

HIDRÁULICA DE ESTRUCTURAS Y DISPOSITIVOS

PARTES CONSTITUTIVAS DE UN APROVECHAMIENTO HIDROELECTRICO

Un Aprovechamiento Hidroeléctrico, de acuerdo a su peculiar función y tipología, está compuesto por el conjunto de distintas Obras, muchas de las cuales le son exclusivas y otras comparte con otros tipos de Aprovechamientos Hidráulicos, a saber:

1. Obras de Desvío Transitorio (Túneles y Ataguías)
2. Obras de Cierre (Presa o Azud Nivelador)
3. Embalse
4. Obras de Toma (Toma de Agua para Central y/u Otros Abastecimientos)
5. Obras de Conducción (Canal, Cámara de Carga, Galería, Tubería Forzada o de Presión)
6. Obras de Alivio y Descarga (Vertederos, Descargas de Fondo y Medio Fondo)
7. Casa de Máquinas
8. Estación Transformadora
9. Líneas de Transporte de Energía Eléctrica

OBRAS DE DESVÍO TRANSITORIO

Son aquellas destinadas a conducir las aguas del río durante la construcción y/o de crear recintos estancos para realizar trabajos de fundación y construcción. Se diseñan para caudales de cortos períodos de recurrencia, determinados por análisis de riesgo económico.

Algunas pueden incorporarse a las obras definitivas, como son los casos de los túneles de desvío, que se diseñen para seguir siendo utilizados, después de la finalización de las obras, como descargadores de fondo o para erogar parte de los caudales de crecidas. También, en el caso de presas de materiales sueltos, algunas veces ataguías y contra ataguías suelen ser incorporadas, respectivamente a los taludes de aguas arriba y de aguas abajo de las obras de cierre definitivo.







¿Qué hacemos con el río durante la construcción? Ver:

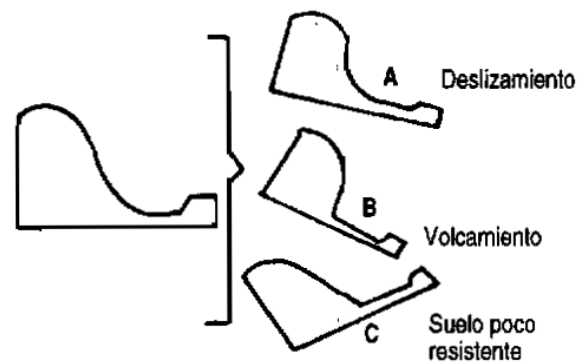
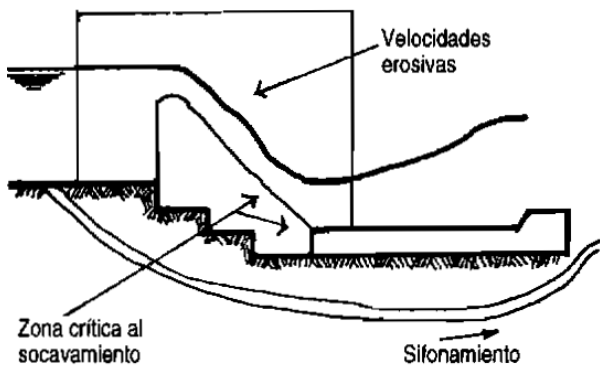
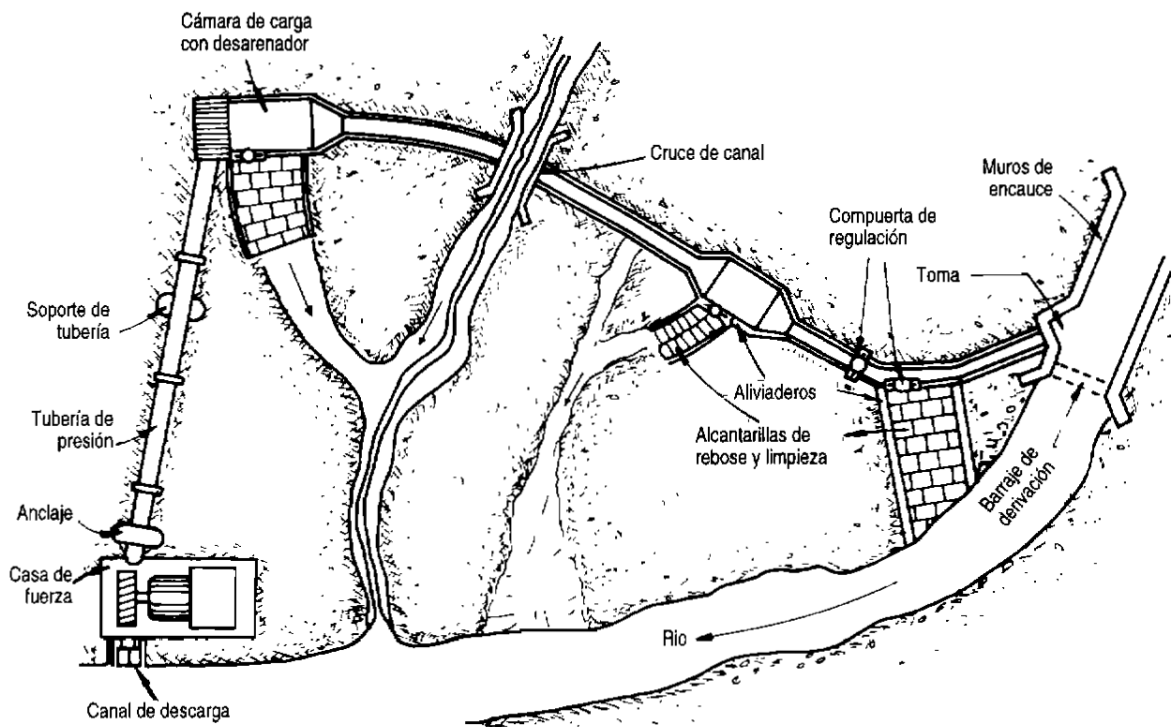
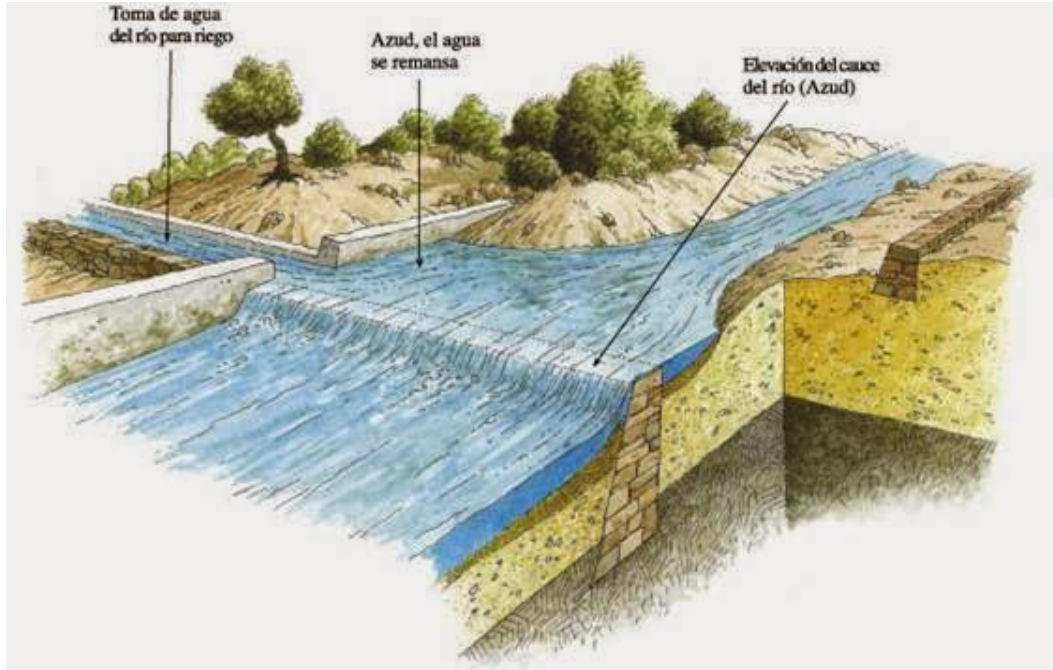
<https://youtu.be/iUvEOdDMF44>

OBRAS DE CIERRE

Se denominan Obra de Cierre tanto a aquellas de pequeña magnitud como los **Azudes Derivadores** o **Niveladores**, generalmente de hormigón y poca altura, como a las de gran magnitud y altura, denominadas **Presas o Represas**, que son obras de acumulación (generan un embalse) y constituyen una gran barrera fabricada con mamposterías, hormigón o materiales sueltos, que se construye habitualmente cerrando valles entre montañas o desfiladeros, donde escurre un río o arroyo.



Los Azudes, del árabe “as sad”: barrera, se encargan de elevar el nivel de las aguas sin generar más que un pequeño remanso, con el objetivo de derivarlas a Obras de Toma que las introducen a Canales que las transportan hasta las Cámaras de Cargas de las Centrales Hidroeléctrica. En similar esquema lo pueden hacer para canalizaciones de riego o abastecimiento de agua potable.



La Presas se encargan de retener el agua del cauce fluvial almacenándolas en un reservorio de gran capacidad denominado embalse, para su posterior aprovechamiento en generación hidroeléctrica mediante Centrales Regularizadas. Ídem para abastecimiento de agua o regadío.

Una Presa retiene en un reservorio que engloba al cauce natural, por el contrario, cuando el reservorio se sitúa fuera del cauce, la estructura se denomina Balsa.

Las presas de hormigón eran hasta hace pocos años, las más comunes, habiendo sido superadas en número y altura, en la actualidad, por las de materiales sueltos. Según sus materiales y diseños, las presas se pueden clasificar en:

Presas de Hormigón:

1. Presas de Gravedad
2. Presas de Contrafuertes
3. Presas de Arco-Bóveda
4. Presas de Hormigón Compactado con Rodillo

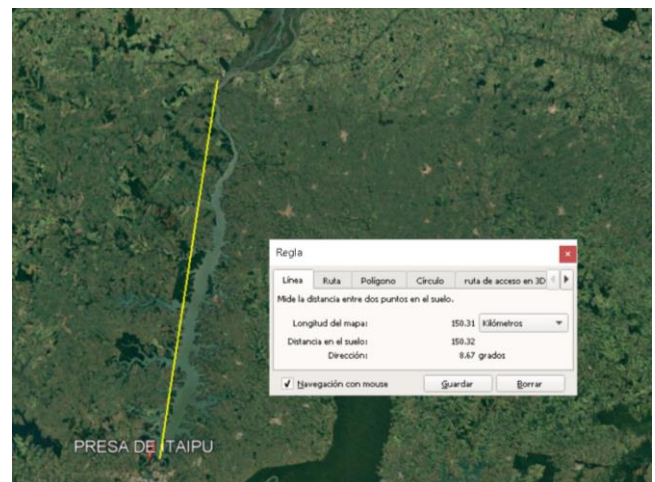
Presas de Materiales Suelos:

5. Presas Homogéneas
6. Presas de Núcleo Impermeable
7. Presas de Pantalla Impermeable
8. Presas de Hardfill (Relleno Rígido)

EMBALSE

Es el volumen de agua que queda retenido, de forma artificial, por la Presa. Se ubica en un lugar adecuado hidráulica, geológica y topográficamente.

Se puede emplear para generar electricidad, pero también para recarga de acuíferos, control de erosiones, control de crecidas, abastecimiento de agua a poblaciones e industrias, riego agrícola, mejora de la navegación, cría de peces, actividades turísticas, recreativas y deportivas, etc.



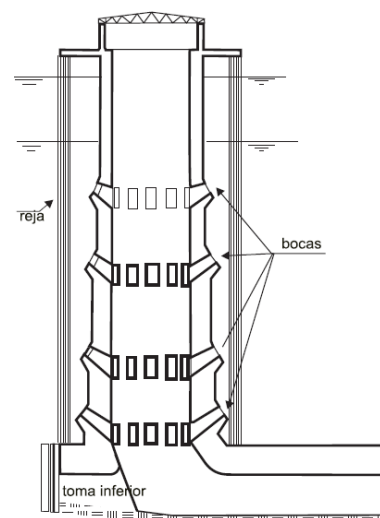
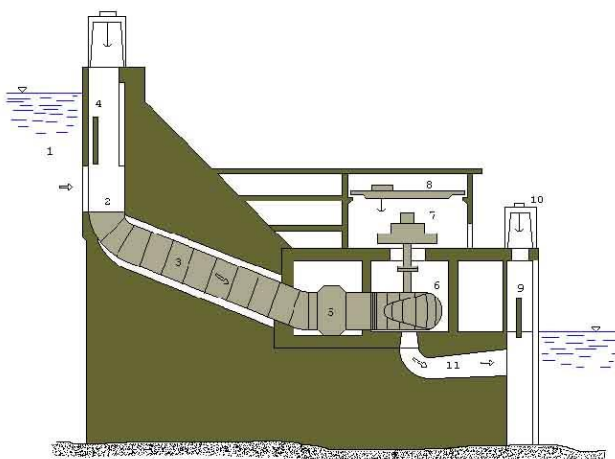
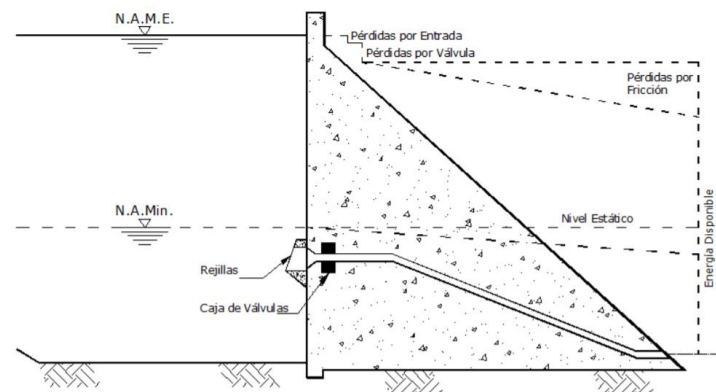
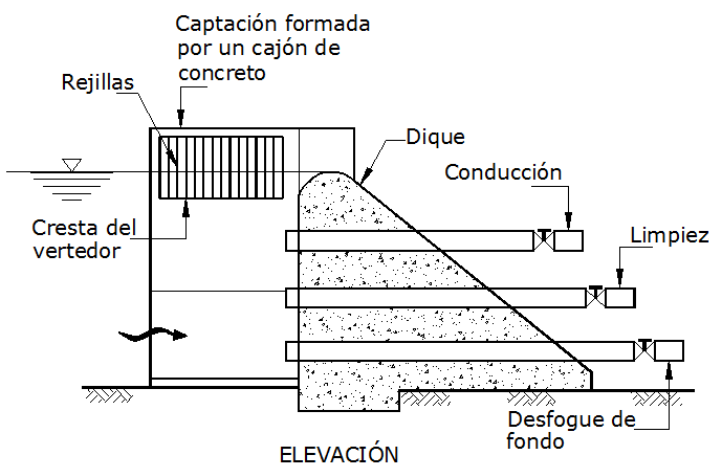


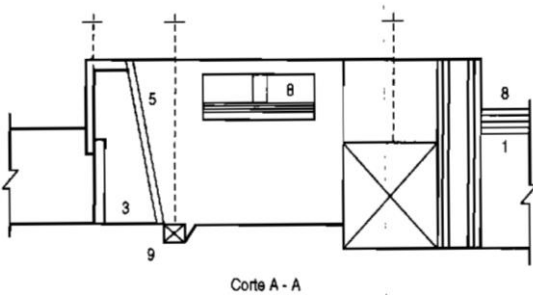
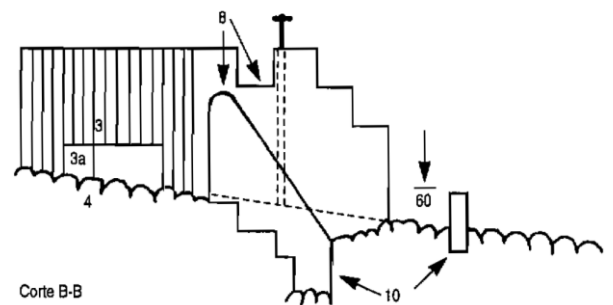
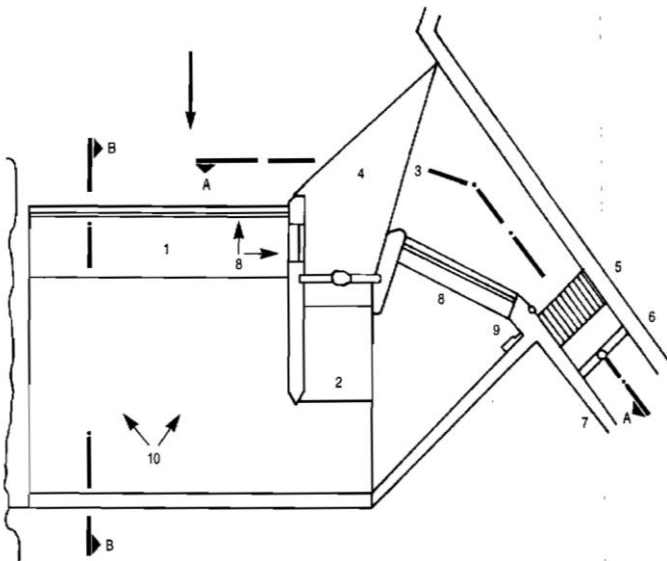
OBRAS DE TOMA

Las Obras de Tomas o Tomas de Agua son construcciones que permiten recoger el agua del Embalse para llevarla hasta las turbinas por medios de tuberías. Se sitúan en el paramento de aguas arriba de la presa, o como Torres de Toma en el embalse.

