brocal del pozo y el -- aforador de caudales. Es necesario registrar los gastos a medida - que se incrementa la presión hasta alcanzar la máxima, así como el regresar a cero. Dado que no es lineal la relación entre caudales y presiones, resulta inadmisible extrapolar los datos obtenidos; - es frecuente que, por limitaciones en la bomba, no se alcance la - presión de 10 kg/cm^2 e ingenuamente se proporcionen absorciones -- extrapoladas, lo cual es incorrecto. Estas pruebas son lentas, -- pues para cada presión debe esperarse hasta alcanzar la condición - de flujo constante durante 15 minutos cerca de la superficie, la - prueba es difícil de realizar debido a fugas de agua.

Esta prueba a parte de ser una prueba para definir la permeabilidad, es una prueba de calidad, ya que al proporcionar presión sobre el estrato, nos proporciona un primer indicio acerca de la calidad de la roca en cuestión.

Por lo referente a la aplicación de una prueba Lefranc o Lugeon, ésta depende principalmente del grado de fracturamiento del estrato en estudio, y no al razonamiento de que solamente en suelos se aplica Lefranc y Lugeon para estratos rocosos, como usualmente se acostumbra.

Regresando a los sondeos, es posible, conforme al avance de estos obtener un primer indicio acerca de la calidad de la roca y bastará con obtener el Índice de la Calidad de la Roca (en inglés: R.Q.D.), para conocer dicha calidad. Dicho parámetro es desde el punto de vista ingenieril y no meramente geológico (como el caso del porcentaje de recuperación), lo que propicia que dicho parámetro sea parte indispensable de los sondeos a realizar en tal o cual boquilla.

4. BANCOS DE MATERIALES. CARACTERISTICAS MECANICAS DE LOS MATERIALES.

Al mismo tiempo que se ejecutan los levantamientos topográficos y geológicos, es necesario iniciar la búsqueda de los materiales de construcción en las inmediaciones del sitio. Concretamente para la construcción de la cortina se requieren: tierra, arena, grava y roca; en cantidades importantes, lo que implica la búsqueda de esos materiales en cantidad suficiente, en las cercanías del sitio; ya que el costo de la cortina se reduce a medida en que los bancos de materiales se encuentran más próximos.

Dichas exploraciones deben realizarse mediante una brigada integrada por personas con conocimientos acerca de técnicas de campo referentes a la identificación de los materiales y provistas de un equipo mínimo que les permita determinar sus características principales, los volúmenes aprovechables, y además extraer muestras representativas para ensayarlas en el laboratorio.

Una vez localizadas las zonas de los bancos próximas a la boquilla, la brigada debe realizar primero sondeos para comprobar en cada una de ellas el tipo de material y su potencialidad. Las exploraciones son pozos a cielo abierto excavados con pico y pala, y su número es el mínimo necesario para hacer una comparación preliminar de bancos y tipos de suelo disponibles. Con esta información, el encargado del trabajo selecciona los préstamos más convenientes, solicita el levantamiento topográfico de los mismos a la brigada respectiva y consulta a los geólogos sobre el origen y ca-

racterísticas de las formaciones en estudio. En esta etapa de la investigación interesa la clasificación correcta de los suelos y la obtención de muestras, lo que puede lograrse mediante los procedimientos descritos a continuación.

4.1. Material Impermeable.

Se elaboran pozos a cielo abierto y por medio de inspección visual y pruebas de campo sencillas se procede a la clasificación del material encontrado y con la elevación correspondiente se continúa a conocer los perfiles del terreno y por último se obtienen los volúmenes disponibles. A continuación, se procede a la ejecución de los muestreos del suelo, de la siguiente manera:

Se determina la cantidad de material para los ensayos en el laboratorio, así como el número y la localización de los ensayos y por último, el plan de ensayos necesario para la determinación de las propiedades mecánicas del material.

Si el banco por explotar se encuentra aguas arriba de la cortina, es necesario (con frecuencia) realizar un levantamiento topográfico del sitio. Esto es con el objeto de planear la explotación del mismo, de tal manera que dicha explotación sea lo más óptima posible; ya que no hay que perder de vista que tendremos situaciones desfavorables como: la variación de los tirantes de agua en el río y las alteraciones producidas por el río, principalmente.

