

4. CORTINAS

4.1 Componentes de una cortina

Como se ha mencionado con anterioridad, una cortina es la barrera que impide el paso a una corriente con el fin de aprovechar el agua o para proteger contra inundaciones a alguna población. Por ejemplo en una cortina de materiales graduados, pueden destacarse las partes siguientes, referidas a la Figura 4.1.

1. Cresta o corona
2. Revestimiento de la corona
3. Filtros
4. Corazón o núcleo impermeable
5. Trinchera
6. Transiciones
7. Enrocamientos
8. Depósito aluvial
9. Roca basal
10. Talud aguas arriba
11. Talud aguas abajo
12. Pantalla de inyecciones
13. Galerías
14. Drenes
15. Pozos de alivio
16. Embalse o vaso
17. Bordo libre
18. Altura estructural de la cortina.

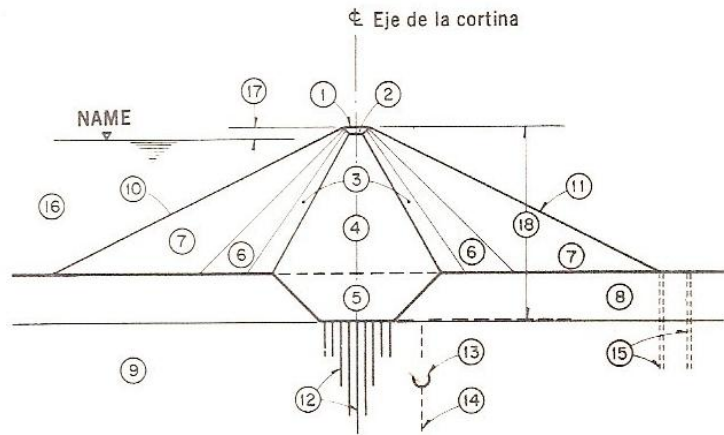


Figura 4.1 Componentes de una cortina de materiales graduados, Referencia 9

4.2 Cortinas de contrafuertes y arcos múltiples

Las cortinas de machones o contrafuertes nacen de la idea de economizar material de construcción en las cortinas de concreto masivo, es decir en cortinas de tipo gravedad, su diseño también parte de una cortina elemental triangular; sin embargo los cambios que estas presentan es en la forma de sus machones, como se explicará a continuación.

Este tipo de cortinas está compuesta por 2 elementos estructurales principales:

- Machones
- Contrafuertes

Los machones son elementos estructurales que al juntarse forman la barrera que impide el paso a la corriente, estos elementos son sostenidos por elementos apoyados perpendicularmente conocidos como contrafuertes, estos elementos transmiten las fuerzas actuantes a su

cimentación, por ello es importante que este tipo de cortinas sean proyectadas para sitios con buena calidad de roca en la boquilla.

Estas cortinas pueden ser clasificadas en base a dos características principales:

- Tipo de cabeza del machón
- Material de construcción del contrafuerte

Los diversos tipos de cortinas de contrafuertes, clasificados por su machón o cubierta son:

- Machones de cabeza sólida,
- De gravedad aligerada (tipo Marcello)
- Arco ó arcos múltiples
- Lozas de concreto o tipo Ambursen
- Arcos Bóveda

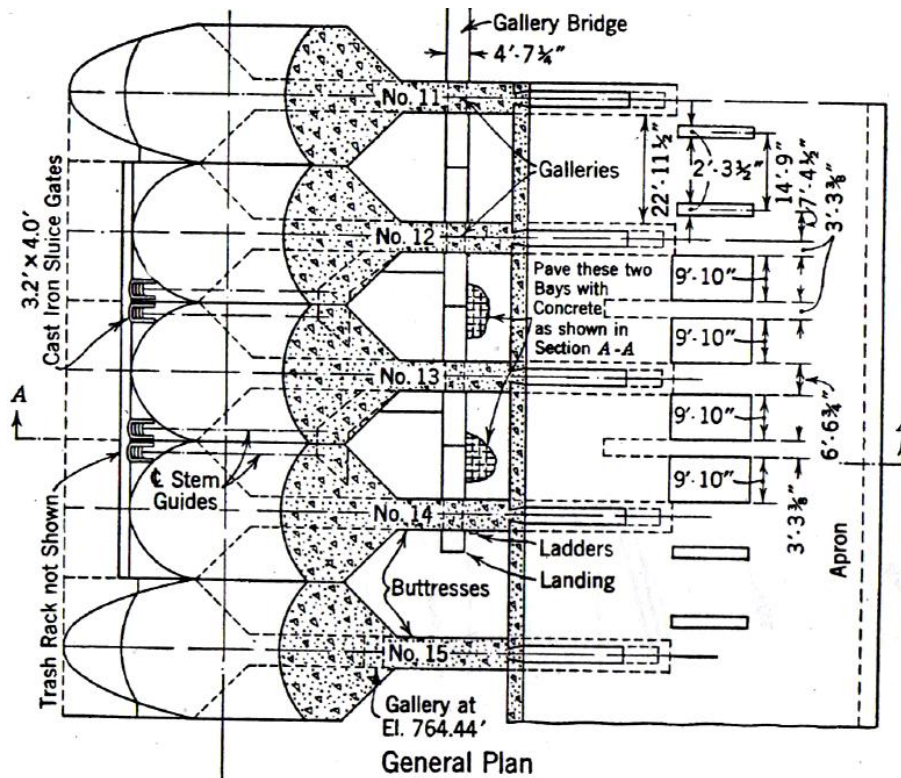


Figura 4.2 a) Primer cortina de machones de cabeza redonda, Presa Don Martín, Río Salado Coahuila, México. Referencia 3