Además de las compuertas y/o válvulas para regular el caudal que llega a las turbinas, poseen unas rejillas metálicas que impiden que elementos extraños como troncos, ramas, etc. puedan llegar a los álabes de los rotores y producir desperfectos.

Desde allí, el agua pasa a la Obra de Conducción, generalmente una tubería a presión, que atraviesa el cuerpo de la presa. En el interior de la tubería, el agua transforma la energía potencial en energía de presión, y cinética, al adquirir velocidad.





1. BARRAJE
2. Descarga de fondo
3. Solera de captación (con o sin reja)
4. Antecámara (Zona de decantación)
5. Reja fina
6. Compuerta de admisión
7. Canal de aducción (al desarenador)
8. Vertederos de alivio
9. Desripiador

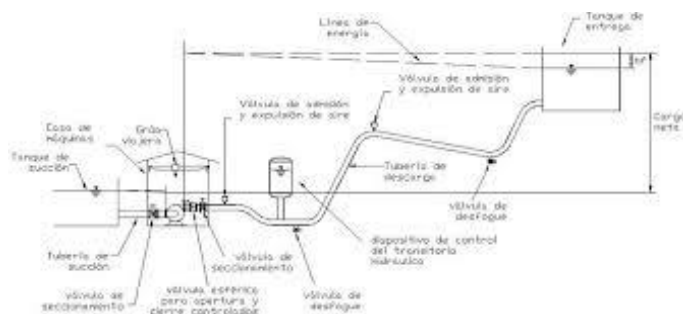
OBRAS DE CONDUCCIÓN

Las constituye los Canales, Galerías, Túneles y Tuberías Forzadas o de Presión, que tienen la misión de transportar el agua derivada hacia la Central para la generación de energía hidroeléctrica. Consecuentemente deben de ser diseñadas minimizando las pérdidas de energía que se pudieran producir, llevando el agua hasta la Casa de Máquinas. Las conducciones a presión tienen que soportar, además de la presión de la columna de agua, los transitorios de sobrepresión y depresión que provoca el golpe de ariete en caso de parada brusca de la Central. Dependiendo de la orografía del terreno y de los factores medioambientales, la colocación de la tubería será subterránea (Túnel o Galería de Presión) o exterior (Tubería de Presión o Forzada).

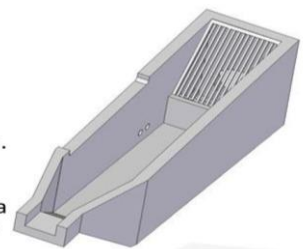


CÁMARAS DE CARGA

La Cámara de Carga es un depósito situado al final del canal, desde la que sale la Tubería Forzada. Está diseñada para actuar como una reserva de agua para mantener la presión de caída en la tubería forzada y requiere una entrada continua de agua del canal para mantener su nivel máximo.

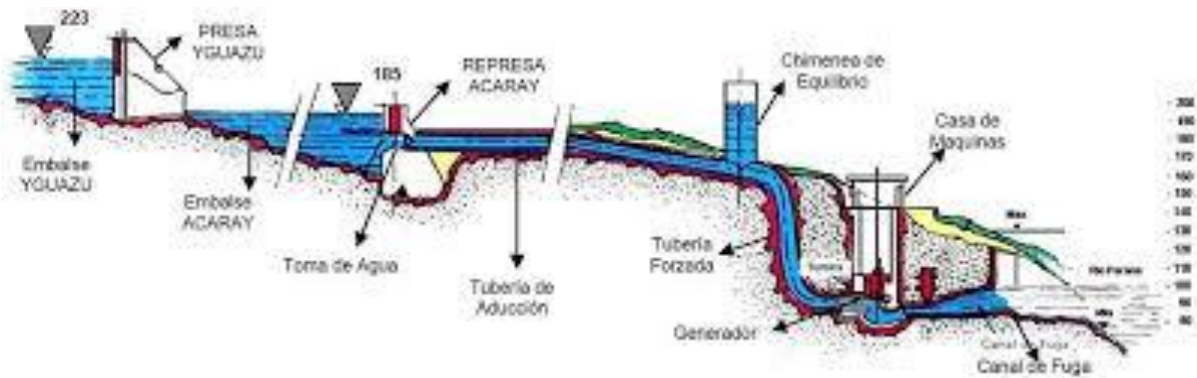
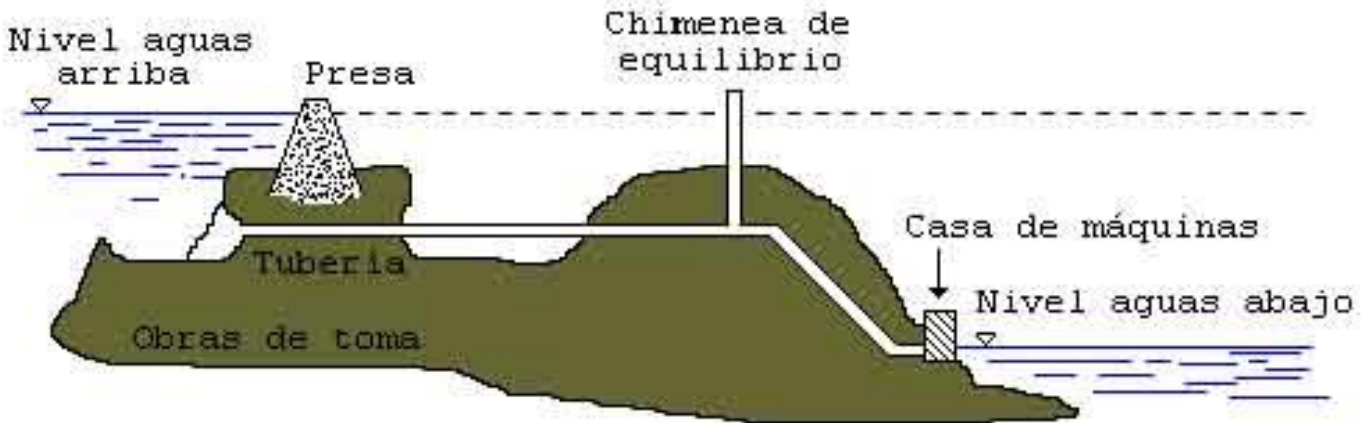


- Se sitúa al final del canal de derivación
- Es un depósito con rejillas, aliviadero y compuertas que sirve de volante para las variaciones de carga en las turbinas.
- La tubería forzada parte de ella.
- Si el canal es en túnel muchas veces no existe la cámara de carga y, entonces, se coloca una chimenea de equilibrio o, pozo piezométrico para reducir los efectos del golpe de ariete.



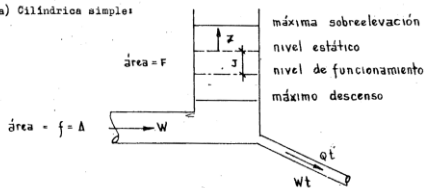
CHIMENEAS DE EQUILIBRIO

La **Chimenea de Equilibrio** o pozo de oscilación es una estructura complementaria de algunas centrales hidroeléctricas y estaciones de bombeo destinada a absorber las sobrepresiones y depresiones causadas por el golpe de ariete en galerías o túneles.

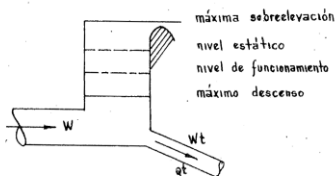


DIVERSOS TIPOS DE CHIMENEAS.

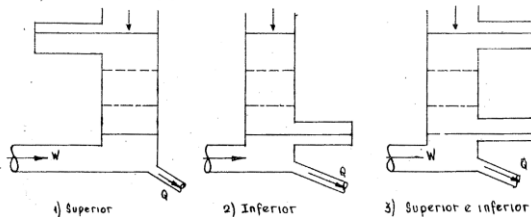
a) Cilíndrica simple:



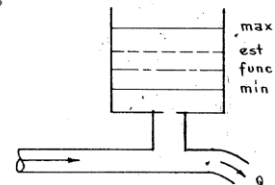
b) Con vertedero o vertederos



c) Con ensanchamientos

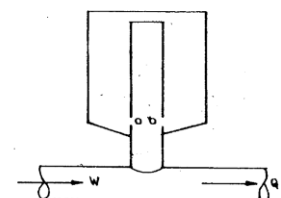


d) Con estrangulamiento

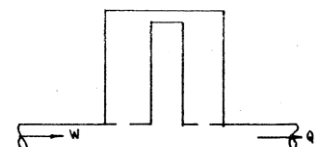


e) Diferencial o de Johnson

1) Con troneras en el tubo elevador



2) Con troneras en el piso de la cámara



OBRAS DE ALIVIO Y ORGANOS DE DESAGÜE

Están constituidas por los Aliviaderos, Compuertas y Válvulas de control. Todas las centrales hidroeléctricas disponen de dispositivos que permiten el paso del hidrograma de crecida desde el embalse hasta el cauce del río, aguas abajo, para evitar el peligro por desbordamiento que podrían ocasionar las crecidas. En esos casos es necesario poder evacuar el agua sobrante sin necesidad de que pase por la central.



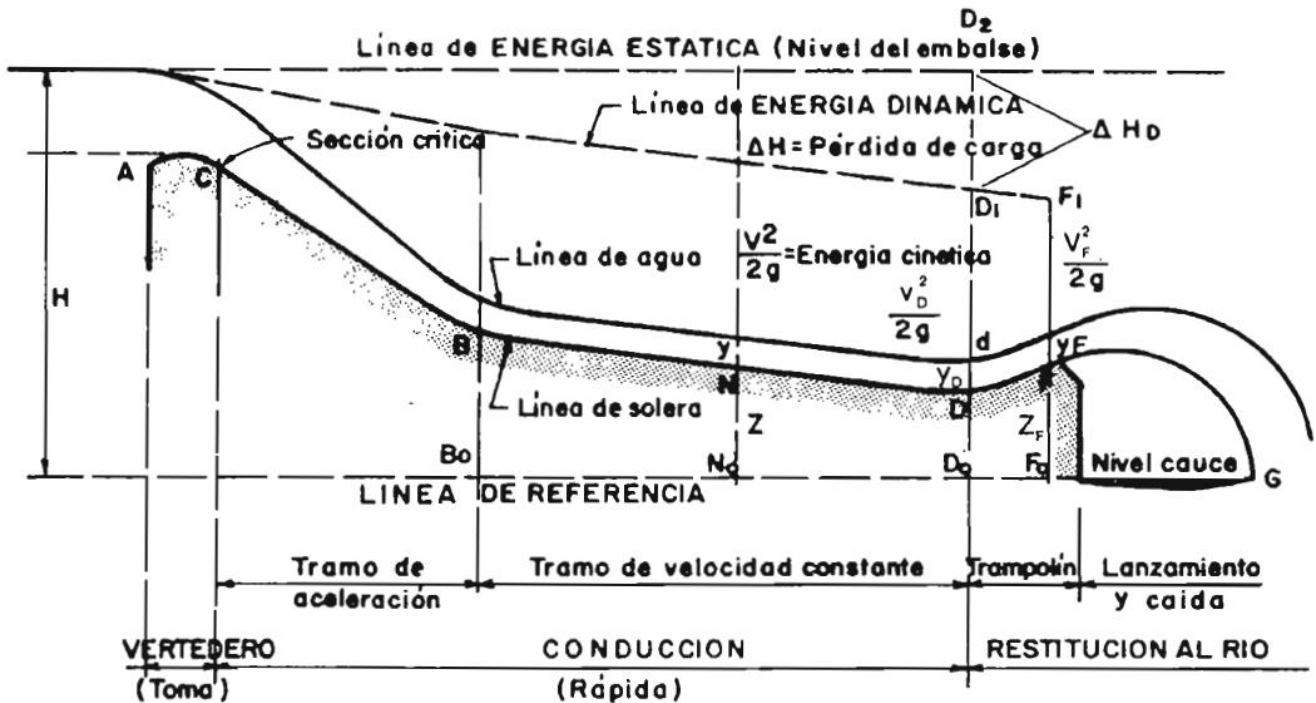
Las compuertas y válvulas son los elementos que permiten regular y controlar los niveles del embalse. Existen distintos tipos de desagüe: los aliviaderos de superficie y los desagües de fondo o medio fondo.

Las **Obras de Alivio** o **Aliviaderos** son aquellas estructuras encargadas de evacuar las ondas de crecidas que penetran en los Embalses, erogando los volúmenes cuyos niveles superen al Nivel Máximo Normal. Podrían considerarse que existen dos tipos: De Superficie y En Carga.

Los **Órganos de Desagüe** son aquellos mecanismos y estructuras que producen el desagüe y/o vaciado de los Embalses, permitiendo evacuar volúmenes ubicados por debajo del Nivel Máximo Normal.

<https://youtu.be/O4jdpNCMWnQ>

Los Aliviaderos tienen tres partes diferenciadas:



1. Toma o Embocadura	2. Canal de Conducción	3. Obra de Restitución
Es la estructura donde se produce la toma del agua del embalse y la que define la capacidad del aliviadero.	Cuya misión es conducir el agua de forma controlada desde la embocadura hasta la restitución.	Por medio de la cual se reintegran los caudales al cauce de manera que no produzcan efectos adversos para la presa.

1. Aliviadero de superficie

El aliviadero de superficie es el tipo más común. Prácticamente la totalidad de las presas está equipada con un aliviadero de este tipo. Se caracteriza porque:

- La embocadura está situada en la parte alta del embalse.
- El vertido se realiza en lámina libre. En los aliviaderos de labio fijo siempre y en los regulados con compuertas cuando estas están completamente abiertas.
- La capacidad de vertido aumenta de manera significativa con el calado vertiente, lo cual los hace más seguros ante la incertidumbre existente en la estimación de las crecidas.



Aliviadero de superficie. Presa de Las Navas del Marqués (España) Fotografía: INPROES

En los vertederos en lámina libre el caudal vertido (q) se calcula de acuerdo a la siguiente expresión:

$$q = C_d \cdot L_u \cdot h^{3/2}$$

Donde C_d es el coeficiente de desagüe, L_u es la longitud útil del vertedero y h es el calado vertiente.

2. Aliviadero en carga o profundo

Estos aliviaderos son mucho menos habituales y se emplean en cerradas estrechas en las que es difícil encajar un aliviadero de superficie que precise gran desarrollo, empleándose la mayor parte de las veces como aliviaderos complementarios a los mismos.