4.2. Gravas y Arenas para Filtros.

Normalmente los depósitos de grava y arena se encuentran en el lecho del río, y aún durante el estiaje, a corta profundidad -- aparece el agua. Para explorar y extraer muestras es necesario recurrir a cucharas de 60 a 90 cm. de diámetro, operadas con equipo rotatorio de baja velocidad. Si el banco es alto respecto al río, conviene abrir pozos a cielo abierto hasta encontrar la roca.

Con las muestras extraídas de las exploraciones, se realizan determinaciones granulométricas, y en caso de que las gravas y arenas se utilicen como agregados, se efectuará un análisis mineralógico, a fin de conocer si continen elementos que reaccionan con -- los álcalis del cemento.

4.3. Material de Transición.

Una parte de este material es el producto de la excavación -- en la obra de control y excedencias, obra de desvío y en ocasiones en la obra de toma. Es decir, que por cuestiones de economía es -- que se lleva a cabo el aprovechamiento de dicho material, ya que -- por ser un volumen significativo, representa un gran ahorro en los costos de la estructura.

Generalmente, existe libertad en cuanto a las características del material, ya que por ejemplo los tamaños de la rezaga, dependerá del procedimiento de excavación realizado (por lo regular se acostumbra que el tamaño de la rezaga sea intermedio entre el --

del enrocamiento y los filtros de la cortina). Finalmente, en cuanto a los requerimientos que debe cubrir dicho material, éstos no son severos y solamente deberá cumplir las características de una roca sana.

4.4. Enrocamiento.

Una vez obtenida la información acerca de los volúmenes potenciales existentes de grava, material impermeable y rezaga, es factible estimar el volumen de enrocamiento necesario para la estructura. En base a esta estimación, se fija el número, el tipo y la profundidad de las exploraciones necesarias para investigar los mantos rocosos.

Generalmente, sucede que el volumen de enrocamiento es significativo, lo que deriva en que se tenga que obtener un enrocamiento barato y de buena calidad, por lo que se acostumbra la localización de diversos bancos potenciales de roca, cuya exploración se explica a continuación:

Primeramente se elaboran trincheras en el sitio, con el objeto de determinar el espesor del material intemperizado. A continuación se procede a la elaboración de pozos a cielo abierto en el manto rocoso, con el objeto de visualizar la existencia de cambios de formación, descubrir el fracturamiento existe y la presencia de fallas.

Para finalizar es usual la aplicación de sondeos con extrac-

ción de corazones, esto es con el fin de completar la información - recabada en los dos métodos anteriores. Es natural que el número - y profundidad de estas exploraciones dependan principalmente de la geología y del volumen de material a extraer.

Concluidas las exploraciones, se procederá a evaluar los resultados, que a su vez definirán la o las canteras a explotar; así mismo, se elaborará el plan de ataque de las canteras en conexión con los caminos de acceso. Es recomendable una vez seleccionada - la cantera a explotar, realizar pruebas de explotación para rati-- ficar o rectificar la bondad de las especificaciones a cumplir pa-- ra el enrocamiento.

En lo referente a los resultados y sobre todo a las propie-- dades mecánicas que deben de satisfacer cada uno de los materiales de la cortina, a continuación se presenta una sinópsis de tales re-- querimientos.

4.5. Propiedades Mecánicas de los Finos.

En primer término, resalta que las propiedades mecánicas de este material dependen de las condiciones de compactación y por -- tanto, las presentadas en determinada estructura no necesariamente son requeridas en otras; por tanto el uso de un solo patrón de com-- pactación resulta inadmisibile para todas las posibles situaciones.

Ante esta circunstancia, sólo se mencionarán las propiedades mecánicas de los suelos y los requerimientos que deben de cumplir--

se para un buen funcionamiento.

Las propiedades mecánicas de los finos, dependen básicamente de 3 parámetros que son: la relación de vacío "e", el grado de saturación "Gw" y por último, de la estructura o arreglo relativo de las partículas sólidas. Por lo cual, es necesario el conocimiento de dichos parámetros para poder evaluar las propiedades mecánicas de los finos, que a continuación se presentan.

Permeabilidad.- La permeabilidad k, de un suelo compactado, es la primer característica en analizar. Se considera que un material es impermeable cuando alcanza un coeficiente de permeabilidad igual o menor a 10^{-7} cm/seg., con lo cual se tendrá la obligación de obtener como mínimo el valor antes mencionado para garantizar que contamos con un corazón impermeable adecuado.