Dentro de los machones masivos se tienen los de:

- Cabeza redonda, tipo Noetzli
- Cabeza de diamante
- Cabeza en T

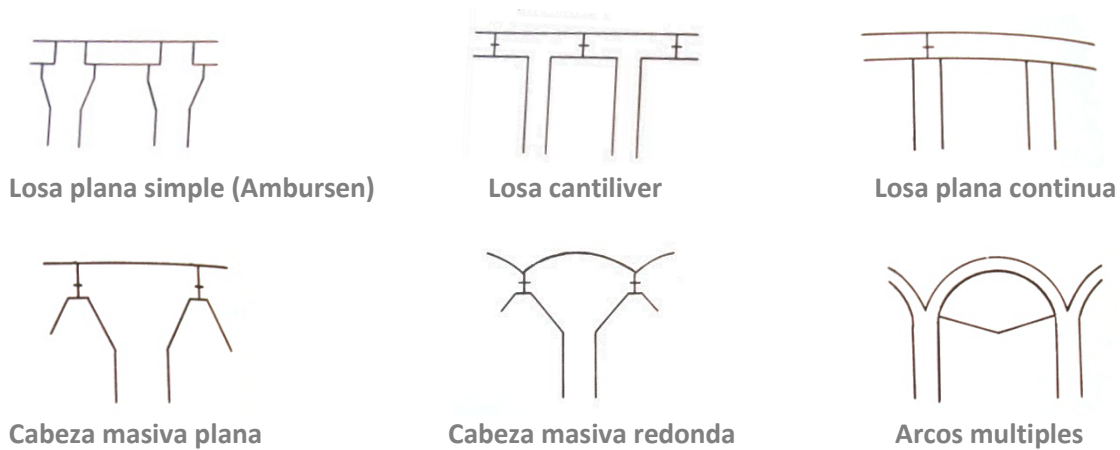


Figura 4.2 b) Tipos de machones, Referencia SRH

Estas cortinas trabajan por compresión radial, eliminando la necesidad de acero de refuerzo y eliminando los esfuerzos de compresión. Debido a sus características este tipo de cortinas presenta una menor articulación en la unión de su contrafuerte pero brinda estabilidad por el peso de cada machón. Acepta pendientes muy pronunciadas en su cara aguas arriba por lo que son diseñadas con valores alrededor de los 60° .

Las cortinas de gravedad aligerada, consisten en secciones iguales a las de una cortina tipo gravedad, pero presentan un hueco en el cuerpo de la cortina que reduce las fuerzas de supresión, la ventaja de construir cortinas de este tipo radica en su facilidad de diseño y construcción. Estas cortinas presentan pendientes en su paramento mojado de hasta 65° , sin embargo es recomendable que éste sea completamente vertical.

Las cortinas de cabeza en arco o de arcos múltiples, se forman de la unión de losas curvas construidas generalmente de concreto reforzado, debido a su diseño es posible colocar los contrafuertes mas separados que en los otros tipos de cortinas. Su paramento aguas arriba es diseñado con una pendiente de 45° .

Las cortinas de arcos bóveda, son una variación de las de arcos múltiples, su diferencia está en que presentan dos curvaturas, una vista en planta y otra en su sección transversal, igualmente son construidas de concreto reforzado, su segunda curvatura recibe el peso del agua y esta le ayuda en su estabilidad.

Para las cortinas de losas planas o tipo Ambursen, se utilizan las boquillas amplias donde se necesita cubrir una gran área de apoyo puesto que estas cortinas permiten un espaciamiento mayor entre contrafuerte y contrafuerte de manera similar a las de arcos múltiples. Admiten una inclinación en su paramento mojado de hasta 45° .

Los contrafuertes se construyen de materiales diversos entre ellos se tienen:

- Concreto masivo
- Mampostería de rezaga producto de excavación

- Mampostería de roca
- Concreto reforzado



Figura 4.2 c) Cortina de machones tipo Ambursen, y obra de excedencias de la presa Abelardo Rodríguez B.C.

Por otra parte, estas cortinas pueden incluir o no un refuerzo perpendicular a los contrafuertes, conocido comúnmente como atezadores. Los atezadores actúan como contrafuertes de los contrafuertes y quedan apoyados normalmente a éstos, ver Figura 4.2 d), en general, son colocados en las cortinas de losas planas.