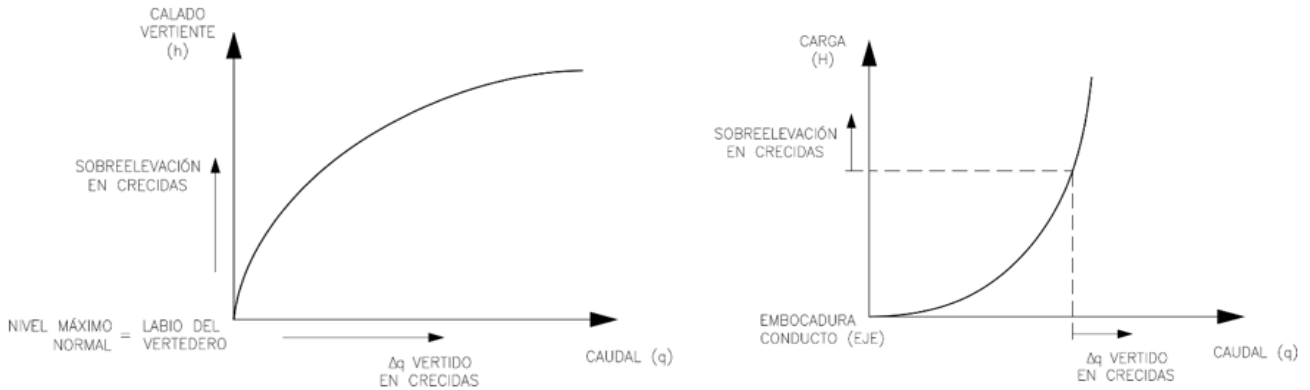
Aliviadero en carga. Presa de Lanuza (España). Fotografía: Confederación Hidrográfica del Ebro

Este tipo de aliviaderos se caracteriza por:

- Al quedar la embocadura por debajo del nivel máximo de llenado trabajan en carga y pueden desaguar caudales importantes sin necesidad de que el embalse esté completamente lleno.
- Su capacidad es prácticamente constante y poco sensible a la variación del nivel de embalse.
- Desde el punto de vista de seguridad, en caso de que se presenten crecidas superiores a las previstas, son menos seguros que los aliviaderos de superficie con vertido en lámina libre.
- Son más adecuados en lugares en los que se pueden determinar las avenidas con fiabilidad y en los que los caudales entrantes están acotados (por ejemplo, en presas que reciben la aportación principal desde un canal o mediante un bombeo).
- El caudal vertido en estos casos se determina mediante la siguiente expresión:

$$q = k \cdot S \cdot (2gH)^{0.5}$$

Siendo k el coeficiente que engloba las pérdidas de carga en embocadura y conducto, S la sección del conducto, g la gravedad y H la carga hidráulica desde la superficie de la lámina de agua hasta el eje en la embocadura del conducto.



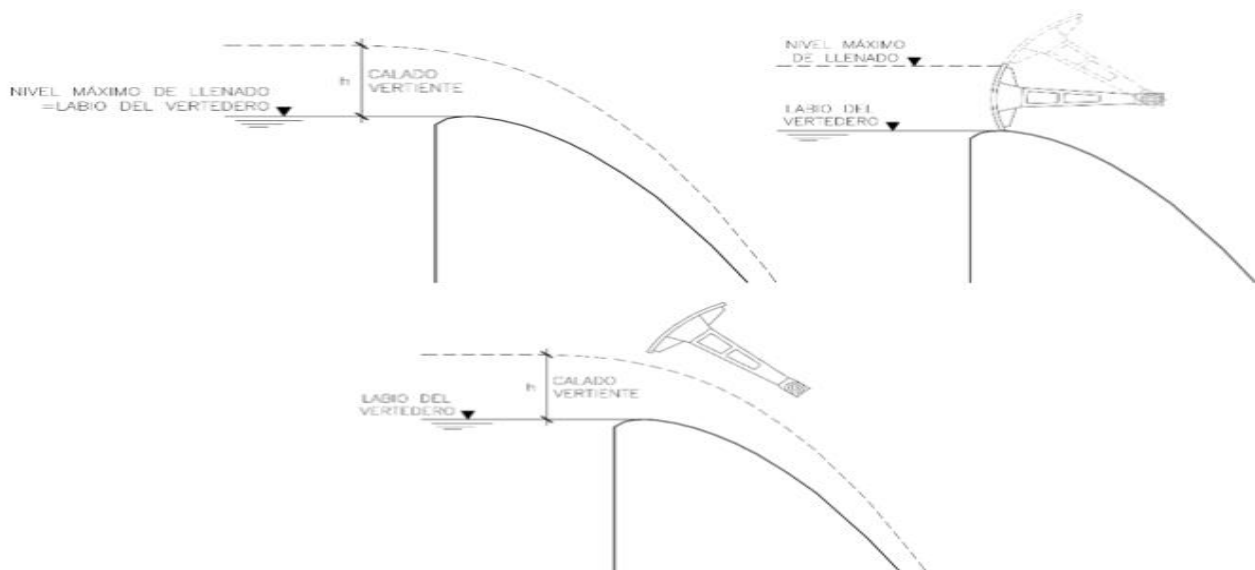
Curvas de Gasto. Aliviadero en lámina libre (izquierda) y aliviadero en carga (derecha)

La **ubicación del aliviadero**, sobre el **cuerpo de presa o exterior al mismo**, está muy vinculada a la tipología, aunque otros factores como la morfología o la geología de la cerrada pueden hacer variar la disposición habitual. En el siguiente video se comparten algunos aspectos sobre este tema.

<https://youtu.be/uPWBYFVfyW0>

ALIVIADEROS REGULADOS POR COMPUERTAS Y DE LABIO FIJO

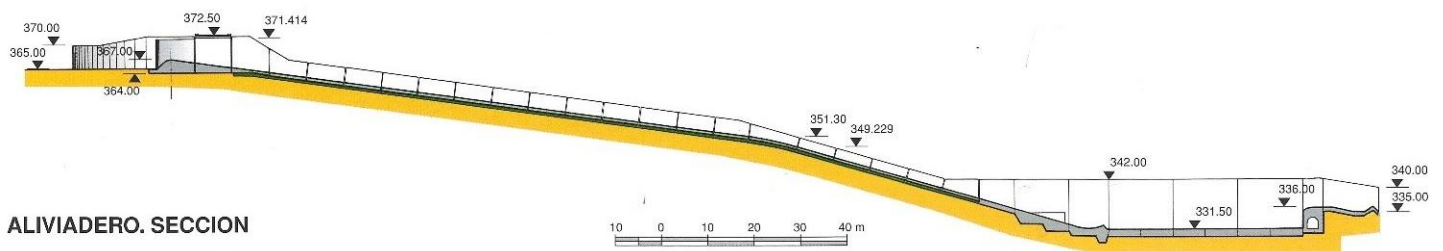
Los aliviaderos de superficie pueden estar **regulados con compuertas** o **ser de labio fijo**. Ambas configuraciones son comunes y la elección entre un tipo u otro depende del uso de la presa y de los medios de que se vaya a disponer en la explotación.



Aliviadero labio fijo (izquierda) y aliviadero con compuertas (centro y derecha)

Los aliviaderos de labio fijo son más simples:

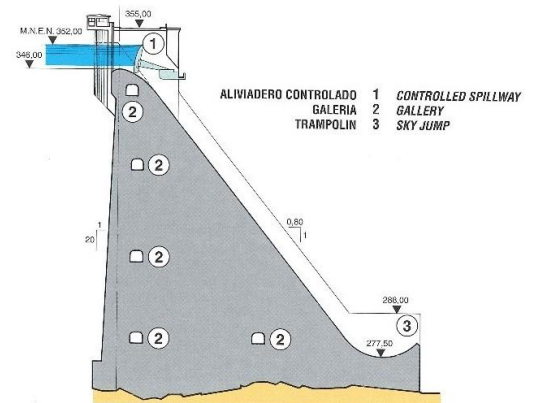
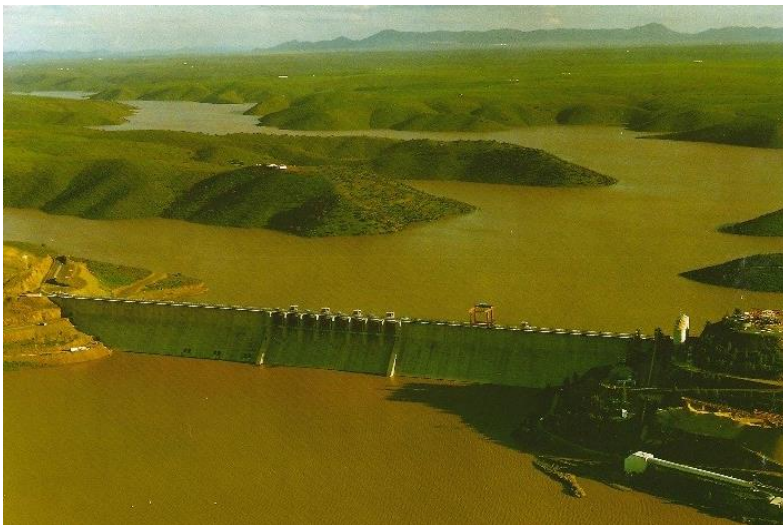
1. No tienen ningún elemento mecánico ni de regulación.
2. El vertido se produce de manera automática una vez que sobrepasa su umbral.
3. Son muy robustos y garantizan siempre la atenuación de la avenida, es decir, que el caudal de punta vertido será siempre inferior al caudal punta de entrada y la punta se retrasará en el tiempo.



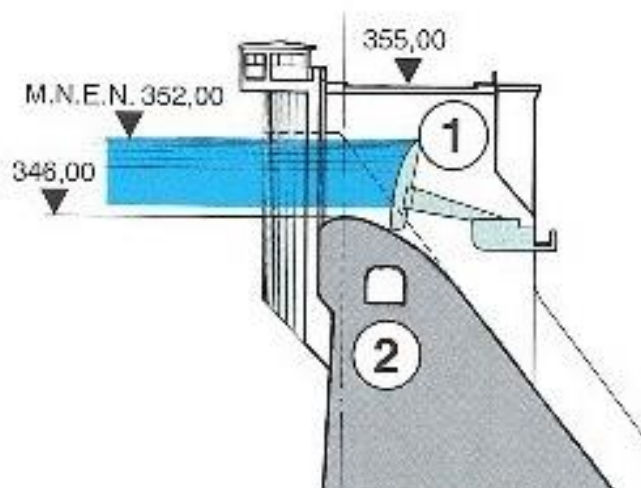
Aliviadero de labio fijo. Presa del Jerte (España). Fotografía y gráfico: Ministerio de Transición Ecológica (España)

Los **aliviaderos regulados con compuertas** son más complejos, tanto en su mantenimiento como en su operación) al disponer de elementos mecánicos de cierre. En ellos:

1. Se logra un mejor aprovechamiento del embalse, ya que parte de la sobreelevación que se necesita para el desagüe de las avenidas se tiene almacenada.
2. Se permite una cierta gestión de las avenidas, ya que se pueden verter caudales antes de la llegada de las mismas.
3. Se precisa mantenimiento continuo a las compuertas por ser elementos mecánicos. Esto con el fin de estar operable al momento de presentarse la avenida.



Aliviadero regulado con compuertas. Presa de La Serena (España). Fotografía y gráfico: Ministerio de Transición Ecológica (España)



La no apertura de las compuertas en el momento de la avenida puede dar lugar a sobrevertido por coronación y en las tipologías más vulnerables, como las de materiales sueltos, su rotura (por ejemplo, la rotura de la presa de Tous en España, en 1982). A efectos del accionamiento en situaciones extraordinarias, en las presas con aliviaderos con compuertas se necesita personal convenientemente formado y sistemas de alimentación de energía redundantes.

El uso de compuertas en la actualidad está ligado a **embalses de grandes explotadores**, muchas veces asociados al uso hidroeléctrico, por su relación con la provisión de medios y personal para su mantenimiento y maniobra.

LONGITUD DEL VERTEDERO Y EFECTO SOBRE LA LAMINACIÓN

La longitud del vertedero está relacionada con el efecto de laminación que se produce en los embalses cuando las avenidas pasan por los mismos.

La **laminación** es un efecto siempre beneficioso mediante el cual se reduce el caudal de punta del hidrograma de salida y se retrasa dicha punta en el tiempo. Es una consecuencia automática del paso de la avenida por el embalse y se debe a que parte de la misma se almacena transitoriamente en el proceso de vertido por el aliviadero.

<p>Si se reduce la longitud del aliviadero la laminación se acentúa.</p>	<p>Es decir, se reduce el caudal de salida, pero se aumenta la sobreelevación en el embalse, por lo que se requerirá un mayor resguardo para absorberlo.</p>
<p>Si se aumenta la longitud del aliviadero el efecto de la laminación es menor.</p>	<p>Es decir, se vierte un caudal mayor de salida con una sobreelevación menor del nivel de embalse.</p>
<p>Si lo que se desea es restringir los caudales de salida para evitar daños aguas abajo se debe limitar la longitud del aliviadero.</p>	<p>De esta manera se producirá una laminación más potente. Ello se debe contrarrestar disponiendo de un resguardo adecuado en la presa para que el embalse pueda almacenar transitoriamente la avenida sin que se produzcan desbordamientos.</p>
<p>Si lo que interesa es limitar el nivel que se alcanza en el embalse, porque existen poblaciones, viene o infraestructura que pueden inundarse por la sobreelevación o por razones de seguridad de la presa.</p>	<p>Se emplean longitudes de aliviadero más largas que permiten la evacuación de mayores caudales con una sobreelevación menor.</p>

PERFIL DEL VERTEDERO Y ACOPLE A LA SECCIÓN

El **vertedero** tiene una forma específica fijada para que el coeficiente de desagüe sea lo más alto posible y para que la lámina no se desprege del paramento, ya que se busca evitar presiones por debajo de la atmosférica y limitar el riesgo de cavitación.

En el siguiente video se explica más al respecto: <https://youtu.be/IFW70HSbIU8>

DISEÑO DEL VERTEDERO

COEFICIENTE DE DESAGÜE Y LONGITUD ÚTIL

Coefficiente de desagüe (C_d): El coeficiente de desagüe varía en función del calado vertiente:

Variación del coeficiente de desagüe en un perfil Creager (C_d)							
h/h_{dis}	0,2	0,4	0,6	0,8	1	1,2	1,4
C_d	1,79	1,89	1,97	2,04	2,1	2,34	2,6

- Para el calado de diseño (h_{dis}), el coeficiente de desagüe es aproximadamente de 2,1 para el perfil Creager y 2,18 (algo más eficiente) para el perfil USBR.
- Si el calado vertiente es menor al de diseño, el coeficiente de desagüe es más pequeño.
- Si el calado vertiente es superior, el coeficiente de desagüe aumenta.

Para vertidos por encima del diseño, la lámina tiende a despegarse del paramento, con lo que aumenta el riesgo de cavitación; sin embargo, este despegue conlleva una depresión que favorece (por succión) el que se desagüe un mayor caudal.

Como el calado de diseño se asocia a una avenida de alto periodo de retorno, en general denominada avenida de diseño (cuya probabilidad de superación está en torno 10^{-3} en gran parte de la normativa y mejores prácticas a nivel internacional), el que se sobrepase solo se producirá transitoriamente en situaciones extremas, en las cuales es favorable dicho incremento y los desperfectos que se produzcan pueden arreglarse una vez finalizada la avenida. En la selección del calado de diseño se tiene que tener en cuenta la existencia de compuertas.

Longitud útil (L_u)

La longitud útil de vertido (L_u) que debe considerarse en el cálculo es inferior a la longitud libre total del vertedero. Esto se debe a la contracción que tiene el flujo de entrada al aliviadero en la zona de contacto con los estribos y las pilas intermedias. Por todo lo anterior, es importante que:

1. Los estribos y las pilas tengan forma hidrodinámica y radios amplios para minimizar la contracción y mejorar la capacidad del aliviadero.
2. Las embocaduras abruptas y los remates en arista viva (por aguas arriba) no son recomendables, que generan una mayor separación.
3. Se mejora el funcionamiento cuando las pilas o estribos se prolongan hacia aguas arriba penetrando en el embalse, en la zona de aproximación al vertedero en la que las velocidades son menores. De esta manera se canalizan las líneas de corriente antes de que se depriman por efecto del vertedero.

Este parámetro depende también del calado vertiente, conforme aumenta éste, aumenta la velocidad en la aproximación y las líneas de corriente tienden a separarse de los paramentos, incrementándose la contracción.

El valor de la longitud útil puede determinarse de acuerdo a la siguiente expresión:

$$L_u = L - 2(n \cdot C_P + C_E) \cdot h$$

Donde C_P es el coeficiente de contracción de las pilas y C_E el de los estribos.