Compresibilidad y Expansividad.- En cuanto a los cambios de volumen de los finos, es importante conocerlos para saber si estos cambios de volumen se encuentran en un rango aceptable y en caso contrario, tomar las disposiciones convenientes para su corrección.

Resistencia al corte.- Para esta propiedad, su evaluación depende de dos casos:

A corto plazo, esto es, durante la construcción de la cortina o inmediatamente después de ésta.

A largo plazo, o sea, después que el suelo ha sufrido todos los cambios de W y δd permitidos por las condiciones ambientales.

Tubificación.- Se debe de garantizar la no existencia de pérdida de material fino en la cortina, ya que esto provocaría una degradación en el corazón impermeable, disminuyendo su funcionalidad. La propiedad más importante de un material, en cuanto a su resistencia a la tubificación, es el índice de plasticidad, por lo cual, los finos que presentan una alta plasticidad ($I_p > 15$), son los que ofrecen mayor resistencia al arrastre de partículas por las fuerzas de filtración, en tanto los materiales con un $I_p < 6$, son los más propensos a este fenómeno.

A continuación sólo se enlistarán las propiedades o requerimientos que deben tomarse en cuenta para el diseño del núcleo impermeable.

- a) Homogeneidad.
- b) Permeabilidad.
- c) Baja Compresibilidad.
- d) Alta resistencia al corte.
- e) Aceptación de asentamiento diferenciales sin agrietamiento.

Finalmente, dependerá de las características de la obra, la importancia que adquiera cada una de estas propiedades en el diseño de la estructura.

Contenido de Agua.- En el proceso de la compactación, el contenido de agua juega un papel muy importante, ya que es en base a este parámetro donde se asegura un grado de compactación óptimo. Es en el laboratorio y en base a la aplicación de la prueba Proctor Estandar y Proctor Modificada en las muestras del suelo para compactar, donde se determina el valor óptimo del contenido de agua en el cual el peso específico seco sea máximo.

Regularmente, se considera que a partir de un grado de compactación mayor del 95% la compactación es buena. Referente a la consecución del grado de compactación, dadas las características de la curva contenido de agua-peso específico seco, es posible obtener dicho grado por dos caminos diferentes: por la rama del contenido de agua menor al óptimo y por la rama del contenido de agua mayor al óptimo. Esto es importante, ya que las propiedades del núcleo impermeable se ven beneficiadas o mermadas (según sea el caso) con la elección del contenido de agua. Por lo que dependerá del Ingeniero Proyectista, establecer el camino apropiado a seguir.

Finalmente, se recomienda efectuar las pruebas de compactación de manera sistemática con cada uno de los bancos de materiales, con la finalidad de lograr un eficiente control en la calidad de la compactación.

4.6 Propiedades Mecánicas del Enrocamiento.

Lo primero que se estudiará del enrocamiento es su resistencia a los factores climáticos, ya que la acción de dichos factores

res puede provocar un deterioro importante en un lapso de tiempo -
corto en dicho enrocamiento.

Este punto es fundamental, ya que ésta es la función princi-
pal del enrocamiento en una cortina; no permitir degradación en -
los materiales de la cortina.

El tamaño del enrocamiento, dependerá de las dimensiones -
de la cortina y de la bondad de la cantera para proporcionar los -
tamaños solicitados en el proyecto.

Para finalizar, bastará que la roca formante del enrocamien-
to cumpla con las condiciones normales de esfuerzo a la compre - -
sión y esfuerzo cortante para considerarla adecuada para dicho en-
rocamiento.

Generalmente, se recomienda que la rezaga de la excavación -
sea un material poco comprensible, con el objeto de que los asenta
mientos diferenciales no sean grandes y provoquen grietas.

4.7. Gravas y Arenas.

Las gravas y las arenas juegan un papel importante en el - -
funcionamiento de una cortina, ya que ambas son las partes consti
tutivas de los filtros, elementos que se encargan de sellar cual-
quier grieta que se presente en el corazón impermeable, evitando-
de esta manera, la erosión interna (tubificación) de la cortina.

Es frecuente encontrar en el sitio de proyecto de la presa, volúmenes importantes de estos materiales, por lo que no existe ninguna dificultad para la elaboración de estos filtros.

