

2. SELECCIÓN DE LA ESTRUCTURA TERMINAL

2.1 Objetivo de la Obra de Excedencias

La función de una Obra de Excedencias en una presa de almacenamiento o de derivación consiste en dejar salir el agua excedente o de avenidas que no cabe en el espacio destinado para el almacenamiento, y en el caso de una presa derivadora, dejar pasar los excedentes que no se envían al sistema de derivación.

El tamaño del almacenamiento es un factor importante a considerarse, por ejemplo, en las cortinas de tierra y enrocamiento, que corren el riesgo de ser destruidas si es rebasada en la corona por el agua. La capacidad de una obra de excedencia la determinan la avenida de diseño, las características del embalse y el programa de operación de la propia obra.

Además de tener suficiente capacidad, la obra debe ser hidráulica y estructuralmente adecuada y con las descargas localizadas de manera que no erosionen el pie de la cortina u otras estructuras existentes aguas abajo.

Los materiales que formen los revestimientos de la estructura deben ser resistentes a la erosión y tener un acabado liso, con el fin de que sean capaces de resistir las altas velocidades que frecuentemente se presentan en ellas, así como para evitar fenómenos de cavitación y presiones diferenciales en las caras del revestimiento.

En ocasiones, es necesario distribuir los volúmenes excedentes de agua en dos obras: una de ellas llamada vertedor de servicio, que descarga con mayor frecuencia y exige mayor seguridad en su operación, y la otra denominada vertedor de emergencia, que descarga eventualmente de manera

CAPÍTULO 2. SELECCIÓN DE LA ESTRUCTURA TERMINAL

simultánea, a fin de permitir la reparación de la de servicio en caso dado o bien, se presentará una avenida igual o mayor a la de diseño y lograr mayor economía y seguridad al conjunto.

La obra se utiliza para descargar la avenida de diseño, cuyas características se obtienen de los estudios hidrológicos en el río y del tránsito de la avenida a través del vaso de almacenamiento, el gasto que desalojara la obra. Dichos estudios permiten conocer la carga y gasto máximo, y si es el caso, las políticas de operación con que debe manejarse la obra de excedencias.

2.2 Partes que constituyen una Obra de Excedencias

En general, la obra de excedencias se compone de diferentes elementos que se describen a continuación:

2.2.1 Canal de acceso

Conduce el agua desde el almacenamiento hasta la estructura de control, de manera que llegue en dirección perpendicular a la cresta en toda su longitud y libre de turbulencias a fin de lograr el coeficiente de descarga máximo y el mínimo de problemas en la estructura de control y no se reviste en su mayor longitud.

Cuando el agua entra directamente del vaso al vertedor y directamente cae al río, como en el caso de una obra de excedencias colocado en el cuerpo de la cortina de concreto, no son necesarios ni el canal de llegada ni el de salida. Sin embargo, en el caso de obras de excedencias ubicadas en las laderas en las que se apoya la cortina o en puertos o cuchillas, pueden ser necesarios los canales que lleven el agua al control del vertedor y para conducir el agua a la estructura terminal.

Las velocidades a lo largo de este canal deberán limitarse, ya que como no se reviste se puede erosionar, y las curvaturas y transiciones deberán hacerse de forma gradual, con el objeto de disminuir las pérdidas de carga a lo largo del canal.

Las velocidades de llegada y la profundidad que haya abajo del nivel de la cresta tienen una influencia importante en la descarga sobre una cresta de un vertedor. A una mayor profundidad de llegada, con la consiguiente reducción de la velocidad de llegada, da como resultado un coeficiente de descarga mayor. Dentro de los límites que se requieren para obtener una buena circulación y velocidades que no produzcan arrastres, la determinación de la profundidad del canal de entrada a la anchura es cuestión económica.

2.2.2 Estructura de control (vertedor)

Regula las descargas del almacenamiento. La regulación puede efectuarse mediante una sección de control constituida por un simple umbral, un cimacio, un orificio, o una tubería, que pueden descargar libremente o sumergidos y estar controlados o no por compuertas. En cualquier caso, es muy importante lograr la mayor eficiencia de la estructura de control, con un coeficiente de descarga lo más grande posible para la descarga máxima y evitar el despegue de la lámina vertiente sobre el cimacio.