Remate de proa de pilas	C_P
Arista viva	0,1
Acuerdo circular (10%)	0,02
Semicircular	0,01
Hidrodinámico	0

Remate de la proa de estribos	C_E
Semicircular radio hasta 0,5h	0,1
Hidrodinámico o semicircular radio >0,5h	0

Diseño del vertedero - Disposición de pilas en el aliviadero

La **disposición de pilas** que dividen el aliviadero obedece a distintas razones:

- Limitar la luz de las vigas o la losa del paso superior, para que este sea más barato.
- Limitar el canto de las vigas o losa, esto es siempre interesante para facilitar el paso de flotantes y se puedan admitir mayores sobrelevaciones sin que la lámina toque la parte inferior del tablero.
- Facilitar la aireación. Porque permiten alojar conductos específicos de aireación y porque el remate con aristas vivas por el lado de aguas abajo facilita la separación del flujo y la entrada de aire.
- En los aliviaderos regulados con compuertas, permiten limitar su longitud y facilitan el anclaje y la ubicación de su sistema de accionamiento y acceso.

CAVITACIÓN

En los sitios en los que el agua circula a gran velocidad y hay alguna irregularidad se produce una bajada de presión que puede dar lugar a cavitación:

- Si la caída de presión rebaja el umbral de la atmosférica se facilita que el agua pueda pasar de estado líquido a gaseoso a temperatura ambiente, formándose burbujas de vapor de agua.
- Cuando la presión se recupera las burbujas implosionan volviendo al estado líquido.
- Las burbujas que implosionan sobre una superficie dan lugar a cavitación, mientras que las que están inmersas en el flujo no producen ningún efecto nocivo.
- La implosión de las burbujas es un golpeteo de pequeña magnitud sobre la superficie, que aislado no causaría ningún problema, pero repetidos millones de veces por sucesivas burbujas, desgasta el material y produce daño.
- La cavitación es el efecto de la persistencia, que en otro orden de cosas puede observarse en acciones cotidianas, como por ejemplo en lugares de peregrinación en los que la gente acostumbra a tocar una piedra y al cabo del tiempo solo con el simple apoyo de los dedos se hace un agujero
- Una vez iniciado el daño el comportamiento hidráulico empeora y ello da lugar a que el proceso de desgaste se acelere pudiendo llegar a producirse un deterioro considerable en poco tiempo.

Para luchar contra la cavitación existen:

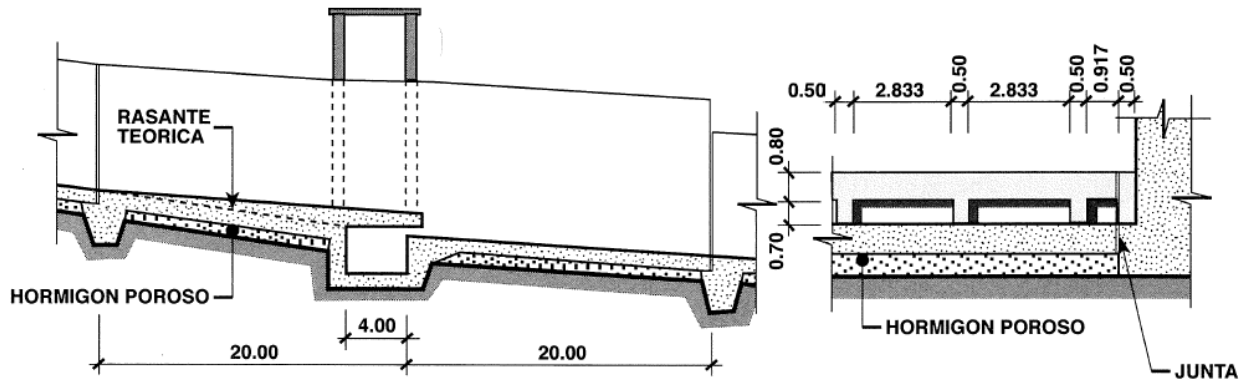
Medidas preventivas	Medidas correctivas
<ul style="list-style-type: none"> • Hacer un buen diseño, intentando que el flujo se mantenga en un rango de presiones adecuadas. • Cuidar la ejecución de pilas y solera. Sobre todo las alineaciones de los encofrados y el tratamiento de las juntas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Airear el flujo. Las burbujas de aire emulsionadas actúan como un colchón. Cuando se llega a la zona de presiones subatmosféricas las burbujas de aire se expanden y al volver a aumentar la presión se contraen. Con una concentración de burbujas de aire superior al 8% se consigue una protección efectiva frente a la cavitación.



Daños por cavitación en el aliviadero de la presa de Glen Canyon (EEUU).

Fotografía: United States Bureau of Reclamation (USBR)

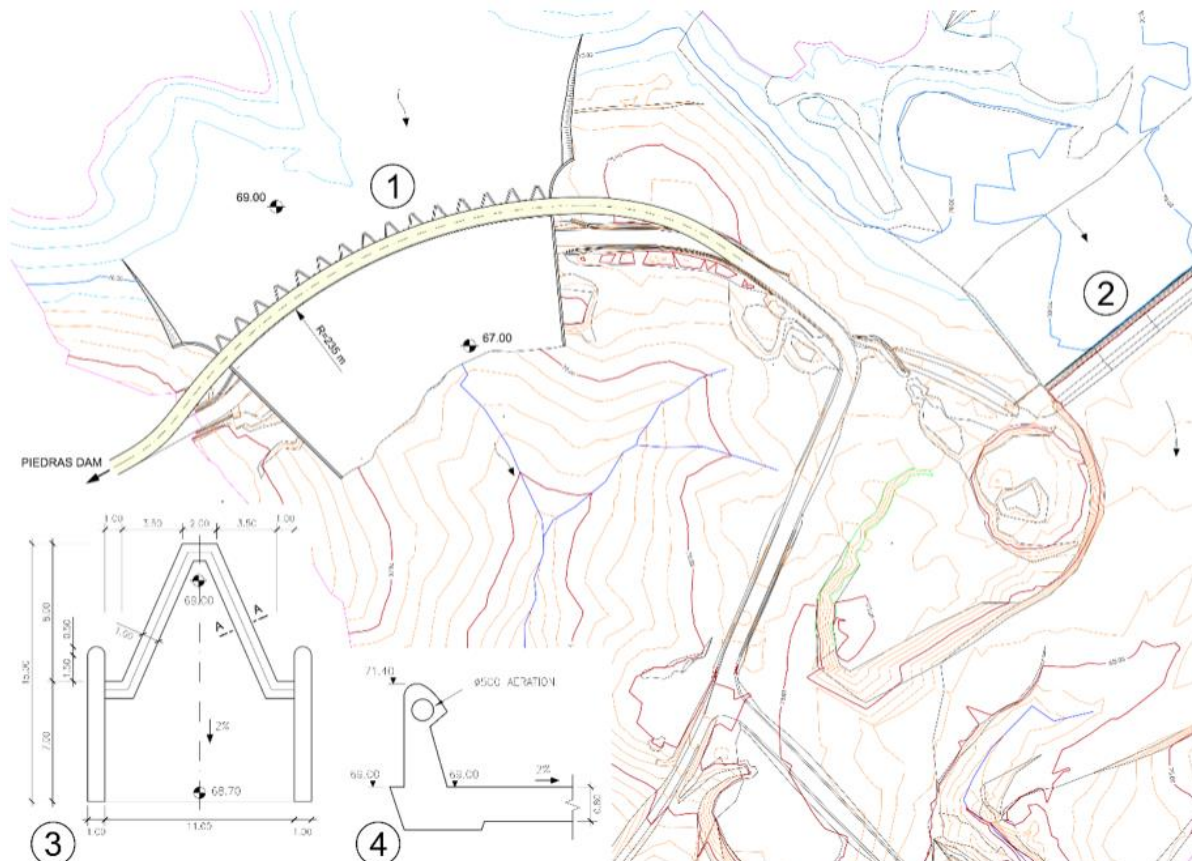
En aquellos casos en los cuales exista riesgo de cavitación se disponen aireadores. Estos muchas veces consisten en escalones en la solera o discontinuidades en los cajeros conectados a un colector de aireación. Al pasar el flujo por los mismos se separa y succiona aire por la cara inferior, que con la turbulencia se distribuye de manera muy rápida en la masa de agua.



Ejemplo de aireador. Presa de Giribaile (España). Gráfico: SPANCOLD. Guía Técnica 5. Aliviaderos y desagües

VERTEDEROS EN LABERINTO Y EN TECLA DE PIANO

Los **vertederos en laberinto** están concebidos para poder desaguar caudales mayores sobre una directriz de longitud determinada, para ello el labio del vertedero se pliega en zig-zag sobre el eje de la directriz, proporcionando una longitud de vertido significativamente superior.



Ejemplo de aliviadero en laberinto. Aliviadero complementario. Presa del Piedras (España)

En los diseños realizados la longitud puede ser entre 4 y 8 veces mayor que la de la directriz de base y el caudal vertido entre 3 y 5 veces el desaguado por un aliviadero convencional dispuesto en la misma directriz.

Este tipo de aliviaderos permite incrementar la capacidad de vertido en una ubicación determinada; por lo que se utilizan en:

- La recuperación de la seguridad hidrológica de presas con limitaciones.
- En aliviaderos en los que se desea eliminar las compuertas sin perder capacidad de regulación.
- En nuevos diseños con espacio limitado para ubicar el aliviadero.

Los **vertederos en tecla de piano o PKW** (por sus siglas en inglés) responden al mismo concepto y son una variante de los aliviaderos en laberinto, con un diseño más compacto, en el cual los pliegues tienen caras paralelas entre sí lo que permite su colocación sobre presas de fábrica.

ALIVIADEROS EXTERNOS AL CUERPO DE PRESA - DISPOSICIÓN

Los aliviaderos exteriores al cuerpo de presa se utilizan fundamentalmente en las presas de materiales sueltos y en algunas presas bóveda para no debilitar los arcos superiores o porque a pie de presa puede ubicarse la casa de máquinas de la central.

Existen tres disposiciones básicas cuando el aliviadero es una estructura independiente al cuerpo de presa, que son:

- **En los estribos de la presa.** Es la disposición más común. La embocadura se dispone en uno de los estribos de la presa y el canal de descarga baja por la ladera hasta el cauce donde se ubica la estructura de restitución. La elección de un estribo otro depende de:
 - La morfología. Son preferibles aquellas con pendiente uniforme y suave, que presenten fácil acceso.
 - La geología. El canal de descarga se debe cimentar sobre roca y sus taludes deben ser estables. Hay que comprobar la presencia de coluviones, posibles deslizamientos y el buzamiento de los paquetes de roca.
- **En un collado.** Es una opción menos común ya que requiere una morfología favorable (que exista el collado) y que los caudales vertidos sean limitados. Es un aliviadero barato si se dan las condiciones adecuadas.
 - Se podrá plantear en presas que agoten topográficamente la cerrada, de forma que existan collados en el entorno por los que se pueda ver el caudal.
 - Solo será competitiva si los caudales vertidos son de pequeña magnitud. De forma que la obra se limite básicamente a la embocadura y descarga hasta el collado, sin que sea necesaria la protección contra la erosión del cauce aguas abajo.
- **En túnel.** Es una alternativa cara. Se plantea cuando no es posible disponerlo en las laderas (o en un collado), bien porque la cerrada es angosta o bien porque la geología es desfavorable.

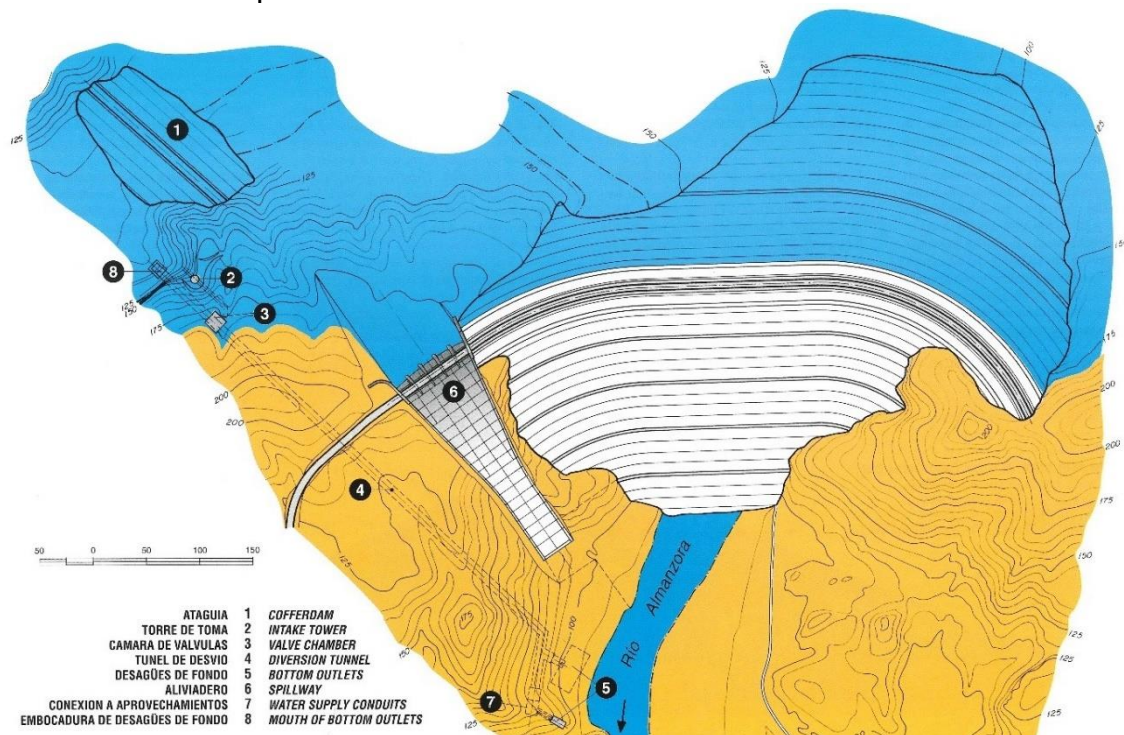
En algunas ocasiones el túnel puede ser una estructura artificial dispuesta en la zona del cauce. Esta solución puede ser adecuada cuando la geología de los estribos sea también desfavorable para la ejecución de un túnel.

ALIVIADEROS EXTERNOS AL CUERPO DE PRESA - EMBOCADURA FRONTAL O LATERAL

La **embocadura de los aliviaderos exteriores** puede ser del tipo frontal o lateral. Las dos son configuraciones muy habituales, dependiendo elección de una u otra de la longitud de vertedero que se precise y de la morfología de la ladera.

1. En los **aliviaderos de entrada frontal la embocadura es sensiblemente ortogonal al eje del canal de descarga**. De manera que el agua, una vez que pasa el vertedero, se incorpora al canal de descarga sin sufrir ningún cambio de dirección que pueda producir alteraciones en el flujo. Por lo que su funcionamiento hidráulico (si no tienen una contracción fuerte por estrechamiento del canal) es más sencillo.

La embocadura frontal se puede encajar bien cuando la topografía de la ladera es suave y cuando la presa está cerca de agotar topográficamente la cerrada. En otros casos dará lugar a excavaciones importantes. Estas excavaciones no plantean una limitación en sí, ya que si el material es adecuado se podrá utilizar para la construcción del cuerpo de presa. Pero si el talud es significativo puede tener problemas de inestabilidad que se deben valorar.



Aliviadero de entrada frontal. Presa de Cuevas de Almanzora (España). Gráfico: Ministerio de Transición Ecológica (España)

Cuando la longitud necesaria de vertedero es significativa, la adopción de una entrada frontal puede obligar a excavaciones importantes cuando la presa no agota la cerrada. En estos casos puede interesar la disposición lateral de la embocadura.

2. En los **aliviaderos de embocadura lateral el vertedero está sensiblemente alineado con el eje del canal de descarga**. Esta disposición permite alargar el vertedero sin meterse hacia la ladera siendo la excavación requerida moderada.

El agua entra por tanto en dirección perpendicular a la del canal de descarga, de forma que si se incorporase directamente al mismo produciría perturbaciones que podrían desembocar en su

desbordamiento. Por ello, el vertedero vierte a una cubeta tranquilizadora que sirve de elemento de paso previo al canal de descarga.



Aliviadero de entrada lateral. Presa del Yegüas (España). Gráfico: Ministerio de Transición Ecológica (España)

En la cubeta se tranquiliza el flujo tras la caída de paso del vertedero y cambia de dirección. Para que ello se realice en régimen lento la sección de salida de la cubeta es una sección de control en la que pasa por crítico. Esta sección puede establecerse bien mediante un estrechamiento, bien mediante un pequeño acelerador o bien mediante el cambio de pendiente de la solera.