La ventaja estructural de utilizar dos elementos en estas cortinas radica en la libertad de movimiento que se tiene entre ellos, es decir que estos trabajan independientemente por lo que su junta es considerada como articulación y no permite la transmisión de esfuerzos.

Como se ha mencionado antes, la selección de este tipo de cortinas implica contar con una buena roca de cimentación debido a que la función primordial de las cortinas de contrafuertes es transmitir todas sus fuerzas actuantes a la cimentación.

La función de los machones es recibir el empuje hidrostático y las fuerzas dinámicas, como sismo o avenida que se puedan producir; distribuyéndolas verticalmente al contrafuerte quien las transmite directamente a las rocas de cimentación.

Con el tiempo se han ido desarrollando variaciones que permiten un mejor funcionamiento estructural de las cortinas de contrafuertes, entre ellas se tiene el diseño de machones de cabezas dobles; se encontró un mejor funcionamiento estructural con la utilización de dobles

contrafuertes; en sus materiales se descubrió que el utilizar concreto pre esforzado permite construir machones de hasta 100 m de altura.

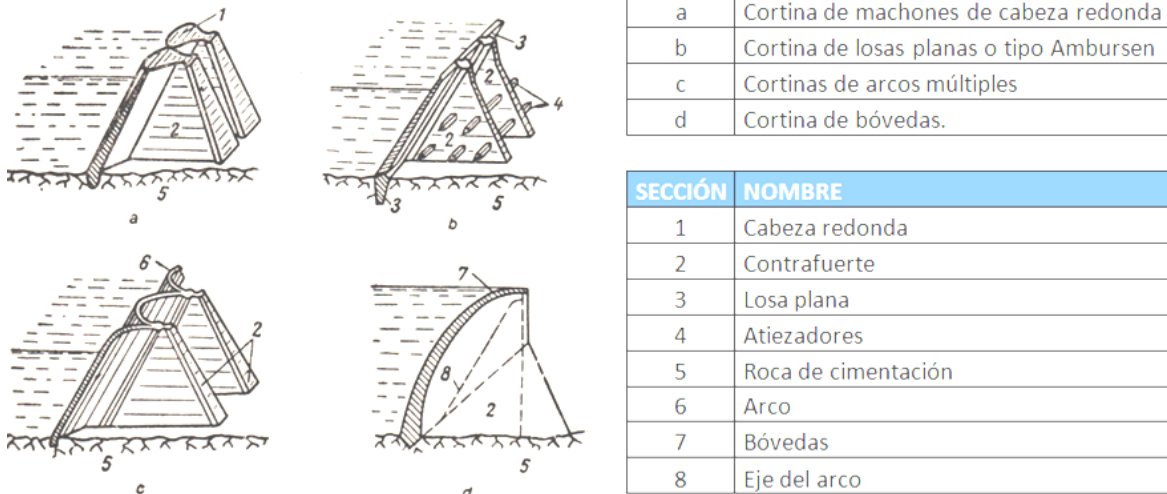


Figura 4.2 d) Tipos de machones y secciones de la cortina, Referencia 11

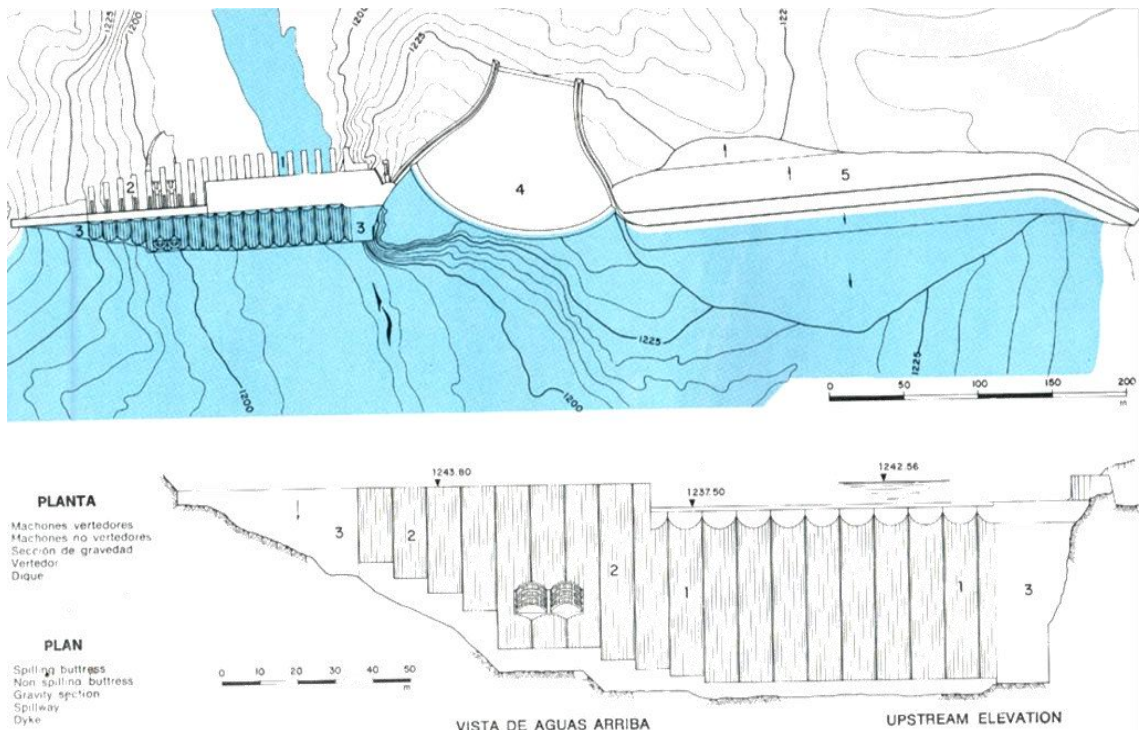


Figura 4.2 e) Cortina de contrafuertes de arcos múltiples, vista en planta y elevación de la presa las Vírgenes, Referencia CFE

4.3 Cortinas de arco

Las cortinas de arco son cortinas curvas desplantadas en boquillas estrechas donde su altura es considerablemente mayor al ancho del cauce, su forma curva se coloca cóncava aguas arriba de la corriente y permite utilizar la resistencia a la compresión del concreto y transmitir las fuerzas actuantes sobre ella a las laderas de su boquilla principalmente; reduciendo la utilización de acero de refuerzo. Cabe destacar que el material que se utiliza para su construcción es concreto o concreto reforzado.

Estas cortinas son seleccionadas geológicas y geotécnicamente en sitios donde la boquilla es en forma de V o U y está compuesta por rocas de buena calidad, con una buena resistencia a la compresión y presenta pocas fallas geológicas. Es posible construirlas en zonas con alto riesgo sísmico si su material de cimentación admite deformaciones, sin embargo en estos casos, es necesario realizar su diseño bajo un análisis sísmico realizado a detalle.

Las cortinas en arco se clasifican en tres tipos básicos:

- Cortinas de arco-gravedad
- Cortinas de arco delgado
- Cortinas de arco bóveda o de doble curvatura.

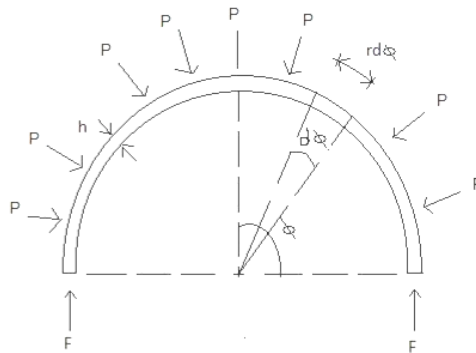