Las estructuras de control pueden tomar varias formas tanto en su posición como en su figura. En planta los vertedores pueden ser rectos, curvos, semicirculares, en forma de U o redondos. En el caso de los orificios, éstos pueden ser horizontales, inclinados o verticales, y en su forma pueden ser circulares, cuadrado, rectangular o de forma irregular.

2.2.3 Conducto de descarga

Permite conducir los volúmenes que han pasado por la estructura de control, hasta el río aguas abajo de la presa. Dicho conducto puede ser canal a cielo abierto, ya sea a través de la cortina o por las laderas o bien túnel por las laderas, o una combinación de ambas. La selección del tipo y dimensiones están regidos por las consideraciones hidráulicas, económicas, topográficas y geológicas del sitio. Debido a la gran velocidad del agua que pueden desarrollarse, es necesario revestir las paredes del conducto de descarga y lograr que el escurrimiento sea lo más satisfactorio posible.

2.2.4 Estructural terminal

Se ubica al final del conducto de descarga y permite la restitución de las descargas del vertedor al río, disipando la energía cinética excedente que adquiere el agua en su descenso desde el embalse hasta el río aguas abajo, o bien lanzar el agua directamente al río para lograr su disipación, aunque esta ocurra fuera de la estructura terminal. El objetivo es alcanzar una disipación eficaz de la energía y eliminar la erosión en la zona de la caída.

2.2.5 Canal de salida

El canal de salida es la estructura que capta el agua que sale de la estructura terminal; su función es la de conducir el agua nuevamente al río.

No siempre se requiere construir un canal de salida, esto depende de las condiciones topográficas, de la calidad de la roca, de la disposición de otras estructuras, etc. y no se reviste.

2.3 Selección del tipo de estructura terminal disipadora de energía

Siendo necesaria la disipación de la energía del escurrimiento antes de efectuar la descarga al río deberá seleccionarse el tipo de estructura terminal, considerando el efecto del nivel del agua en el río en la zona de descarga de la obra de excedencias.

La selección de la estructura terminal depende entre otros aspectos de la posición relativa de las elevaciones del final del canal de descarga y del nivel del agua del río en el punto de descarga y debe considerarse el posible efecto del remanso en la zona de descarga. Esto último se puede determinar haciendo una comparación entre la curva de tirantes en el río-gasto, en la zona de descarga y la curva de tirantes conjugados mayores-gastos (figura 2.1), obtenida para un salto hidráulico formado en un tanque amortiguador de ancho igual al canal de descarga y colocado a la elevación de la plantilla del río en la zona de descarga. El salto hidráulico indica un cambio de flujo, supercrítico (rápido) a subcrítico (lento), el cual va acompañado de una fuerte pérdida de energía.

La fórmula del salto hidráulico que se emplea para obtener la curva de conjugados mayores-gastos esta dada por:

$$y_2 = \frac{y_1}{2} \left[-1 + \sqrt{1 + 8F_{r1}^2} \right]$$
$$F_{r1} = \frac{V_1}{\sqrt{gy_1}}$$

CAPÍTULO 2. SELECCIÓN DE LA ESTRUCTURA TERMINAL

donde

- y_2 tirante conjugado mayor de un resalto que se forma con un conjugado menor y_1 , en m
 y_1 tirante conjugado menor del conjugado mayor y_2 , que corresponde al tirante del flujo al final de la rápida e inicio del resalto
 F_{r1} número de Froude que corresponde a la sección de la rápida donde se tiene y_1
 V_1 velocidad del flujo que corresponde al tirante y_1
 g aceleración de la gravedad

Como resultado de dicha comparación se pueden tener cuatro casos fundamentales (ver figura 2.1) que son:

- La curva de los tirantes del río queda siempre sobre la de los conjugados.
- La curva de tirantes queda siempre por debajo de la curva de los conjugados
- Las curvas se cruzan y la curva de tirantes del río tiene mayor curvatura que la de los conjugados.
- Las curvas se cruzan y la curva de tirantes del río tienen una curvatura menor que la de los conjugados

Los tirantes en el río se obtienen de la curva Elev- $Q_{\text{río}}$, calculada para hacer el diseño de la obra de desvío. El procedimiento de cálculo consiste en seleccionar un gasto y calcular y_1 , y_2 y el correspondiente tirante en el río para el gasto escogido. Los valores de y_2 y tirante en el río se dibujan contra el gasto. Se repite el procedimiento varias veces.