El hecho de que el aliviadero cuente con dos secciones de control (sección de entrada a la cubeta y sección de salida) obliga a **comprobar en el dimensionamiento hidráulico que en la cubeta se pueden desaguar los caudales manteniendo un resguardo adecuado y que no se anega el vertedero**. Si esto se produjera sería la sección de control de salida de la cubeta la que gobernaría la capacidad del aliviadero, y al ser esta una sección de longitud reducida la capacidad disminuiría de manera sustancial por lo que podría producirse el desbordamiento de la presa.

DESAGÜES DE FONDO

Los Desagües de Fondo son conductos que se dejan en la zona baja de la presa y que sirven para vaciarla, limpieza periódica de sedimentos o rebajar el nivel por debajo del umbral del aliviadero. Como son conductos que trabajan en carga tienen una capacidad limitada.

El control del nivel de embalse es una función muy importante de cara a la seguridad de la presa, desde el punto de vista estructural porque reduce el empuje a que se encuentra sometida la presa (aunque el vaciado rápido puede producir situaciones adversas en presas de materiales sueltos y tensionales en las presas bóveda), y desde el punto de vista hidráulico porque habilita un resguardo que mejora la laminación de las avenidas. Además, los desagües de fondo tienen otras funciones:

- Pueden colaborar en el desagüe de las avenidas.
- Permiten renovar el agua más baja del embalse que es la de menor calidad.

- Permite la puesta en carga controlada de la presa.
- Se rompe localmente la estratificación del embalse.

El desagüe de fondo debe estar siempre operativo. Para ello debe maniobrase regularmente, para conservar los equipos electromecánicos y para que no se acumulen sedimentos en su entorno inmediato.

Lo que queda por debajo del umbral de los desagües es el embalse muerto, hay un volumen de embalse al que no se puede acceder. El embalse muerto tiene su función: disponer de un volumen en el que se acumulen los sedimentos sin aterrar los conductos en el que puedan sobrevivir los peces si se baja el nivel de embalse.



Válvula Howell - Bungler de la descarga de medio fondo, en operación. Presa Ocumarito, Venezuela.

Capacidad del Desagüe de Fondo

Con respecto a la capacidad del desagüe de fondo, el tamaño depende de la capacidad del embalse, hay que ver más o menos en cuánto tiempo se desea vaciar el embalse. Como orden de magnitud orientativo, este tiempo puede ser:

- Una semana a dos semanas en un embalse pequeño (capacidad menor de 1 hm³).
- Uno o dos meses en embalses grandes (hasta 100 hm³).
- Hasta seis meses en embalses muy grandes.

Debe tener una capacidad significativamente superior al caudal medio del río para poder realizar un control efectivo del nivel de embalse. En la presa de Martín Gonzalo (España), el desagüe era muy pequeño y cuando tuvo la avería en la pantalla (sifonamiento de la capa de apoyo por erosión interna) no se pudo rebajar el nivel de embalse.

Tener un desagüe de fondo potente da mucha seguridad a la presa, pero debe mantener un equilibrio ya que desembalses muy rápidos pueden generar problemas de inestabilidad en las laderas del vaso o en la propia presa, si es de materiales sueltos.

Elementos de la Embocadura

Las velocidades que se alcanzan en el desagüe de fondo son muy altas (en presas de mediana o gran altura las velocidades están siempre por encima de los 30 m/s), por lo que el riesgo de cavitación en los mismos muy alto, por ello los conductos están protegidos con blindajes de acero y disponen de aireación.

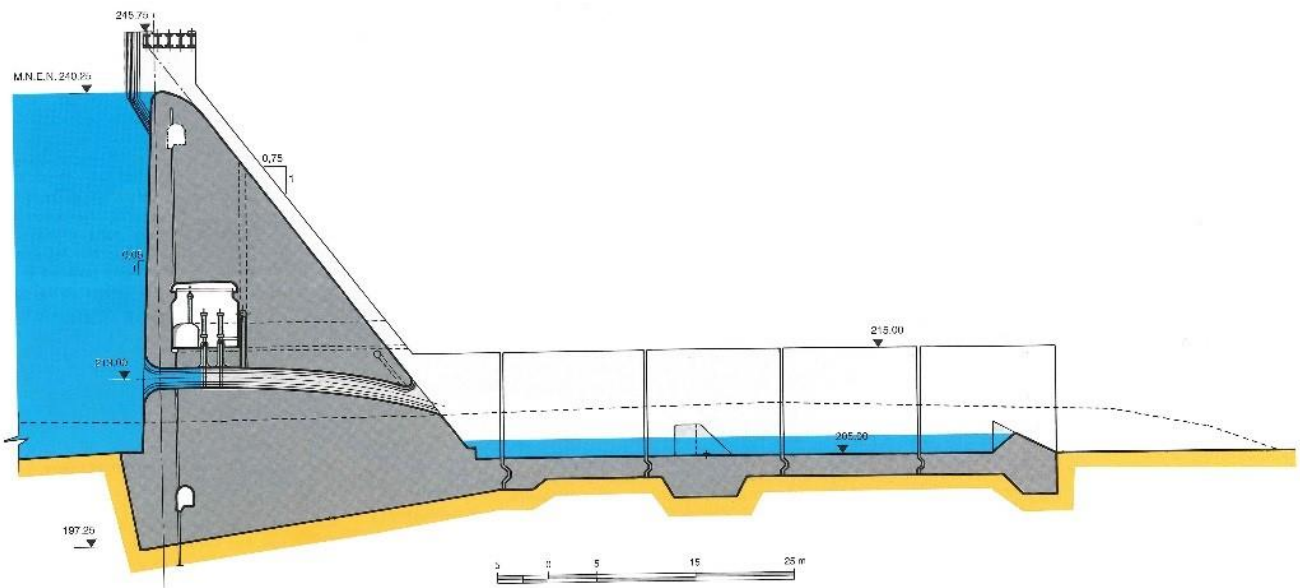
Como es un elemento fundamental de cara a la seguridad, todos los **elementos están duplicados**, por tanto, al menos dos conductos y dos elementos de cierre.

- Hoy en día los **conductos** se construyen con acero inoxidable, siendo habitual la calidad AISI 304 L (L-low, bajo contenido en carbono, que se suelda mejor).
- A la entrada del conducto se coloca un paso de **rejas** para evitar que se cuelen elementos que puedan dañar las válvulas.
- Las **rejas** tienen una superficie mucho mayor que la del conducto (unas 20 veces) para que la velocidad a su paso sea reducida y no se produzcan pérdidas de carga y para garantizar su buen funcionamiento aún con porcentajes de taponamiento importantes.
- La **separación entre las pletinas** de las rejas no debe ser mayor de 1/5 del diámetro del conducto. Es habitual que la separación sea entre 10 y 20 cm.
- La **estructura de rejas** tiene que ser suficientemente rígida y robusta.

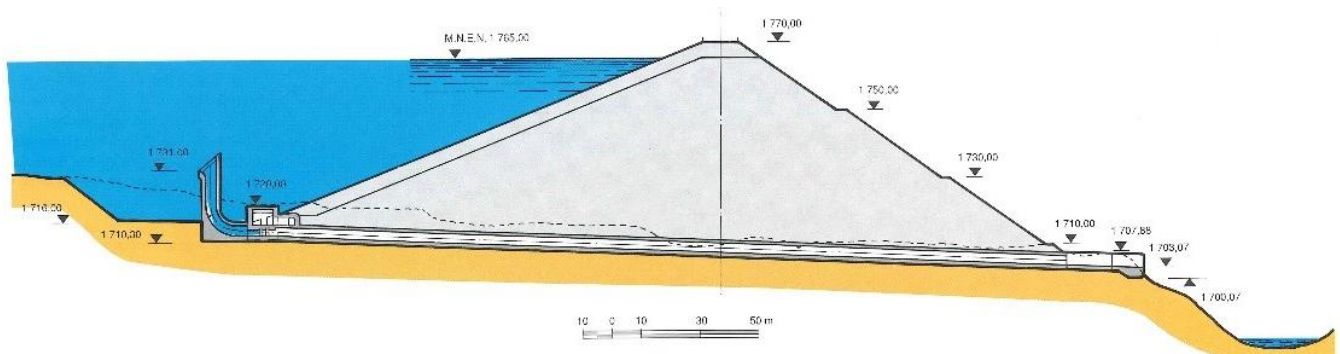
Como se van duplicando todos los elementos de seguridad se dispone también de una **ranura para colocar un escudo frontal**, en caso de que fuera necesario reparar la compuerta de aguas arriba o el mismo conducto. Se pueden disponer de guideras hasta coronación para facilitar la colocación del escudo, este debe ser de acero inoxidable para evitar que se deteriore.

Elementos de Cierre y Control

Las **válvulas** se alojan en una cámara que suele estar situada en el interior del cuerpo de presa.



Desagües de fondo en presa de gravedad. Presa del Judío (España). Gráfico: Ministerio de Transición Ecológica (España)

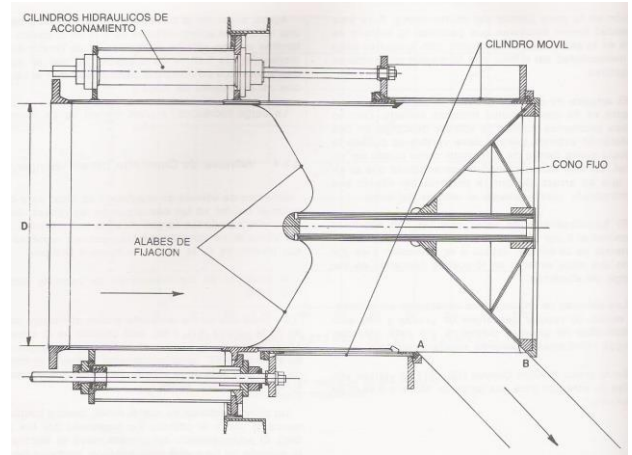


Desagües de fondo en presa de materiales sueltos. Presa de Sallente (España). Gráfico: Ministerio de Transición Ecológica (España)

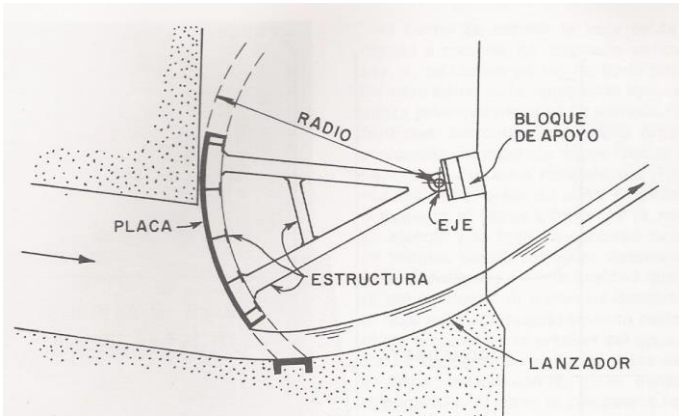
<p>Válvulas Bureau (el USBR recomendó el achaflanado del obturador)</p>	<p>Son compuertas muy seguras, que en general funcionan todo o nada. Son las más utilizadas, aunque hay otras mejores para regular. Se emplean siempre como válvulas de seguridad. Para que no caviten con aperturas parciales se dispone aireación (aducción de aire), conducto hasta coronación o ventosa. Tienen sección rectangular.</p>
<p>Válvulas Howell-Bunger</p>	<p>Válvulas de cono fijo. Se utilizan para regular. Son válvulas que tienen un cono fijo y una camisa (anillo) móvil que se mueve mediante unos émbolos con desplazamiento longitudinal. Son válvulas que se colocan en el exterior del conducto en punta, tienen sección circular.</p>
<p>Compuertas Taintor</p>	<p>En conductos de grandes dimensiones se utilizan también compuertas Taintor. Regularn muy bien, se colocan en el terminal del conducto en presión. Necesitan aireación para la cual se disponen galerías específicas al efecto.</p>



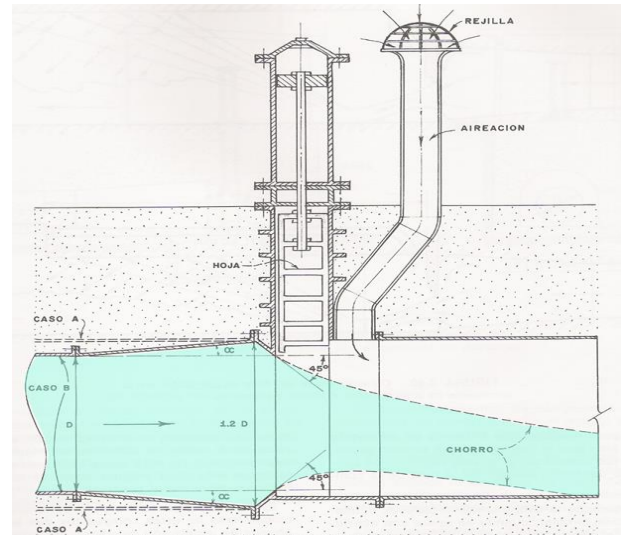
Vista Válvula Howell-Bunger (regulación)



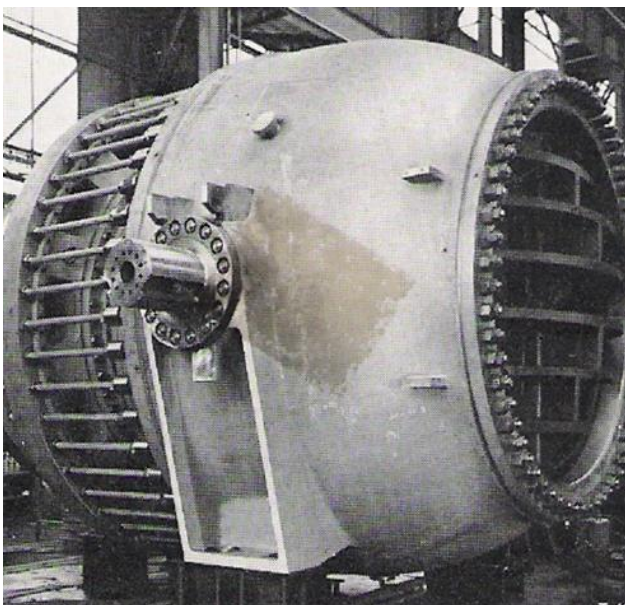
Corte Válvula Howell-Bunger



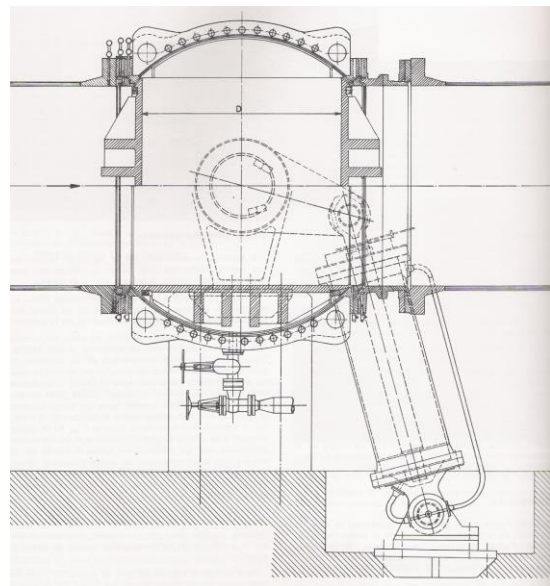
Compuerta Radial (regulación)



Válvula Jet Flow (regulación)



Vista Válvula Esférica (emergencia)



Corte Válvula Esférica

Tal y como se ha indicado, en las presas los **elementos de seguridad están duplicados**. En el desagüe de fondo se disponen al menos dos válvulas de cierre (hoy en día se colocan incluso tres en presas de explotadores importantes).

La válvula de aguas arriba es la **válvula de seguridad**, está siempre abierta y se cierra en caso de que se estropee, pierda la estanqueidad o haya que desmontar la válvula de aguas abajo.

- La válvula de aguas arriba suele ser del **tipo Bureau**.
- Se **maniobra periódicamente**, pero no sufre al abrir y cerrar porque se trabaja con las presiones equilibradas a ambos lados (by-pass).
- El **by-pass** se coloca siempre en las válvulas de aguas arriba, debe disponer a su vez, de las compuertas de cierre (también una de seguridad, la de arriba).
- La válvula de aguas abajo es la **válvula de regulación**, es la que se maniobra de forma habitual para cumplir el cometido del desagüe de fondo.
- La **válvula de regulación**, puede ser del tipo Bureau (en muchas presas), en este caso es muy importante disponer aireación aguas abajo del tablero para evitar las depresiones que se producen.
- Puede ser con una ventosa o mejor con un conducto que se sube hasta coronación de la presa. No se debe economizar en el diseño del conducto de aireación.

$$q_{\text{AIRE}} = 0,03G(F-1)^{1,06}$$

$$F = v/\sqrt{(0,8gh)}$$

La máxima admisión de aire se produce para una apertura en torno a 0,8 h. Para esa apertura se calcula el caudal de aire, con el fin de dimensionar el conducto de aireación.