Las cortinas de arco gravedad además de transmitir sus fuerzas por medio de la forma de ésta, cuentan con un peso propio considerable que es tomado en cuenta para el cálculo de estabilidad de la misma.

En las cortinas de arco delgado el efecto de su peso no tiene gran relevancia en el análisis de estabilidad de ésta por lo que su funcionamiento radica en la transmisión de sus cargas a la boquilla.

Las cortinas de arco bóveda tienen forma de huevo y es posible notar una curvatura en su sección vertical y otra en su vista en planta; su análisis se basa principalmente en la transmisión de las fuerzas actuantes a lo largo de la cimentación y se toma en consideración el efecto del peso del agua sobre la curvatura vertical para su análisis de estabilidad.

EL diseño de este tipo de cortinas está basado en la teoría del cilindro delgado donde se considera que las fuerzas actuantes son distribuidas uniformemente a sus circunferencia y su efecto depende de la aplicación de estas, es decir si las fuerzas son aplicadas en interiores a la circunferencia, éstas producen un alargamiento de la circunferencia y reducen su espesor, por el contrario si estas fuerzas son aplicadas por fuera de ésta, se producirá una contracción y ensanchamiento de su espesor.

Para el siguiente análisis que interesa se corta el cilindro a la mitad y se ubican las fuerzas actuantes:



Fi 4.3 a) Cilindro delgado

Sumando las componentes de todas las fuerzas actuantes en el cilindro se tiene

$$2F = 2 \int_0^\pi p r \sin\phi \, d\phi = 2pr \quad (4.3 \text{ a})$$

$$F = pr \quad (4.3 \text{ b})$$

donde

F fuerza transferida a cada apovo del arco

p presión hidrostática (N/m²)

r radio de curvatura (m)

Φ ángulo de apertura (°)

El esfuerzo unitario del anillo se evalúa dividiendo su fuerza entre su área, pero si consideramos la sección de ancho unitario se tiene

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{pr}{h} \quad (4.3 \text{ c})$$

donde

σ esfuerzo de compresión unitaria (N)

h espesor del cilindro (m)

La forma del arco de estas cortinas es muy variable, su forma se diseña a partir de un análisis esfuerzos-deformaciones, sin embargo de acuerdo a su curvatura pueden ser clasificadas en 2 tipos básicos:

- Radio o centro constante
- Ángulo constante

- Doble curvatura

Por lo que, las cortinas con radio constante tienen un paramento mojado vertical con radio constante mientras que en su paramento aguas abajo el radio va variando con la elevación. Este tipo de cortinas no son las más económicas en cuanto a volumen, sin embargo representan una buena opción por su simplicidad de análisis y facilidad constructiva.