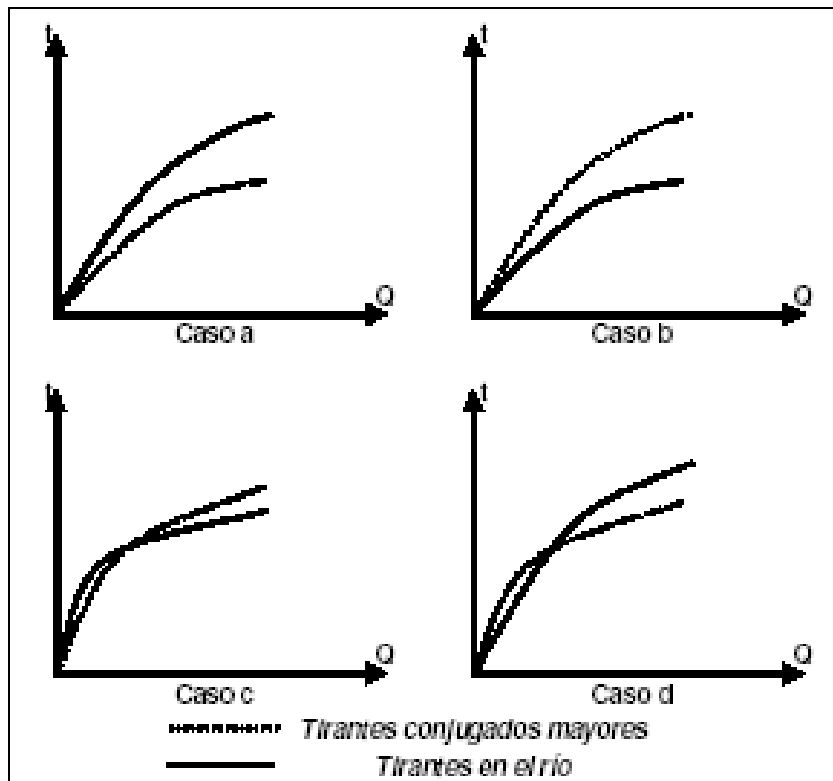


Figura 2.1 Curvas de comparación de tirantes conjugados y tirantes del río

CAPÍTULO 2. SELECCIÓN DE LA ESTRUCTURA TERMINAL

Cuando para un gasto dado, el nivel del río es superior al nivel del conjugado mayor, el salto hidráulico se ahoga, si los niveles coinciden es un salto claro, y si los niveles del río se encuentran por debajo del nivel del conjugado, se presenta un salto hidráulico barrido.

De acuerdo a cada uno de estos casos se selecciona el tipo de estructura terminal más eficiente: un tanque amortiguador o una cubeta disipadora de energía, y cuya finalidad será la de propiciar un salto hidráulico.

Si se tiene una curva tipo a, la disipación de la energía se hace normalmente con cubetas deflectoras, no se recomienda el uso de tanques amortiguadores con plantilla inclinada, a causa de los grandes volúmenes de concreto requeridos.

Si se tiene una curva tipo b) ó c), es necesario un tanque amortiguador, el cual deberá profundizarse con excavación bajo el cauce, con el fin de asegurar el salto hidráulico para todas las descargas. El gasto máximo de la obra de excedencias es el que determina la profundidad del tanque. Si dicho tanque presentase un ancho mayor con respecto al canal de descarga, la profundidad de descarga disminuye, y la curva de tirantes conjugados se aproxima a la curva de tirantes del río.

Si se tiene una curva tipo d), la estructura que asegura el salto hidráulico es el tanque amortiguador con un nivel de plantilla determinado para un gasto inferior al máximo de descarga.

Sin embargo, la selección de la estructura terminal también estará en función de los aspectos constructivos y económicos, en consecuencia la selección del ancho y elevación de la plantilla está basada en éstos aspectos.