Para garantizar el buen funcionamiento de los filtros, es necesario cumplir con lo siguiente: una adecuada granulometría, ser de un espesor generoso y estar libres de finos.

4.8. Aspectos Importantes de la Roca de Cimentación.

Con el objeto de redondear este trabajo, a continuación presento de manera sintetizada los aspectos más importantes de la roca de cimentación.

El comportamiento de una cortina de materiales graduados depende, en la mayoría de los casos, de las propiedades mecánicas de la roca de cimentación.

Las propiedades que se consideran las más importantes y definitivas son: la compresibilidad, permeabilidad, la discontinuidad del manto y por último, la deformación en la cimentación; es decir su comportamiento.

Todas estas propiedades se conocerán mediante la aplicación de ensayos de laboratorio y en base a los resultados que arroje, se tomará la decisión acerca si el manto rocoso de la cimentación es apto o no para soportar la estructura.

5. METODOS DE CONSTRUCCION Y CONTROL DE CALIDAD.

En la construcción de una cortina de materiales graduados, - dada la magnitud de la misma, es importante la aplicación de métodos especiales para: obtener económicamente los materiales escogidos y colocarlos en forma adecuada en la cortina, y ejercer una -- vigilancia de estos procesos para cumplir con las especificaciones del proyecto.

Dichas labores son complejas y requieren una buena coordinación tanto técnica como administrativa, e incluso llegan a compli-arse más debido a una información incompleta del sitio.

En este capítulo se presentan de una manera general los métodos de colocación de estos materiales y la forma de controlar su - calidad.

5.1. Núcleo Impermeable.

Al paso del tiempo, se ha ido actualizando el equipo de compactación, los más comunes son: Rodillo pata de cabra y también el rodillo liso con vibrador acoplado. También se usa el pisón neumá- tico en las cercanías del terrapién de alguna estructura.

La determinación del espesor de las capas y el número requerido de pasadas del compactador, es común realizarse en un terra-- pién de prueba. Los resultados arrojados conducen a curvas que --

relacionan: la variación del grado de compactación (C), con el número de pasadas del equipo (N), para diferentes espesores de la capa (h); y de acuerdo a estos datos, se escoge h y N para el valor de C que se especifique.

Las capas de las terracerías se tienden con tractor, si el material requiere riesgo adicional, este puede efectuarse con carro tanque o mangueras y se requiere el uso de una motoconformadora para revolver el material y garantizar una buena distribución del agua suministrada. Existen ocasiones en que el tendido de las capas que no se hace de manera continúa y por tanto existen tramos en el núcleo, expuestos a un secado temporal, y antes de continuar con el tendido de nuevas capas, será necesario aplicarle agua. También para algunos tipos de arcillas con alto índice de contracción, será necesario la colocación de una protección para evadir los efectos del secado.

De una manera sistemática, se realizan pruebas de pesos volumétricos y contenido de agua en el terraplén a medida que éste avanza. Dicho control no es solo necesario para corregir deficiencias de construcción, sino para evaluar posteriormente el comportamiento de la cortina.

5.2. Respaldos Permeables.

Para dichos materiales existen dos criterios constructivos diferentes: uno propicia la colocación del material en capas muy gruesas y a volteo, lo cual va asociado a la producción de un enro-

camiento pesado. El otro, partiendo de la base que lo conveniente es un material bien graduado y compuesto de fragmentos más bien -- pequeños, se inclina por capas de espesor menor de 60 cm., compactadas con rodillos vibradores.

En investigaciones recientes, se llegó a la conclusión de -- que la producción de un material bien graduado, con tamaño máximo de 30 cm., favorece la resistencia al corte y la compresibilidad -- del material y finalmente, este material debe disponerse en capas de aproximadamente 50 cm. de espesor.

Las pruebas que se realizan para verificar la calidad de -- los enrocamientos son las llamadas calas, con las cuales se determinan los pesos volumétricos secos. Después, los materiales ex--- traídos son procesados en plantas cribadoras para conocer su granu lometría.

Para finalizar, no esta lejana la época en que los enroca- -- mientos merezcan un tratamiento igual que los filtros y las terracerías.

5.3. Filtros y Transiciones.

El requisito fundamental para estos dos elementos de la cor- -- tina es una buena granulometría.