Veamos el siguiente video

<https://youtu.be/67ocZhqiEnY>

DISIPADORES DE ENERGÍA

Los caudales desviados por un embalse deben ser devueltos al cauce fluvial y esto ocurre en un punto concreto del mismo.

Normalmente, al existir un desnivel entre la obra y el cauce, se produce una importante energía que ha de ser amortiguada o disipada para evitar daños.

Esta energía, en condiciones naturales, se disipa linealmente a lo largo del cauce de manera “natural”, pero al llevarse a cabo desde el embalse, se concentra al final de la estructura, concretamente en los aliviaderos, con un altísimo potencial erosivo.

Es fácil pensar qué si una presa puede generar una importantísima energía hidroeléctrica, si ésta no se aprovecha y no se gestiona adecuadamente, puede originar un efecto devastador, siendo estrictamente necesario bien disiparla o bien, alejarla del pie de presa.

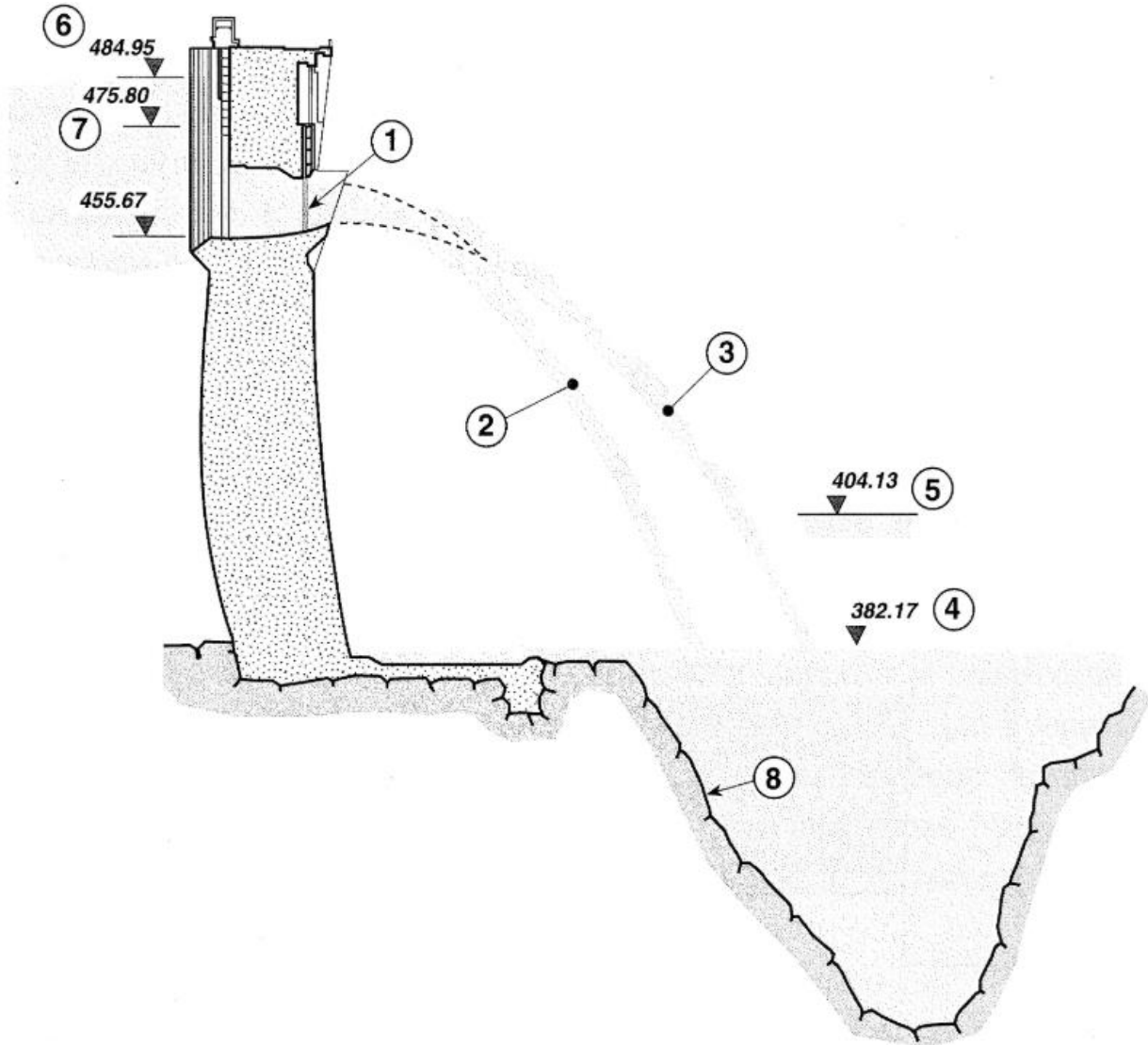
Por tanto, es necesario controlar esta gran cantidad de energía generada para evitar que su capacidad erosiva afecte al cauce natural o las estructuras existentes aguas abajo, y este es el motivo por el que necesitamos estructuras diseñadas para disipar dicha energía.

Cabe decir, en estricto sentido, que no se trata de lograr una disipación total de la energía, sino más bien de buscar que el fluido llegue con condiciones energéticas que impida que provoque efectos perniciosos.



Aliviadero de la Presa Guri, Venezuela

Existen múltiples ejemplos reveladores de la capacidad erosiva del flujo vertido, como el de la presa bóveda de Kariba (de 128 metros de altura y que cierra el embalse de mayor capacidad del mundo) que tiene un cuenco de socavación a pie de presa de más 80 metros de profundidad.



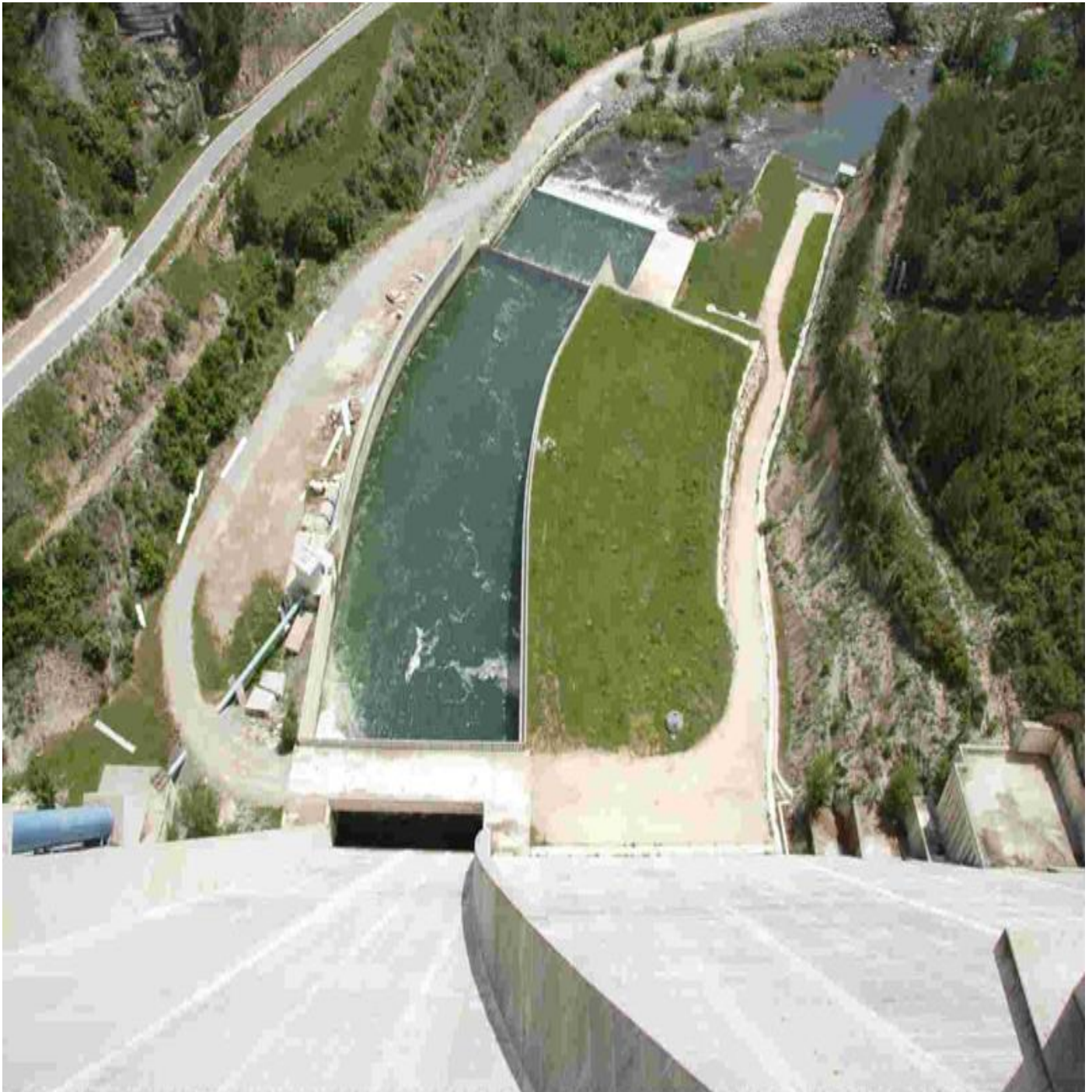
- | | |
|---|--|
| ① SEIS DESAGUES EN CARGA, DE 8.5x9.1 m CADA UNO, CONTROLADOS CON COMPUERTAS WAGÓN | ⑤ NIVEL MAXIMO AGUAS ABAJO, 404.13 (9 267 m ³ /s) |
| ② PERFIL DEL CHORRO CON EL NIVEL DEL EMBALSE A LA COTA 475.80 | ⑥ NIVEL DE EMBALSE NORMAL |
| ③ PERFIL DEL CHORRO CON EL NIVEL DEL EMBALSE A LA COTA 494.90 | ⑦ NIVEL DE EMBALSE MINIMO |
| ④ NIVEL MINIMO AGUAS ABAJO, 382.17 (283 m ³ /s) | ⑧ FOSA DE EROSION |

Presa de Kariba (Zambia/Zimbabue) Gráfico: SPANCOLD. Guía Técnica 5. Aliviaderos y desagües. Cortesía Ing. Alfredo Granados

Existen **numerosos tipos de cuencos** y una gran cantidad de bibliografía, fórmulas y gráficos fácilmente disponibles para cualquier ingeniero que necesite diseñar o dimensionar alguna de estas infraestructuras.

Ante esta problemática, conceptualmente tenemos las siguientes formas de actuar:

a) Empleando estructuras que amortigüen esta energía permitiendo que la corriente pase de un régimen rápido a un régimen lento; es decir, disminuyendo el sumando de velocidad hasta lograr que el fluido pase de un régimen supercrítico a un régimen subcrítico. El ejemplo clásico y más comúnmente usado son los cuencos amortiguadores.



Cuenca amortiguador. Presa de Itioz. España.

b) Mediante la caída libre del fluido aprovechando la resistencia del aire, que disminuye la velocidad y permite disipar la energía, como por ejemplo en el uso de trampolines, en los que se dirige la corriente a una distancia alejada aguas abajo del aliviadero. En este grupo nos encontramos Trampolines sumergidos y trampolines de lanzamiento.



Aliviadero de 3 vanos. Presa de Valdeobispo. España. www.valdeobispo.net

c) Con la combinación de ambos factores.

d) Disipando la energía mediante la dispersión, es decir, rociando el agua en una fina niebla. Un ejemplo común es el uso de las válvulas “Howell-Bunger” que producen un hueco cónico y se emplean habitualmente como elemento de regulación en las presas, generalmente en los desagües de fondo.



Embalse Turimiquire, Venezuela. Válvula superior: Howell - Bunger $D=3\text{m}$ de la descarga de medio fondo.

Válvula inferior: Howell - Bunger $D=0,75\text{m}$ de la descarga de fondo

e) Dirigiendo el flujo para que impacte sobre paredes verticales sólidas diseñadas para tal fin (este caso para caudales pequeños en comparación con los manejados en una presa).

TRAMPOLÍN DE LANZAMIENTO

La **idea del trampolín de lanzamiento** es arrojar el chorro lo más lejos posible del pie de presa. En este caso la condición principal es que el alcance sea suficiente y que la erosión que se pueda producir en el punto de impacto sea moderada y no remonte hacia el pie de presa.

Si se dan las condiciones para disponer de un trampolín se ahorra mucho con respecto al cuenco. Son claramente favorables en presas situadas cuando los caudales a desaguar son moderados (cuencas pequeñas o embalses con mucha capacidad de laminación) y en emplazamientos con geología favorable. Para el cálculo preliminar de la trayectoria de chorro se pueden emplear las fórmulas del tiro parabólico:

$$x = v_0 t \cos \alpha$$

$$y = \frac{1}{2} g t^2 - v_0 t \sin \alpha$$

Siendo el origen de las coordenadas (x, y) el umbral del trampolín y v_0 la velocidad en la salida. Esta última se puede estimar en base a la carga disponible (Z) -que se transforma en energía cinética- menos las pérdidas de que se produzcan en el canal de descarga, de acuerdo con la siguiente expresión:

$$v_0 = K \sqrt{2gZ}$$

El valor del coeficiente k depende de la altura H de caída y del calado vertiente h, cuanto mayor es el calado vertiente mayor es K puesto que se produce menor aireación de la lámina y ésta se frena menos. El alcance máximo teórico se produce para un ángulo $\alpha = 45^\circ$, pero no se disponen salidas tan inclinadas.



Aliviadero con trampolín. Presa de La Baells (España) Fotografía: Alfredo Granados

En la mayor parte de los trampolines se dispone de un umbral de salida dentado, para romper el chorro, que se esparza y se airee. En estas condiciones se disminuye el alcance del chorro, pero la atenuación de la energía que se produce es mayor y merece la pena. Otro efecto que se consigue al partir el choro es aumentar la zona de impacto, de manera que la energía que tiene que absorberse se reparte en un área mayor.

Hay algunos trampolines que se rematan con un cuenco, pero no es una medida más efectiva del dentado y sin embargo es más complicada de construir. En otros casos en remate del trampolín puede tener un fuerte peralte con objeto de voltear la lámina y redirigirla hacia el cauce.

Debe indicarse que para caudales pequeños de agua el flujo no alcanzará velocidad suficiente para despegar y caerá al pie del trampolín, esa zona debe protegerse de la erosión local mediante una pequeña losa o babero o con escollera gruesa.

TRAMPOLÍN SUMERGIDO

El trampolín sumergido (o cuenco cilíndrico) es un trampolín dispuesto a la cota del cauce. No produce un lanzamiento, sino que orienta el flujo a la salida, de tal manera que en aguas abajo se producen remolinos en los que se disipa la energía y cuyo sentido de giro es favorable para no remover o erosionar el material a la salida del cuenco. Sus características básicas son:

- Es una estructura de restitución propia de las presas de gravedad.
- Se utiliza fundamentalmente en presas bajas y azudes de derivación, así como en presas con cimentación profunda en las que el calado en el río puede anegar el resalto hidráulico.
- Se emplea con números de Froude inferiores a 2,5 al pie de la rápida.
-



Esquema de trampolín sumergido Gráfico: SPANCOLD. Guía Técnica 5. Aliviaderos y desagües

Al igual que los cuencos amortiguadores los trampolines sumergidos han sido objeto de amplias campañas de ensayo en laboratorio y hay modelos tipificados por el USBR. Los dos tipos principales se diferencian en función de si el umbral es liso o dentado.

Trampolín sumergido liso	Trampolín sumergido dentado
Es un todo - terreno, funciona bien para caudales grandes y pequeños, se emplea cuando los vertidos vayan a ser irregulares.	Es más eficaz en la disipación de energía, pero su funcionamiento está restringido a un rango determinado de caudales, por lo que se utiliza cuando los caudales vertidos sean muy estables (en ríos muy regulados).

Por tanto, no es objeto del presente tema abordar con detalle las cuestiones de cálculo ni se pretende detallar las infraestructuras empleadas para tal fin, sino más bien **hacer una descripción conceptual ofreciendo simples ejemplos metodológicos y de cálculos** que ilustren al alumno.