2.4 Tipos de estructuras terminales

2.4.1 Tanque amortiguador

La función de un tanque amortiguador es la de disipar energía cinética del flujo supercrítico al pie de la rápida de descarga, antes de que el agua retome el cauce del río. Todos los diseños del tanque amortiguador se basan en el principio del salto hidráulico, el cual es la conversión de altas velocidades del flujo a velocidades que no pueden dañar el conducto de aguas abajo.

Existe una relación estrecha entre la velocidad y el tirante aguas arriba del salto hidráulico y el tirante conjugado aguas abajo del salto, por lo que la longitud, el ancho y la profundidad del tanque amortiguador están interrelacionados entre sí, como se puede observar en la figura 2.2

A partir del gasto de diseño, Q , se puede determinar el tirante normal "t" en el río, y por consiguiente la elevación del agua a la salida del tanque. Con el gasto Q y un ancho supuesto del tanque puede determinarse al tirante t_1 y v_1 , a su vez, con éstos últimos valores se puede determinar el tirante conjugado mayor, t_2 . Sustrayendo este tirante del nivel del agua a la salida se obtiene la elevación del piso del tanque amortiguador.

Desafortunadamente no se tendrá un solo gasto, sino una variación muy grande de ellos, desde un Q mínimo, hasta el de diseño, rango en el que deberá presentarse el salto hidráulico.

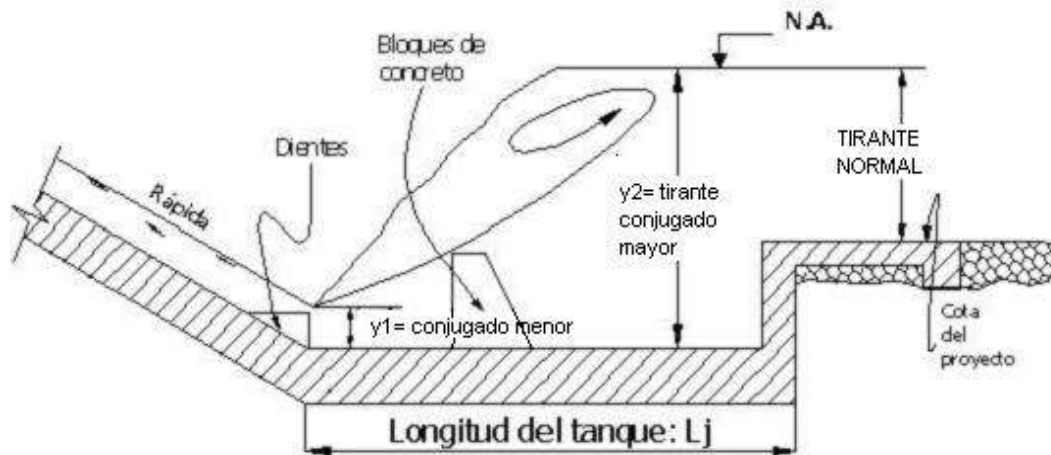


Figura 2.2 Características de un tanque amortiguador

Con el fin de apreciar el fenómeno antes descrito se preparan las curvas donde se relaciona la elevación en metros y el gasto (ver figura 2.3). En el caso ideal las curvas deben coincidir, pero esto rara vez sucede.

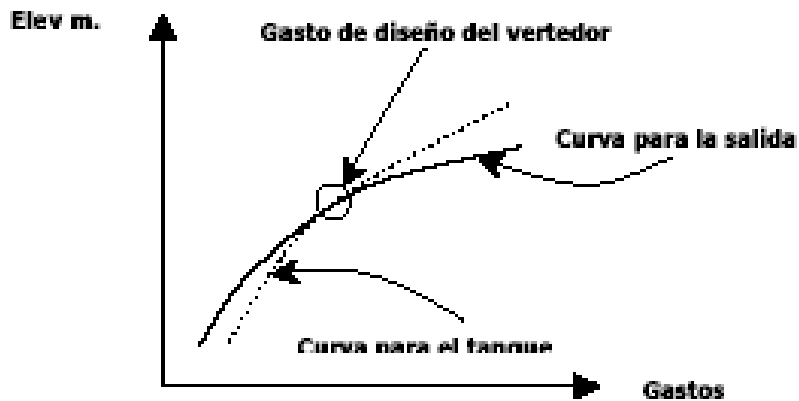


Figura 2.3 Curva Elevaciones-Gasto para tanques

Cuando la elevación del agua en el tanque es mayor que en la salida, existe el peligro de que el salto hidráulico se desaloje hacia afuera del tanque. Cuando la elevación del agua en el tanque sea menor que a la salida, el salto se moverá hacia el pie de la rápida y se ahogará parcial o completamente, funcionando de forma ineficiente.