En un principio, las transiciones se colocaban en capas de -- 30 a 50 cm. y eran compactadas solamente con el paso de camiones.-

En épocas recientes, las especificaciones son más rígidas y exigen que las capas en estado suelto no excedan de 30 cm., que el material se tienda mediante cajas distribuidoras, o bien se formen montones para esparcirlos y mezclarlos con motoconformadora, que el material se trate con un riego de agua, y que las capas se compacten aplicando de dos a cuatro pasadas de rodillo vibrador de 2-toneladas. Para la colocación de los filtros, las normas son idénticas a las del caso anterior.

Para la compactación, se ejerce una vigilancia mediante pruebas de peso volumétrico seco (calas) tanto en filtros y transiciones. Además, con frecuencia, se verifican las granulometrías de los materiales.

6. CONCLUSIONES.

El primer aspecto importante que se desprende del presente - trabajo es la importancia que adquieren las exploraciones e inves- tigaciones geológicas en el sitio del proyecto. Es vital para el ingeniero civil los resultados geológicos arrojados por la investi- gación, ya que en base a ellos es donde él o los ingenieros proyec- tistas fincan los criterios de la cortina y en general del aprove- chamiento hidráulico.

Debido a esto, dicho proyectista debe ser un profesional pre- parado, capaz de interpretar al máximo dichos resultados para que- esto conduzca a un panorama lo más certero posible, acerca de las- condiciones imperantes en el lugar de estudio. También es impor- tante la experiencia profesional que tenga el proyectista referen- te a esta actividad.

De lo antes expuesto, resalta, que la Ingeniería de Presas - es una actividad muy compleja y que por lo tanto requiere de un -- número considerable de profesionales, los cuales forman equipos de trabajo en diferentes actividades que conforman dicha disciplina, - y para que ésta se realice lo mejor posible, es necesario que exis- ta una coordinación permanente, real, entre todos los equipos de -- trabajo que participen en el proyecto.

Por lo concerniente al proceso constructivo, resulta natural que dada la magnitud de la obra, requiera ésta una supervisión y - más concretamente, un control de calidad adecuado, tal que pueda -

garantizar en un momento dado, un mínimo de mantenimiento en la cortina. Debido a esto, se deberá de contar con un control de calidad, con los equipos más modernos y personal capacitado que garantice la buena calidad de la cortina.

Esto incluso, llevaría a un ahorro económico de la estructura porque en muchas ocasiones resulta más caro, la reparación de una cortina construida con un control de calidad deficiente, que la implementación de un control de calidad confiable.

En cuanto al diseño de cortinas de materiales graduados en México, considero que si existe un buen nivel de calidad, esto -- quizás es debido a que este tipo de cortina es el más socorrido en México y en el mundo y por ello que se tiene una gran experiencia que respalda dicha calidad. Pero tal vez también esto propicie la formación de un círculo vicioso que consiste, en querer hacer en un momento dado, en la mayoría de los sitios en proyecto, solamente cortinas de materiales graduados, perdiendo la oportunidad de proyectar y construir otro tipo de cortina más apropiado para -- las necesidades del aprovechamiento y a las características del -- sitio.

Para finalizar, me atrevo a asegurar que el campo de la Ingeniería de Presas en México, está sufriendo una contracción, debido a la situación económica, lo que está provocando que no exista gente joven que revitalice dicho campo y en consecuencia no --- haya un desarrollo adecuado de dicha actividad, tan importante en--- el país.

BIBLIOGRAFIA

1. Obras Hidráulicas.- F. Torres Herrera.- Editorial Limusa.- - 1981.
2. Mecánica de Suelos, Tomo 1.- Eulalio Juárez Badillo - Alfonso-Rico Rodríguez.- Editorial Limusa. 1980.
3. Principios de Geología y Geotécnia para Ingenieros.- Krynine,- Dimitri P.- Ediciones Omega, S.A. Casanova 220, Barcelona, -- España. 1961.
4. Presas de Tierra y Enrocamiento.- Raúl J. Marsal - Daniel Re--séndiz Núñez.- Editorial Limusa 1975.
5. Instrucciones Generales para la Ejecución de Pruebas de Permeabilidad tipo Lefranc, por los Ingenieros Franciso Torres H. y - Alfonso de la O. Carreño.