En una boquilla simétrica se tienen que el volumen óptimo para la construcción de estas cortinas se logra para un ángulo de curvatura de 133° para todas las elevaciones, sin embargo en la práctica este ángulo resulta ser menor de 110° .

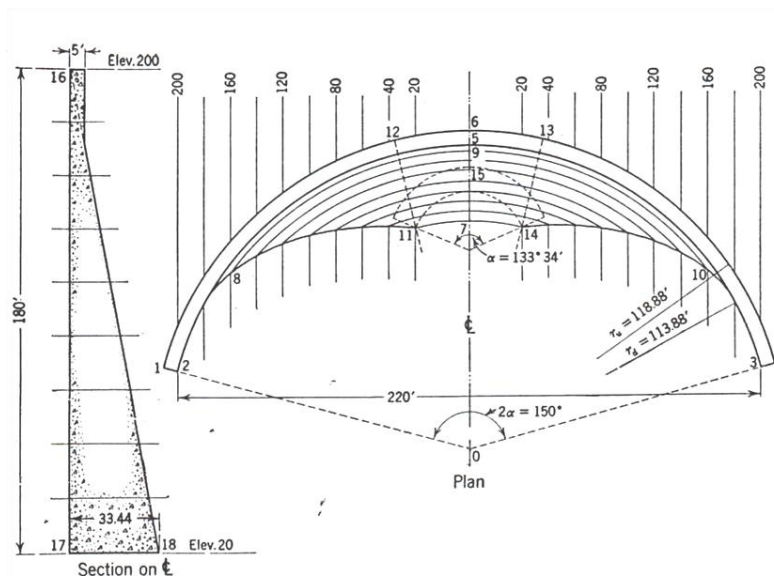


Figura 4.3 b) Cortina de radio constante, Referencia 3

Las cortinas de radio o centro constante son diseñadas a partir de la teoría del cilindro delgado, su inclinación es pequeña o nula en su paramento mojado y por lo mismo se recomienda en boquillas con forma de U, donde las cargas también son transmitidas en su base.

El diseño de cortinas con ángulo constante es un poco más complejo que el de aquellas con radio constante. Sus radios van reduciendo de la cresta a la base y el espesor de la cortina es mayor en la cresta, esto ayuda a reducir la inclinación del paramento mojado ya que una pendiente muy pronunciada la vuelve inestable. Estas cortinas se adaptan mejor a boquillas con forma de V.

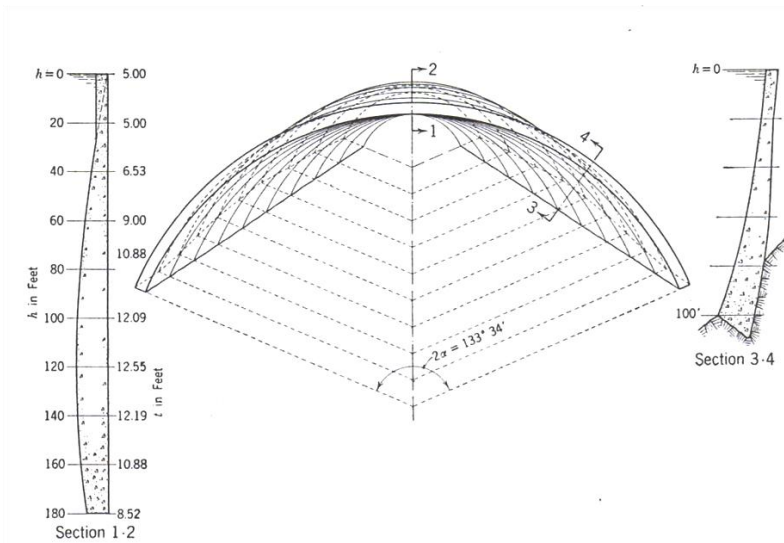


Figura 4.3 c) Cortina de ángulo constante, Referencia 3

Las cortinas en arco con doble curvatura, también conocidas como de arco bóveda, tienen una geometría compleja, con variaciones tanto en su vista vertical como en la horizontal. Una geometría preliminar puede ser seleccionada a través de nomogramas, sin embargo un diseño detallado requiere de modelación física o matemática. Son recomendables para reducir el efecto de flexión y torsión en sus elementos, distribuyen en forma uniforme, tanto a lo largo como a lo ancho; las fuerzas de presión actuantes en ella. Tienen un espesor pequeño respecto las cortinas con otras curvaturas y aumenta de la corona a la base de ésta, presentan una sección con pendiente en su paramento mojado, la intención de esto es aprovechar el peso del agua como una fuerza que ayuda a la estabilidad de la cortina.