Como alternativas de solución a esta situación se presentan:

1. Cambiar el ancho del tanque amortiguador
2. Cambiar la elevación del piso tanque
3. Cambiar la elevación del agua a la salida por medio de una sección de control
4. Instalación de dientes o bloques de concreto en el fondo del tanque, con lo que se genera una fuerza en dirección aguas arriba, que se suma a la presión hidrostática de aguas abajo

La longitud del tanque amortiguador se hace igual o un poco mayor a la longitud del salto hidráulico. De forma experimental se ha encontrado que en un piso horizontal la longitud del salto

CAPÍTULO 2. SELECCIÓN DE LA ESTRUCTURA TERMINAL

es aproximadamente siete veces la diferencia de tirantes conjugados. Esta longitud se puede reducir construyendo dientes y bloques de concreto o sobreelevando la salida.

Los dientes se colocan a la entrada del tanque amortiguador y tienen como función la de dispersar el flujo, los bloques de concreto se instalan en el piso del tanque y su función es estabilizar el salto suministrando una fuerza en el sentido de aguas arriba. Para prevenir la erosión del cauce a la salida se recomienda la construcción de un dentellón a la salida del tanque y revestir el lecho y las márgenes del río con un sampeado seco (piedra colocada a la salida del tanque).

Para el diseño definitivo es aconsejable que el funcionamiento del tanque amortiguador se compruebe mediante un modelo hidráulico. La siguiente figura muestra las características de algunos tanques amortiguadores:

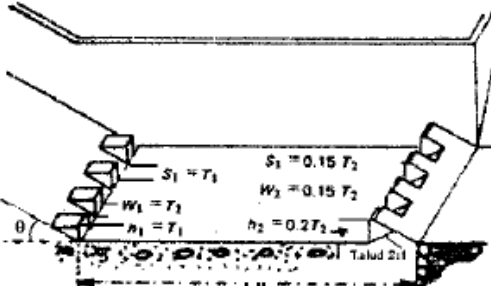
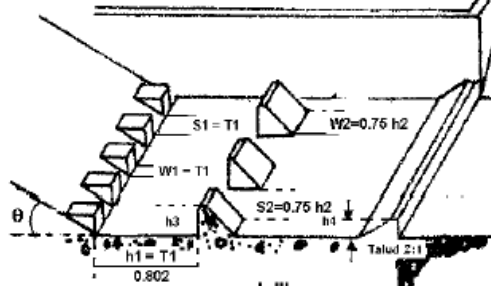
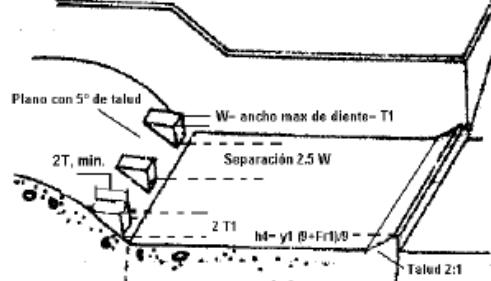
Tanque	Características
<p>TANQUE AMORTIGUADOR TIPO III</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Tanque amortiguador para cortinas de concreto altas y vertedores asociados a cortinas de tierra y enrocamiento, así como rápidas en canales con grandes gastos. • El salto y longitud de tanque se reduce alrededor de 33%, con dientes al principio y final del tanque. • Para usarse en grandes caídas, en descargas de vertedores o canales, para números de Froude arriba de 4.5
<p>TANQUE AMORTIGUADOR TIPO II</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Tanque amortiguador corto para canales y descargas pequeñas. • Salto y longitud de tanque reducido al 60%, con dientes, bloques de impacto y umbral en el extremo inferior. • Para uso en descargas de vertedores y estructuras pequeñas en canales, donde la velocidad de llegada no exceda de 15 a 18 m/s y el número de Froude sea superior a 4.5.
<p>TANQUE AMORTIGUADOR TIPO I</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Para uso con número de Froude entre 2.5 y 4.5, que frecuentemente se presentan en canales y presas de derivación • Reduce el oleaje excesivo creado por saltos imperfectos