Se recomienda al alumno interesado que acceda a la publicación Engineering Monograph No. 25 del Bureau of Reclamation titulada "Hydraulic Design of Stilling Basins and Energy Dissipators" en donde podrá encontrar una excelente y detallada información para el diseño de los cuencos amortiguadores y disipadores de energía más comúnmente empleados.

EL RESALTO HIDRÁULICO

En las estructuras hidráulicas de descarga, especialmente en los aliviaderos, el flujo adquiere paulatinamente mayor velocidad hasta llegar al máximo valor en su punto final o de entrega al cauce fluvial.

Durante el avance del fluido, el sumando de velocidad adquiere un gran protagonismo en detrimento de las fuerzas gravitatorias, incrementándose por tanto el número de Froude y acentuándose el régimen supercrítico de éste.

Si imaginamos como un fluido avanza a través de un aliviadero, la corriente llega con su máxima velocidad (en régimen supercrítico) al punto de entrega, y aquí se produce una elevación brusca del nivel del agua como consecuencia del frenado súbito que sufre el flujo, produciéndose una transición hacia el régimen subcrítico (recordemos con número de Froude menor a 1). Se origina un cambio brusco en el factor dominador del flujo hasta ese momento, el sumando cinético o de velocidad, en favor del sumando gravitatorio.

Recordemos que el número de Froude es uno de los tres números adimensionales de la hidráulica clásica, (junto al de Euler y Reynolds) y que especifica la relación de los efectos de inercia y gravedad y se define como:

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{gL}}$$

Esta transición abrupta en el régimen del fluido, se denomina resalto hidráulico y podemos considerarlo como el medio más útil para disipar el exceso de energía del flujo, obviamente entendiendo que esté debidamente controlado.



Aliviadero de la Presa Guri, Venezuela

Los resaltos son alcances relativamente cortos de flujo rápidamente variado.

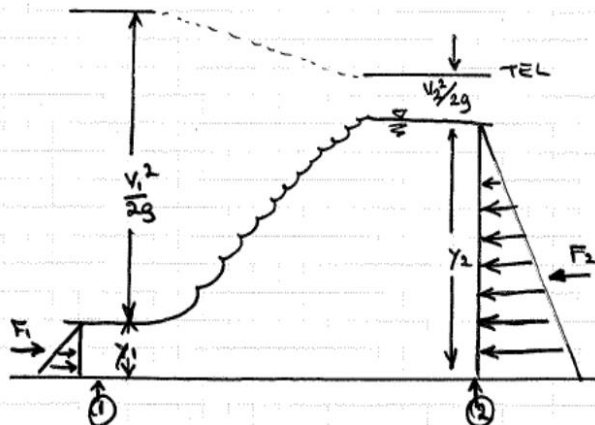
El flujo es rápidamente variado si la profundidad del agua cambia de manera abrupta en tramos cortos, como así ocurre.

En los resaltos hidráulicos, se dan altas turbulencias, chorros de agua a alta velocidad, remolinos y corrientes cruzadas.

Hidráulicamente hablando y en sentido estricto, en estos no se produce conservación de la energía, siendo un fenómeno aislado de gran interés hidráulico.

El fluido en lámina libre llega a este punto en régimen laminar y tras producirse el resalto vuelve al régimen laminar a la salida de éste.

Cuando en un fluido, los filamentos líquidos nos son paralelos, el movimiento se denomina gradualmente variado si la forma de la sección transversal varía poco y progresivamente.



En este caso el eje hidráulico se referencia a tramos elementales sucesivos en los que se consideran formas cilíndricas que describen de forma aproximada a la masa líquida. Cabe decir, que los efectos del rozamiento real en corrientes gradualmente variadas pueden ser calculados aproximándolos a los que tendrían lugar en tramos sucesivos relativamente cortos donde se supone que la corriente es uniforme.

Sin embargo, cuando la forma de la sección cambia bruscamente en una distancia relativamente corta, la corriente se vuelve rápidamente variada, identificándose un fenómeno local, singular en la transición.

En referencia concreta al resalto hidráulico, el rozamiento con la solera no supone normalmente una pérdida significativa y es normalmente omitido en su análisis, en comparación con la pérdida de energía que se produce por efecto de los remolinos y especialmente por el efecto de frenado que produce el denominado “colchón de agua”. En la Figura , vemos como el resalto tiene lugar entre las secciones 1 y 2, definidas por los calados Y_1 e Y_2 , denominados “calados conjugados” En Y_1 el flujo presenta un régimen rápido o supercrítico.

Se produce un régimen de transición al encontrarse la oposición del “colchón de agua”, generándose remolinos como forma principal de disipación de la energía, hasta que, a una cierta longitud, la denominada longitud de resalto, se establece un régimen lento con calado Y_2 .

Es importante reseñar lo siguiente:

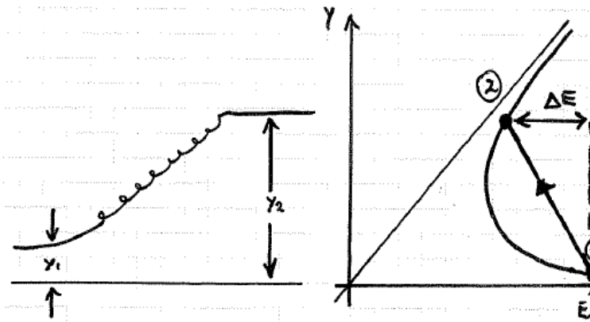
- Para que se produzca el calado conjugado Y_2 , y por ende el resalto, se requiere que el calado en el curso de agua donde se haga la descarga; sea igual o superior a Y_2 . De hecho, la profundidad del cuenco disipador vendrá dada por la diferencia entre los calados del curso de agua y el calado Y_2 . De no ser así, hay que introducir un obstáculo en el flujo que logre la formación de Y_2 .
- Por el motivo anterior, es frecuente cometer el error de asumir que la altura conjugada Y_2 se forma automáticamente. La misma y por ende el resalto, se formará si el nivel del río agua abajo es igual o superior a Y_2 .
- Por este error, hay muchos cuencos de aliviaderos y de obras de derivación que se ven afectados por erosiones en su salida y eventual colapso.

Esta es la transición entre el régimen supercrítico a subcrítico, ya comentada.



Ensayo en laboratorio. Resalto tras paso del fluido por vertedero contraído. Tesina Antonio R Morales.

Los calados conjugados a uno y otro lado del resalto pueden ser determinados representando gráficamente la relación entre la Energía Específica E y el calado Y . La superposición en un mismo gráfico de ambos ilustra la caída de energía ΔE que se produce. (Ver Figura).



Un resalto estable, sólo puede tener lugar desde un calado deprimido a su conjugado; es decir, el primero será inferior al calado crítico y éste a su vez al segundo, de acuerdo con el sistema de ecuaciones propuesto por Belanger:

$$y_2 = \frac{y_1}{2} \left(\sqrt{1 + 8F_1^2} - 1 \right)$$

$$y_1 = \frac{y_2}{2} \left(\sqrt{1 + 8F_2^2} - 1 \right)$$

$$\Delta E = \left(y_1 + \frac{V_1^2}{2g} \right) - \left(y_2 + \frac{V_2^2}{2g} \right)$$

$$\Delta E = \frac{1}{4y_1 y_2} (y_2 - y_1)^3$$

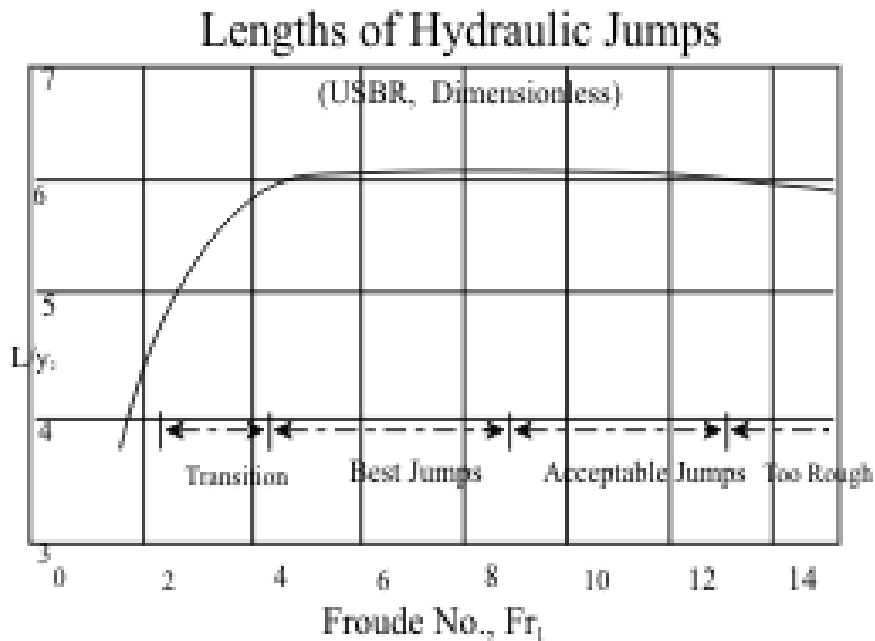
La caída de energía específica ΔE , se produce fundamentalmente por la formación de remolinos, de una manera más sutil por el rozamiento del fluido con la solera y en mucha menor medida por el incremento de temperatura del fluido.

En particular, cuando el Número de Froude Fr es muy grande, la pérdida de carga puede representar un alto porcentaje de la energía inicial y por este motivo se emplean los resaltos para disipar energía en aliviaderos.

Geoméricamente, podemos decir que la altura del resalto “ Y_2 ” es la diferencia entre los calados Y_1 e Y_2 y la longitud de resalto “ L ”, es aquella en la que se obtiene el calado Y_2 . En otras palabras, es longitud que existe desde Y_1 hasta que la zona de agitación acaba.

No obstante, esta longitud del resalto que es función de Fr es también muy corta en comparación con las correspondientes a los largos tramos de movimiento gradualmente variado.

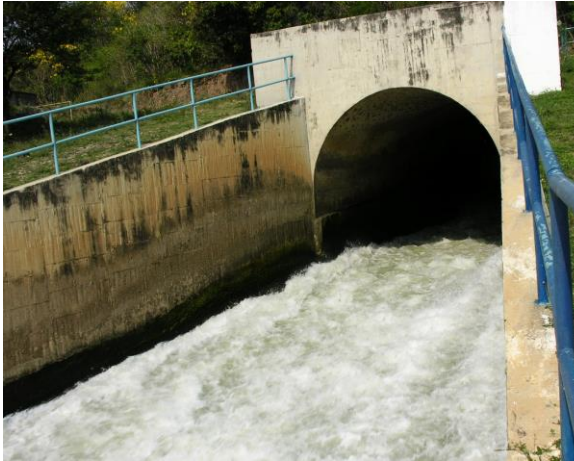
En la Figura siguiente, podemos observar la relación directa que existe entre la longitud del resalto y Fr , para el caso de un cuenco amortiguador horizontal y sin obstáculos, según la cual:



1. El rango de valores del número de Froude entre 4,5 y 14, ofrece los resaltos hidráulicos más estables, siendo concretamente los valores entre 4,5 y 8 los que generan los “mejores resaltos”.
2. El rango de valores del número de Froude entre 1 (Régimen crítico y punto de valor más bajo de la energía específica del fluido) y 3,5, presenta un estado de transición en el resalto.
3. Cuando el número de Froude es muy grande, la pérdida de carga puede representar un alto porcentaje de la energía inicial y los resaltos deben ser controlados adecuadamente.



Resalto en el dissipador de energía del aliviadero de la Presa Socuy, Venezuela.



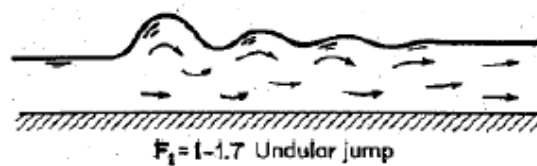
Rápida en la salida del túnel de toma y Resalto en el dissipador de energía de la toma de la Presa Agua Viva, Venezuela

Formas del Resalto según Número de Froude, Fr .

Salto "Ondular"

En la superficie del agua del fluido se aprecian ondulaciones y por este motivo es llamado "resalto ondular" "undular jump".

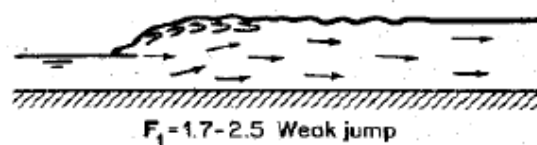
No se necesitaría realmente estructura disipadora o cuenco de amortiguación.



Salto "débil"

Es un pequeño resalto controlable que requiera tan sólo de la suficiente longitud, no muy grande, para contenerlo.

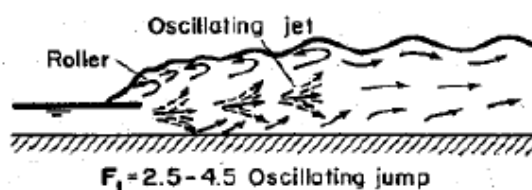
En este caso aparecen series de pequeños "rodillos" que se desarrollan en el resalto, pero sin afectar a aguas arriba.



No requiere de precauciones especiales.

Salto "oscilante"

Este es un caso especialmente complejo porque se produce un resalto de transición, con pulsaciones no periódicas que hacen que el resalto no sea estable y se transmita hacia aguas abajo, no logrando el objetivo e incluso agravando más su potencial erosivo.



Se produce un efecto de chorro oscilante, que ingresa al salto de abajo a arriba y de adelante hacia atrás; lo que origina olas con períodos irregulares.

Este tipo de salto es el más común en estructuras de irrigación, canales o presas bajas y las olas son capaces de viajar durante kilómetros aguas abajo dañando las márgenes, taludes e incluso a las escolleras de protección.

Es recomendable, por tanto, evitar este resalto por las razones expuestas. Si las características de la presa o del cauce lo permiten, se debe intentar que el Número de Froude Fr variando, por ejemplo, las dimensiones del aliviadero. En este tipo de saltos tampoco ayudan los cuencos USBR o dentados.

Salto "estable"

El resalto comprendido en estos valores se considera bastante estable y está muy poco afectado por la altura del resalto Y_2 .

Este es un dato positivo a tener en cuenta porque da margen para posibles imprevistos y contribuye a dar mayor estabilidad.



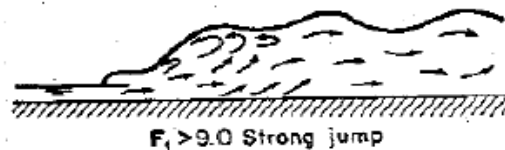
Podemos decir que el resalto está bien definido y coincide la longitud del rodillo con el resalto. En otras palabras, el tramo más aguas abajo del rodillo y el punto en el que el chorro de mayor velocidad tiende a dejar el flujo se sucede prácticamente en la misma sección vertical.

Por tanto, el efecto y la posición del chorro es menos sensible a las variaciones del calado del resalto. El resultado de este salto es muy estable, logrando valores de disipación de energía en un rango entre el 40 y el 70%.

Si Fr se aproxima a 8, como consejo es conveniente disponer de una altura del colchón del cuenco mayor a Y_2 , dado que como ocurre en el caso siguiente, el resalto empieza a verse afectado por la condición del calado o de la profundidad del flujo aguas abajo.

Salto "Brusco"

Este caso es similar al anterior, pero el resalto es ligeramente más brusco y con mayor afectación debida a la velocidad del flujo (Froude Fr mayor)



Esta alta velocidad, provoca una superficie de mayor rugosidad y oleaje aguas abajo, que le confiere esta mayor brusquedad al fluido

Sin embargo y aun con estas consideraciones, podemos considerarlo un resalto también efectivo.

CUENCOS DE AMORTIGUACIÓN

El resalto hidráulico suele confinarse total o parcialmente en estructuras denominadas “cuencos de amortiguación”.

Los cuencos amortiguadores son las estructuras más clásicas de disipación de energía.

Las dimensiones deben ser calculadas con detalle para albergar dicho resalto, a fin de definir las zonas revestimiento y las protecciones necesarias para hacer frente al mismo.

No se trata de proteger todo el cuenco, puesto que el revestimiento de soleras o la incorporación de elementos de protección pueden encarecer notablemente la estructura y por tanto de ahí la importancia de dimensionarlo adecuadamente.

Es común incorporar accesorios disipadores de energía para producir una intersección del flujo con estos elementos, a fin de aumentar la turbulencia y fundamentalmente de disminuir la velocidad del fluido como reducción de la energía cinética.