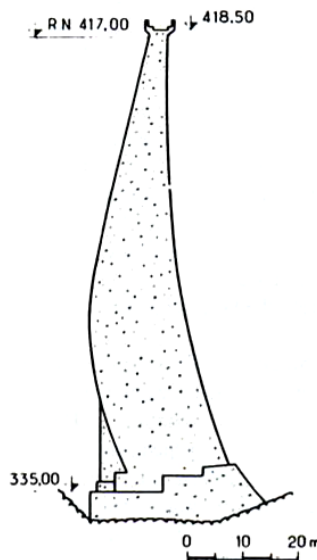


Figura 4.3 d) Cortina de arco con doble curvatura, Referencia 9

Para los casos en donde la boquilla es asimétrica se recomienda realizar diseños con curvaturas asimétricas.

Otra ventaja de este tipo de cortinas es que el incluir en ellas estructuras auxiliares o accesorios para el aprovechamiento hidráulico no representa gran influencia en su análisis de estabilidad por lo que pueden ser ignoradas en su análisis de estado de esfuerzos.

Su construcción está basada en sobreponer bloques de concreto, éstos no presentan discontinuidades para el análisis del estado de esfuerzos, sin embargo si durante la construcción estos bloques tienden a colgar aguas abajo, convergen y soportan parcialmente su peso propio pero si se colocan en la zona aguas arriba; tienden a separarse entre sí por efecto del peso propio, por lo que su estado de esfuerzos se calcula como un conjunto de cantilivers independientes.

4.4 Cortinas tipo gravedad

Este tipo de cortinas son diseñadas a partir de una sección triangular, la cual resiste las fuerzas que actúan sobre ella por el peso propio de la estructura, presentan deformaciones despreciables, son construidas con materiales cementados de gran volumen y peso y son construidas de mampostería, concreto o asfalto, la selección de estos materiales depende de la disponibilidad de los mismos en el sitio de construcción de la obra. Actualmente pueden ser construidas de dos tipos de concretos, el concreto hidráulico y el concreto compactado con rodillo.

Las cortinas de concreto, utilizan cemento con alta resistencia, no incluyen acero de refuerzo y se colocan por capas de espesores que varían desde los 50 hasta 100 centímetros, por lo que es necesario utilizar técnicas de enfriamiento, como la colocación de serpentines para evitar el sobre calentamiento del concreto durante su fraguado.



Figura 4.4 a) Cortina de concreto masivo, Ignacio Allende, Referencia CFE

El CCR (Concreto Compactado con Rodillo) ha sido creado con contenido de puzolanas o cenizas volantes para que su calor de fraguado sea menor; así mismo, estas mezclas presentan poco contenido de cemento. Debido a su alta densidad su colocación se hace por medio de bloques, para su compactación se utilizan con rodillos vibratorios que favorezcan la expulsión de aire.

Las cortinas de mampostería son construidas de la unión de rocas con un mortero, la ventaja de este tipo de cortinas es que las rocas representan un bajo costo y el costo del mortero utilizado es poco en comparación con las cortinas de concreto, sus materiales brindan buena impermeabilidad y su estabilidad la adquieren por peso propio.

Algunas ventajas adicionales para este tipo de cortinas, es que requieren de un bajo mantenimiento estructural, su material de construcción tiene una gran resistencia y es impermeable.

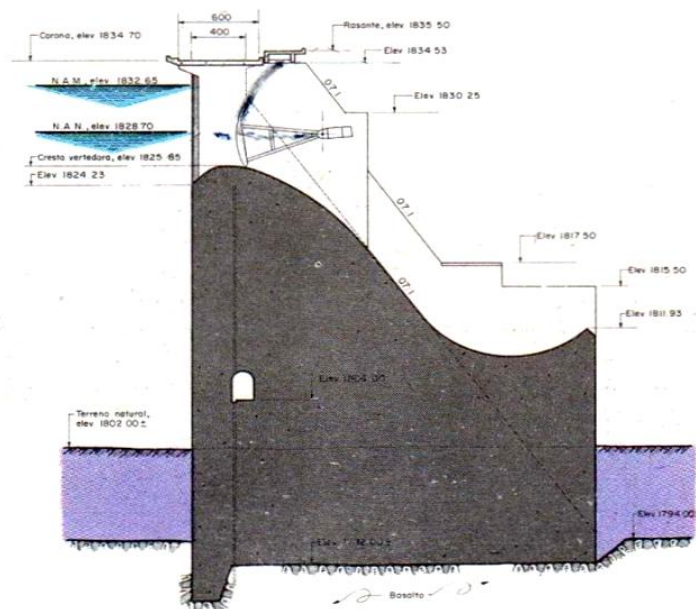


Figura 4.4 Sección transversal de una cortina tipo gravedad con vertedor en el cuerpo de la cortina, Referencia CONAGUA