Figura 2.4 Tanques amortiguadores y sus características¹

¹ Diseño de presas pequeñas. United States Department of the Interior Bureau of Reclamation. Publicación Técnica de Recursos Hidráulicos. Compañía Editorial Continental S.A., 1979

2.4.2 Cubeta de lanzamiento

Si la diferencia entre las curvas es muy grande, en ninguno de los cuatro casos anteriores puede utilizarse un simple tanque amortiguador para la formación de un salto hidráulico, ya que éste, estaría ahogado acompañado de una corriente de fondo que obligaría a recubrir un tramo grande de conducción, o se generaría un salto hidráulico barrido, es decir, se presentaría en una sección bastante alejada del pie de la caída, obligando al recubrimiento.

Por otro lado, cuando la energía cinética por dispar es muy alta, no es factible la construcción de un tanque amortiguador como estructura terminal, pues su costo es prohibitivo dadas las dimensiones requeridas. Por ello se hace necesario utilizar diseños menos conservadores, como en el caso de las cubetas de lanzamiento y las disipadoras de energía, que conducen a una notable economía en el costo de la obra.

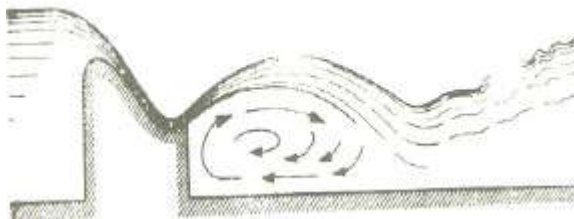
El objetivo de una cubeta de lanzamiento es evitar socavaciones al pie de la caída, ya sea lanzando el agua lejos de los lugares en los que pueda provocar una socavación fuerte o produciendo un remolino bajo la corriente principal que evite que el material suelto que constituye el fondo del cauce sea arrastrado aguas abajo.

El funcionamiento de una cubeta puede ser de tres tipos, que son esquematizados como se describe a continuación²:



CUBETA DE LANZAMIENTO

- Caso 1. Cubeta de lanzamiento, donde el agua es lanzada, de forma libre, lejos del vertedor aprovechando su energía cinética, siguiendo una trayectoria más o menos parabólica.



CUBETA DE LANZAMIENTO CON REMOLINO INFERIOR

- Caso 2. Cubeta de lanzamiento con remolino inferior. El chorro está en contacto en su parte inferior con el agua del cauce, haciéndola girar y formando un remolino de eje horizontal, mientras que la parte superior se encuentra libre. El remolino que se forma permite, por un lado, que el material no se mueva y por el otro la disipación de la energía.



CUBETA AHOGADA CON REMOLINO INFERIOR Y SUPERFICIAL

- Caso 3. Cubeta ahogada, con remolinos en la parte inferior y superior. En este caso la corriente principal está en contacto por arriba y por abajo con agua muerta, formando con ella los dos remolinos.

² Ver Diseño de Presas pequeñas. United States Department of the Interior Bureau of Reclamation. Pág. 18

2.4.3 Cubetas disipadoras de energía

Se pueden mencionar dos tipos de cubetas disipadoras de energía³.