Existen diferentes tipos de cuencos de disipación o de amortiguación, en base al *Bureau of Reclamation* y que pueden sintetizarse en:

1. Cuenco Simple o Cuenco tipo I, sin dientes:



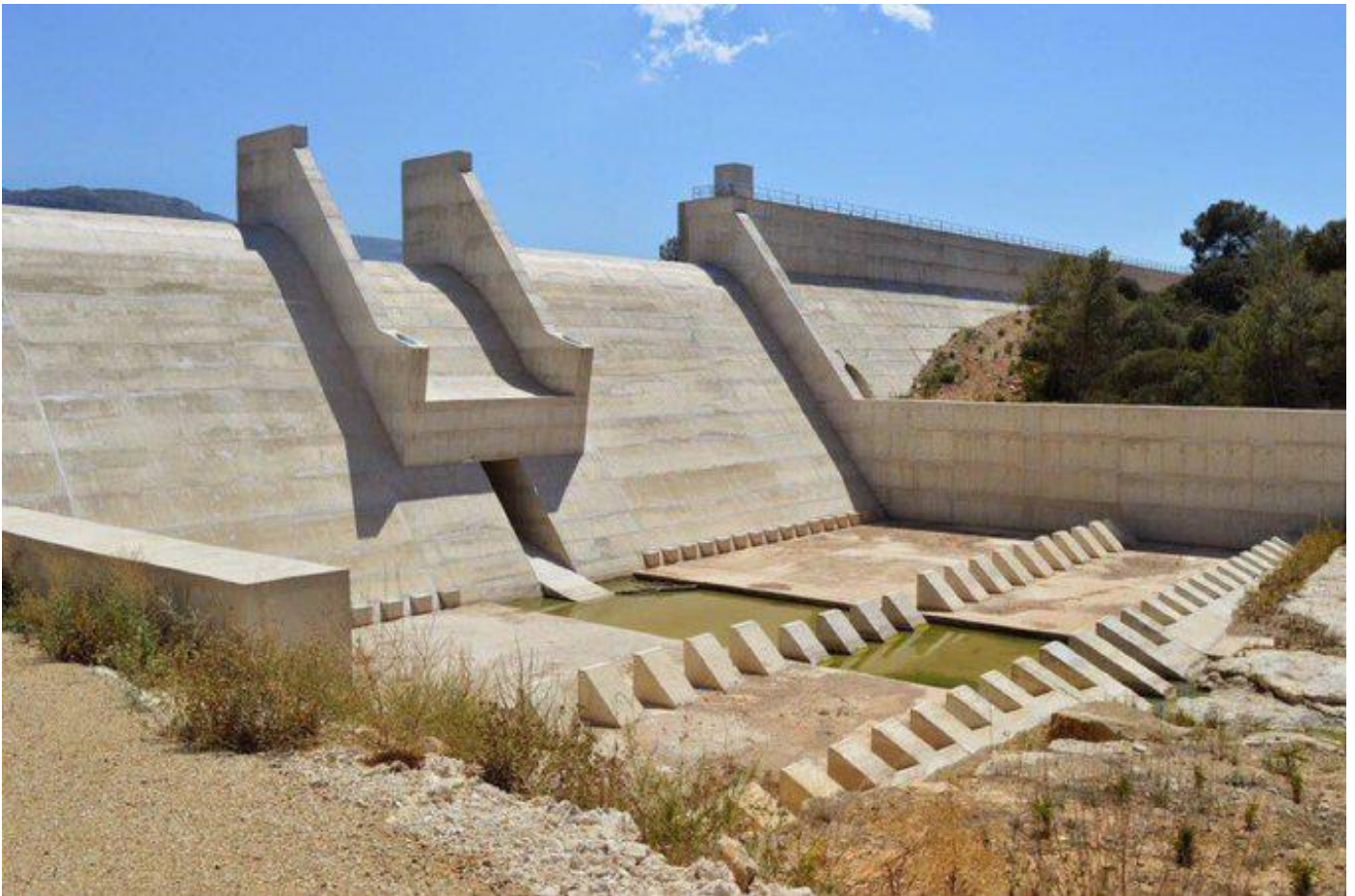
Izquierda: Resalto en el dissipador de energía del aliviadero de la Presa Ajuan Khota, Bolivia.



Derecha: Resalto en el dissipador de energía del aliviadero de la Presa Clavellinos, Venezuela.

2. Cuenco Tipo II o USBR Tipo II, con dientes situados en forma de dos hileras: al pie de la presa y a la salida del cuenco.

3. Cuenco Tipo III o USBR Tipo III, con dientes situados en forma de dos hileras: al pie de la presa y en el interior (centrado) del cuenco, con una rampa de salida al final del éste.

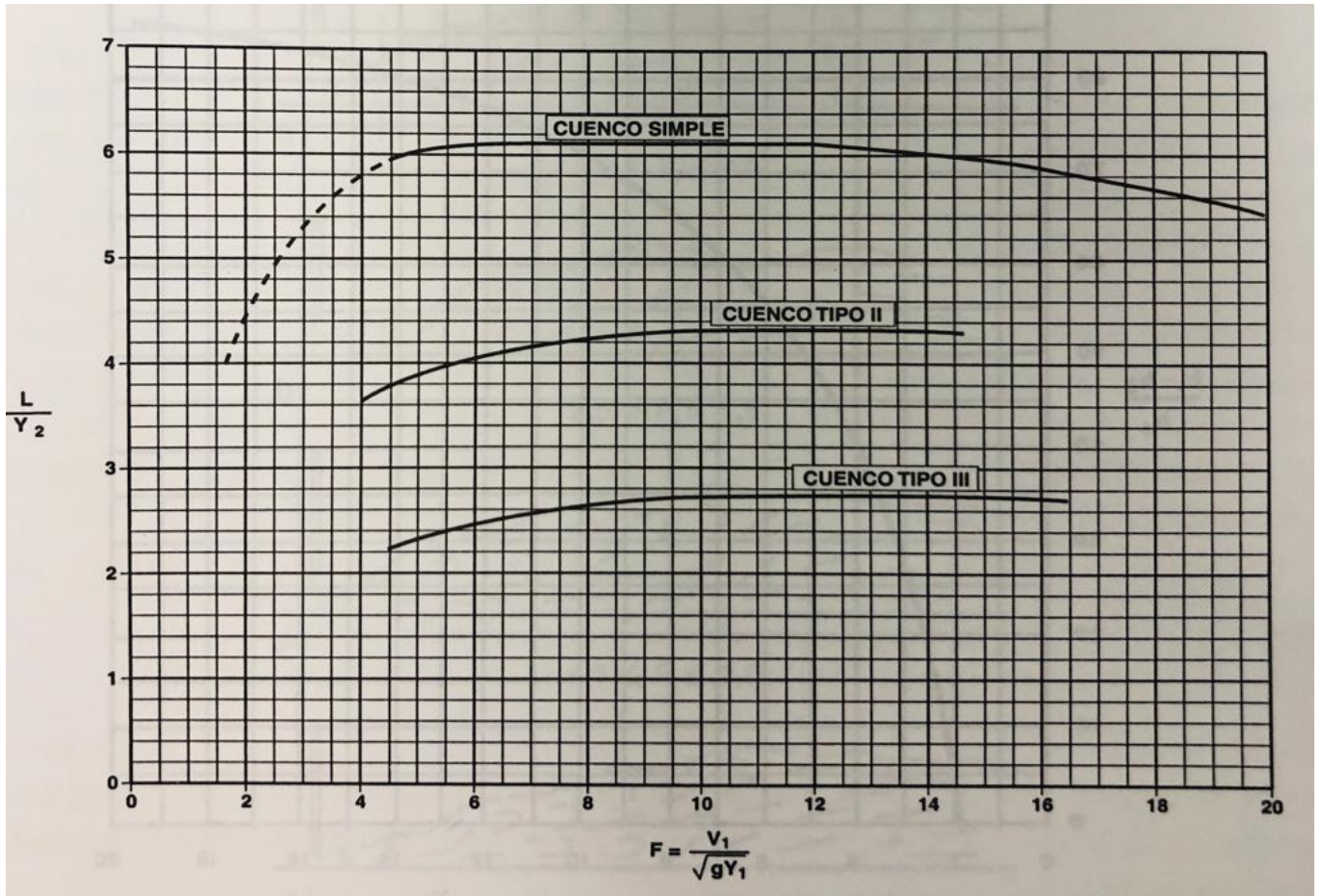


Presa Terrateig, Valencia, España. Aliviaderos, descarga y disipadores de energía.

Existen más tipos de cuencos, que pueden ser considerados como combinaciones de los anteriores.

En el Gráfico de Ensayos del Bureau of Reclamation se muestra la relación entre la longitud del resalto L y el calado Y_2 ; con el Número de Froude. Observando el mismo, podemos extraer las siguientes conclusiones:

1. En el caso de cuencos simples y para un rango del número de Froude entre 4,5 y 14, el valor entre la longitud del resalto L y el calado Y_2 es aproximadamente 6. Por este motivo, suele aplicarse nemotécnicamente, que la longitud del resalto es 6 veces mayor el calado o altura de éste.
2. En el caso de Cuencos USBR II, para un rango del número de Froude de entre 6 y 16, la relación entre la longitud del resalto L y el calado Y_2 está entre 4 y 4,5. Por tanto, en estos casos, la longitud del resalto es menor que en el caso anterior y suele tener un valor de 4 a 4,5 veces mayor que el calado.
3. En el caso de USBR III, para el rango 8-16, la relación es aún más baja y se cifra entre en un intervalo de 2,6 a 2,8.



Igualmente es importante comentar lo siguiente:

1. Los cuencos con dientes o tacos de hormigón, son recomendados cuando se trabaja con aguas relativamente limpias, como es el caso de los embalses profundos y/o grandes.
2. Para cuencos de embalses muy pequeños o de obras de derivación en ríos con gran arrastre de sedimentos, los dientes o tacos tienen corta duración debido al proceso de abrasión de producen los flujos con alta carga de sedimentos.

Se recomiendan los siguientes videos:

La disipación de energía hidráulica: https://youtu.be/l_Oec-fpUxo

El resalto hidráulico: <https://youtu.be/cMWyytWZrgc>

Formas del Resalto según Número de Froude, Fr.: <https://youtu.be/9wBKuOH6ZJo>

Tipos de resaltos en función de la altura de resalto: <https://youtu.be/zGVqcTI1Cdk>

Los cuencos de amortiguación: <https://youtu.be/89gRKSJKYPg>

CASA DE MÁQUINAS, CENTRAL O SALA DE TURBINAS

En la Casa de Máquinas, denominada también Sala de Turbinas o Central, se encuentran los grupos hidro-electro-mecánicos para la producción de la energía eléctrica - conjunto turbina- generador, así como los elementos de regulación, funcionamiento y control. El agua proveniente del Embalse o derivación de un Azud transfiere su energía hidráulica a las turbinas que impulsan los generadores eléctricos.



Las compuertas de aislamiento ubicadas a la entrada y salida se emplean para poder dejar estanca la zona de las máquinas en caso de reparación o desmontaje. Según la disposición general de la casa de máquinas, las centrales se pueden clasificar en: Centrales al Exterior, que pueden ser a Pie de presa o alejadas de la misma, y Centrales Subterráneas o en Caverna.

ESTACIÓN TRANSFORMADORA Y PLAYA DE MANIOBRAS

Esta obra se encarga de convertir la corriente de baja tensión en una corriente de alta tensión en los transformadores, de este modo, se pierde menos energía en su transporte.

El transformador es una máquina eléctrica que permite aumentar o disminuir la tensión en un circuito eléctrico de corriente alterna, manteniendo la potencia. La potencia que ingresa al equipo, en el caso de un transformador ideal (esto es, sin pérdidas), es igual a la que se obtiene a la salida. Las máquinas reales presentan un pequeño porcentaje de pérdidas, dependiendo de su diseño y tamaño, entre otros factores.

El transformador es un dispositivo que convierte la energía eléctrica alterna de un cierto nivel de tensión, en energía alterna de otro nivel de tensión, basándose en el fenómeno de la inducción electromagnética. Está constituido por dos bobinas de material conductor, devanadas sobre un núcleo cerrado de material ferromagnético, pero aisladas entre sí eléctricamente. La única conexión entre las bobinas la constituye el flujo magnético común que se establece en el núcleo. El núcleo, generalmente, es fabricado bien sea de hierro o de láminas apiladas de acero eléctrico, aleación apropiada para optimizar el flujo magnético. Las bobinas o devanados se denominan primario y secundario según correspondan a la entrada o salida del sistema en cuestión, respectivamente.

La Estación Transformadora se conecta con la Playa de Maniobras desde donde se operan los cierres y aperturas de las distintas líneas de Transmisión.



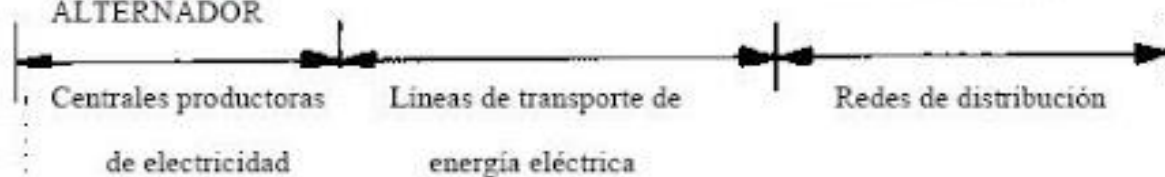
LÍNEAS DE TRANSPORTE DE ENERGÍA ELÉCTRICA

La electricidad producida se transporta por Líneas de Alta Tensión a las Estaciones de Rebaje y Distribución, donde se reduce la tensión mediante otros transformadores hasta niveles adecuados para los usuarios. Las líneas primarias pueden transmitir electricidad con tensiones de hasta 500.000 voltios o más. Las líneas secundarias que van a las viviendas tienen tensiones de 220 y 110 voltios.

CENTRAL HIDROELÉCTRICA



CENTRAL TÉRMICA





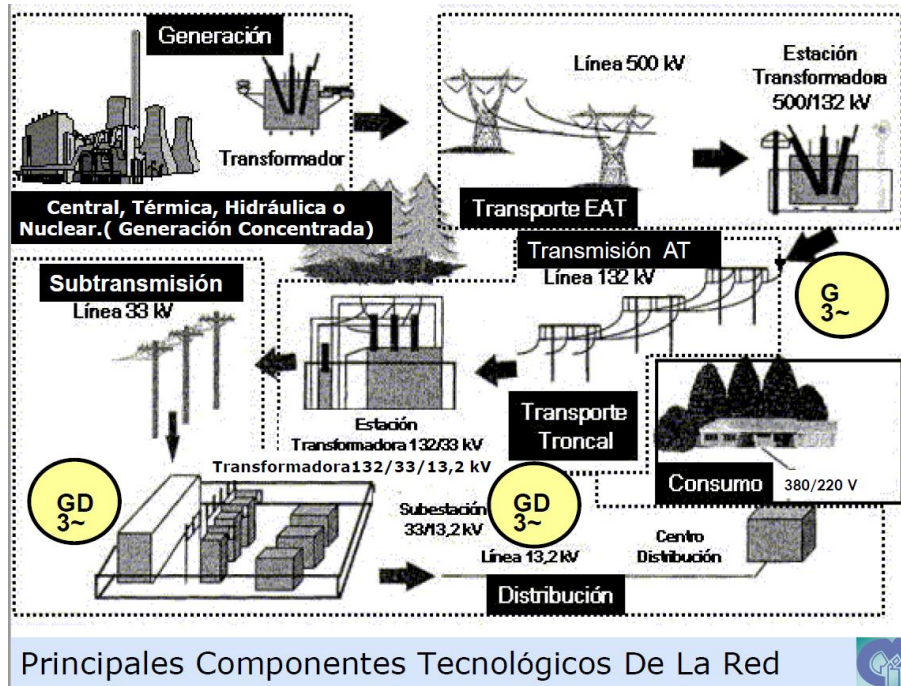


Fig. 1: Esquema Del SIP de la provincia de Misiones.

COMPILADO DE:

- Clases de Hidráulica Aplicada - FI – UnaM
- “Clases de Maquinas Hidráulicas y Aprovechamiento Hidroeléctrico” - Roberto Cotta - CEILP
- “Diseño, Explotación y Seguridad de Presas y Embalses” - MOOC - CAF - Spancold - UPV
- “Presas y Embalses para Todos” - MOOC - UPM