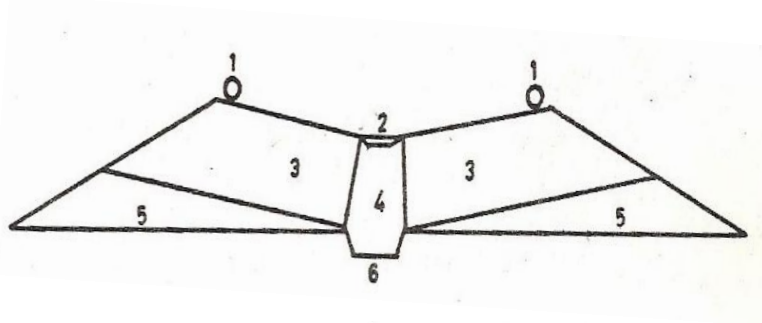
4.5 Cortinas de materiales sueltos

Las cortinas flexibles son aquellas que presentan deformaciones considerables en el llenado del vaso y durante sus procesos constructivos. Los principales materiales con los que se construyen son: arcillas, arenas, mezclas de arena, grava y limo, rocas y rezaga producto de excavaciones.

De acuerdo al procedimiento constructivo, este tipo de cortinas se clasifican como:

- Cortinas de relleno hidráulico o semi hidráulico
- Cortinas de materiales compactados

Las cortinas de relleno hidráulico, utilizan procesos de colocación de laterales por medios hidráulicos. Los materiales en banco son atacados por medio de chiflones de agua y una vez obtenidos son conducidos a la cortina por medio de corrientes de agua a una velocidad calculada para conducir el tamaño máximo del material. Para la colocación del material se construye un estanque en el centro de la cortina y por medio de canales con distribución y pendiente determinadas se logra la colocación de los materiales más gruesos en los taludes exteriores; la sedimentación hará que los materiales se vayan colocando en orden decreciente de diámetro, quedando los más finos en el centro para formar así, el corazón impermeable. La diferencia entre las cortinas de relleno hidráulico y las de semi hidráulico radica en que estas últimas utilizan maquinaria para el transporte del material hacia la cortina y una vez en ella estos materiales son colocados por medios hidráulicos.



- 1 Tubería de conducción
- 2 Estanque
- 3 Relleno hidráulico
- 4 Corazón impermeable
- 5 Material colocado en seco
- 6 Trinchera

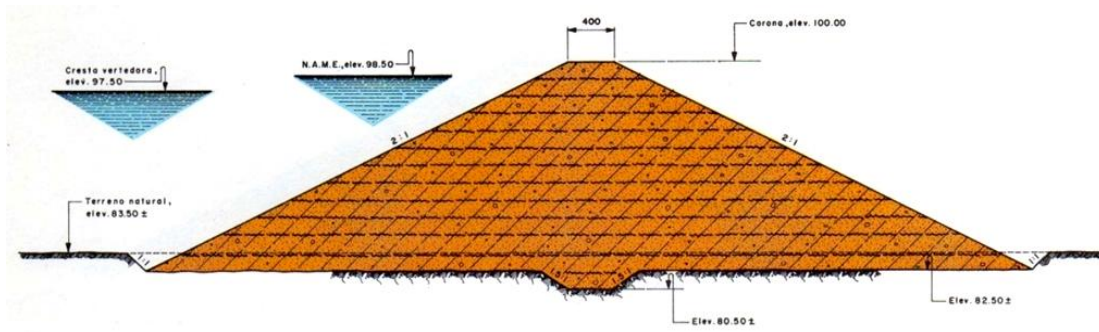
Figura 4.5 a) Sección transversal de la formación de una cortina de relleno hidráulico,
Referencia 5

Las cortinas de materiales compactados se utilizan en la mayoría de los procesos constructivos de este tipo de cortinas, este proceso constructivo permite definir las fronteras entre un material y otro, por lo que las cortinas que pueden ser construidas mediante este proceso, de acuerdo a sus materiales son:

- Cortinas homogéneas de tierra
- Cortinas homogéneas con filtros
- Cortinas de materiales graduados
- Cortinas de enrocamiento con corazón impermeable

Cortinas homogéneas de tierra

Su construcción se realiza exclusivamente de tierra impermeable compactada y se coloca en su paramento mojado un respaldo de rocas para protegerla del oleaje.



SECCION MAXIMA DE LA PRESA

Figura 4.5 b) Sección de una cortina homogénea de tierra, Presa La mina Oaxaca, Referencia CFE



Figura 4.5 c) Vista de la presa La Mina Oaxaca, Referencia CFE

Cortina homogénea con filtros

Las cortinas de sección homogénea, están formadas por arcillas compactadas que le brindan impermeabilidad, en este tipo de cortinas es muy común que las partículas de agua atraviesen los materiales y se muevan dentro de él creando tubos que llegan a atravesar completamente la cortina, provocando lo que se conoce como falla por tubificación. Sin embargo, esta cortina incluye una sección de arena bien graduada que permite dirigir el agua infiltrada hacia el cauce aguas abajo, para evitar que ésta no cause daños en el cuerpo de la cortina. Los filtros pueden ser colocados en el pie de la cortina, o puede colocarse una chimenea, que es un filtro colocado verticalmente a partir de la corona de la cortina que se conecta a un filtro horizontal el cual dirige el agua hasta el pie de la misma para descargarla al río.