1. Cubeta dentada propuesta por el Bureau of Reclamation (USBR)

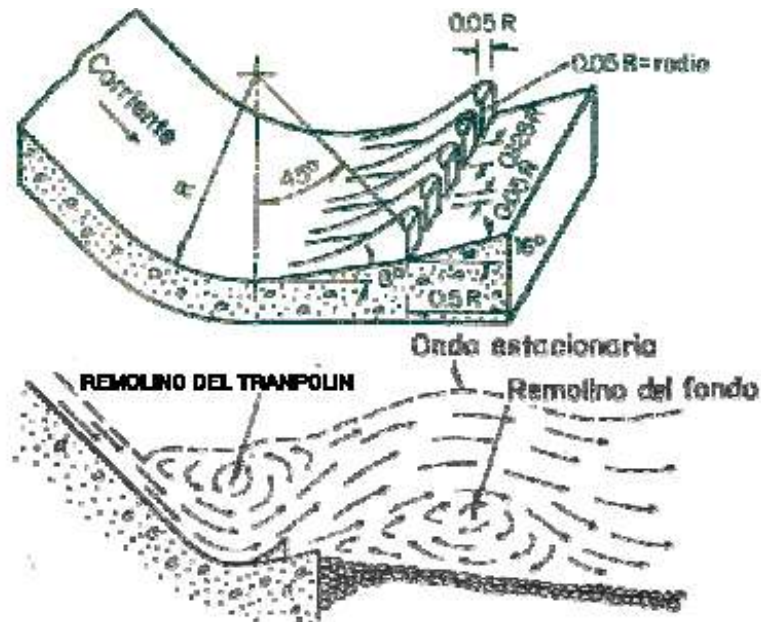


Figura 2.5 Forma y funcionamiento de cubeta dentada

Además del objeto principal, que es evitar la socavación al pie de la estructura, se busco, a través de modificaciones al deflector fijo en una cota, que el material suelto no entrara en la cubeta, y (por medio de la colocación de dientes) que no hubiera grandes turbulencias ni ondulaciones en la superficie. En la cubeta estriada (dentada), el chorro de alta velocidad sale del borde con un ángulo menor que en la cubeta lisa y solamente una parte de él llega a la superficie.

Por ensayes se determinaron tres características de diseño en forma de límite que es necesario no rebasar para tener un funcionamiento correcto: radio de la cubeta y tirante mínimo y máximo aguas abajo.

³ Ver Diseño de Presas pequeñas. United States Department of the Interior Bureau of Reclamation. Pag. 18

CAPÍTULO 2. SELECCIÓN DE LA ESTRUCTURA TERMINAL

2. Cubeta circular simple (lisa), propuesta inicialmente por A.A. Sabaniev (1929) y luego perfeccionada en su cálculo por los profesores I.I. Lievi y M.D. Chertousov

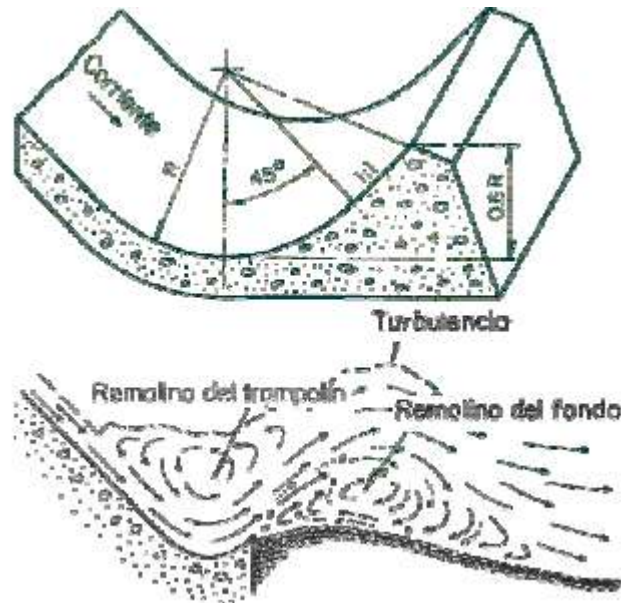


Figura 2.6 Forma y funcionamiento de cubeta lisa

En este caso, la corriente de alta velocidad que sale del borde del extremo de la cubeta se dirige hacia arriba, lo que produce una gran turbulencia en la superficie del agua y un violento remolino en el fondo, que se mueve en el sentido de las manecillas del reloj, aguas debajo de la cubeta.

Este remolino del fondo absorbe constantemente, en el borde de la cubeta, material suelto, del cual una parte se mantiene en estado de agitación continua, lo que puede dar lugar a desgaste en la superficie del concreto.

El funcionamiento hidráulico de ambos sistemas tiene las mismas características, pero los detalles distintivos del flujo difieren por las limitaciones propias de cada uno.

A pesar de que con el funcionamiento de la cubeta estriada se obtiene una disipación de energía cinética mucho menor y menores perturbaciones en la superficie, en ella el fluido tiende a desplazarse con tirantes pequeños en la descarga y a producir un chorro ahogado erosivo con tirantes grandes, efectos que no se producen en las cubetas lisas.