Cortinas de materiales graduados

Las cortinas de materiales graduados están formadas por secciones en las que su material más fino e impermeable es colocado en el corazón y de forma gradual se va colocando material más grueso, pasando por filtros; hasta colocar rocas grandes en la cara aguas arriba de la cortina. La selección de este tipo de cortinas depende de la graduación de materiales con los que se cuente en la zona.



Figura 4.5 d) Vista de la Presa Infiernillo, con cortina de materiales graduados

Cortinas de enrocamiento con corazón impermeable

Son cortinas compuestas principalmente por rocas, incluyen una sección impermeable que puede ser colocada en el paramento mojado o en el interior de la cortina. Pueden colocarse en ella filtros que favorezcan la conducción del agua.



Figura 4.5 e) Presa Leobardo Reynoso, Referencia CFE

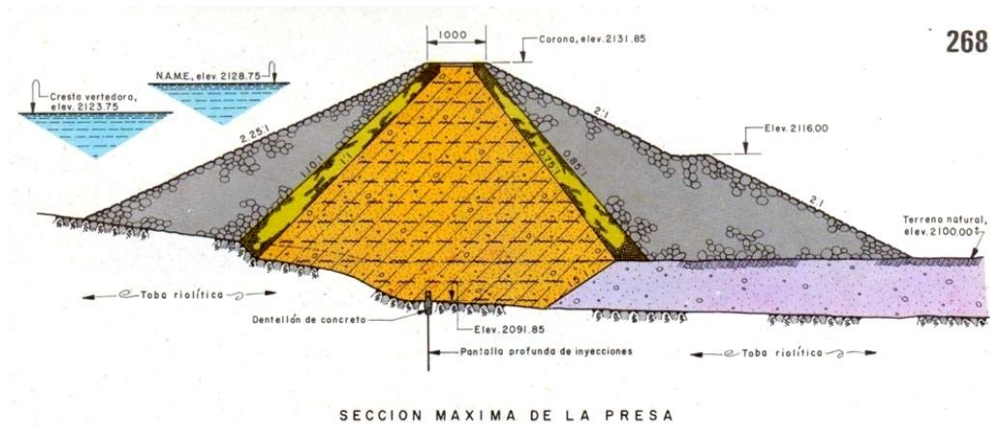


Figura 4.5 f) Sección de la cortina de enrocamiento, Referencia CONAGUA

4.6 Cortinas de enrocamiento con cara de concreto

Las cortinas de enrocamiento con cara de concreto son consideradas cortinas mixtas debido a que su material de construcción incluye materiales naturales y cementados. Este tipo de cortinas está conformada en su mayoría por materiales naturales, sin embargo la colocación de la cara o chapa de concreto resulta ser una alternativa muy favorable en este tipo de cortinas, teniendo ventajas como:

- La mayor parte de la cortina está constituida por materiales naturales, lo cual reduce el costo de fabricación de concreto y procesos constructivos para la colocación de éste. El costo del material resulta ser mucho más económico debido a que solo se requiere su explotación y transporte.
- La cara o chapa de concreto reduce el talud necesario para garantizar la estabilidad de la cortina, reduciendo a su vez, la cantidad de material a utilizar reduciendo aún más los costos por explotación y acarreo.
- A diferencia de las cortinas de materiales naturales, estas cortinas tienen menos probabilidad de falla por deslizamiento.
- El procedimiento constructivo es relativamente rápido, debido a que pueden llevarse a cabo para cualquier época del año y para diferentes tipos de climas. Además, es posible llevar a cabo 2 procesos constructivos a la vez, como son la aplicación del tratamiento en la boquilla y la construcción del pedraplen.

Sin embargo, una desventaja de estas cortinas radica en la necesidad de llevar a cabo un control y análisis rigurosos para la junta entre el plinto (cimentación de las cortinas de enrocamiento con cara de concreto) y la cara de concreto, para evitar asentamientos diferenciales que generen fallas por agrietamiento.

Estas cortinas a diferencia de las de concreto, se construyen con losas de concreto reforzado, sin embargo; siguen siendo flexibles ya que se espera una pequeña deformación posterior al llenado del vaso.

Las cortinas de enrocamiento con cara de concreto son utilizadas actualmente por CFE (Comisión Federal de Electricidad), en la construcción de centrales hidroeléctricas, ejemplos de estas son, El Cajón y Aguamilpa en el estado de Nayarit, (ver Figura 4.6), y en etapa constructiva La Yesca.



Figura 4.6 a) C.H. El cajón, Referencia CFE



Figura 5.6 b) C.H. Aguamilpa, Referencia CFE