

## Capítulo 14

---

# Información inicial y criterios principales para el cálculo hidráulico del tramo aguas abajo

### 14.1. Aspectos generales

Las estructuras del tramo aguas abajo para el caso de enlace continuo de la superficie de vertido de la presa con el fondo aguas abajo es necesario diseñarlas de tal manera que para las condiciones menos favorables el resalto hidráulico sea sumergido.

#### *14.1.1. Resalto hidráulico sumergido*

Como se conoce de hidráulica aplicada, en caso de que el nivel de agua en el tramo aguas abajo por una u otra causa se eleve, el rodillo o vórtice del resalto hidráulico empieza a sumergir o cubrir a la lámina descendente de agua y de esta manera como resultado se presenta el denominado resalto sumergido, que se caracteriza por la presencia de un vórtice superficial limitado desde arriba por la superficie *abc* (Figura 14.1) y desde abajo por una lámina de agua de ensanchamiento brusco.

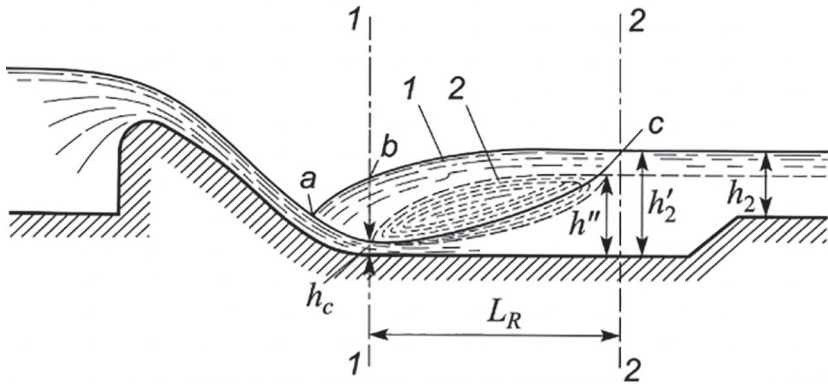


Figura 14.1. Resalto al pie de una presa

1- resalto sumergido; 2- resalto a partir de la sección contraída 1-1.

Fuente: Chugaev, R. R. (1985). Construcciones hidráulicas: presas con vertido incorporado. AGRO-PROMIZDAT.

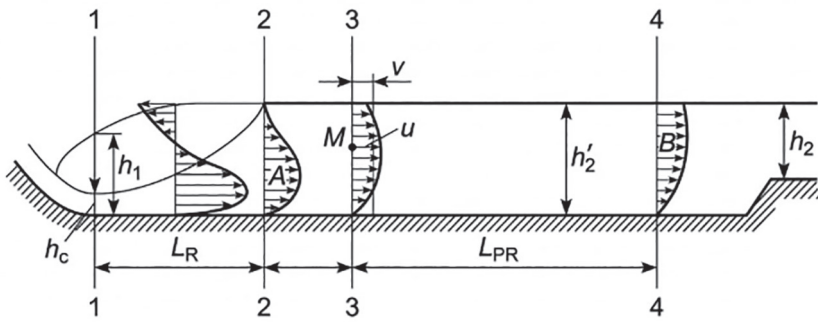


Figura 14.2. Reconformación del diagrama de velocidades a lo largo del tramo pos-resalto.

Fuente: Chugaev, R. R. (1985). Construcciones hidráulicas: presas con vertido incorporado. AGRO-PROMIZDAT.

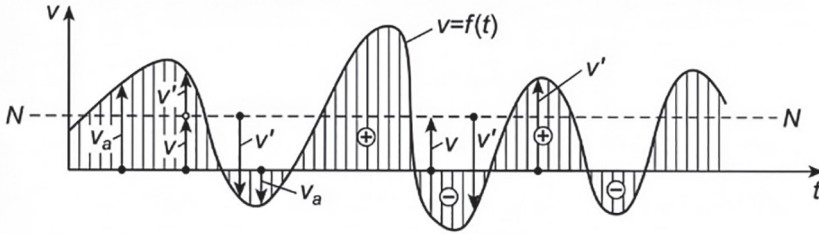


Figura 14.3. Esquema del gráfico de oscilación de la velocidad longitudinal real en un punto fijo dado M en el espacio del campo de flujo (mecánica de fluidos).

Fuente: Chugaev, R. R. (1985). Construcciones hidráulicas: presas con vertido incorporado. AGRO-PROMIZDAT.

A continuación, se identifica con el símbolo  $h_c$  la profundidad del agua en la sección contraída (para el caso cuando el resalto inicia en la sección contraída); a través de  $h''$  la profundidad conjugada (segunda profundidad conjugada) con la profundidad  $h_c$ ; a través de  $h_2$  la profundidad que se establece en el cauce inmediatamente después del resalto sumergido.

Como se conoce de hidráulica aplicada, la relación  $A = \frac{h_2}{h''}$  se denomina grado de sumersión del resalto; la longitud  $l_R$ , medida en horizontal desde la sección 1-1, donde se tiene la profundidad  $h_c$ , hasta la sección 2-2 ubicada al final del vórtice superficial, convencionalmente se denomina longitud del resalto hidráulico; la relación  $\frac{\eta=h_2}{h_c}$  puede ser denominada coeficiente de ensanchamiento vertical de la lámina de agua.

El valor mínimo permisible del grado de sumersión del resalto  $A_{min}$  debe obtenerse para las condiciones menos favorables del enlace de tramos. La práctica demuestra que cuando  $A \approx 1$ , el vórtice superior del resalto toma una ubicación claramente inestable: realiza movimientos permanentes sea a la izquierda o sea a la derecha y en consecuencia la losa de disipación soporta carga variable. Tomando en cuenta esta situación, así como también que el valor de  $A$  no es favorable aumentar (por consideraciones económicas), se considera como valor mínimo permisible de  $A$  la magnitud  $A_{min,per} = 1,05$  a  $1,2$ . Precisamente para este valor

(aproximadamente  $A = 1,3$ ) se calcula el resalto para adoptar la cota de la superficie de la losa de disipación.

La longitud del resalto hidráulico sumergido se puede determinar con una de las ecuaciones validadas en la práctica y recomendadas en hidráulica aplicada o también con las relaciones  $l_R = 6(h_2 - h_c)$  y  $l_R = (5,2 \text{ a } 5,5)h_2$ , dónde el menor valor del coeficiente dentro del último paréntesis se adopta cuando  $\eta < 8$  y el mayor cuando  $\eta \geq 8$ .

#### 14.1.2. Tramo postresalto

Como se conoce de hidráulica aplicada, para el cálculo del flujo turbulento generalmente se opera con las velocidades longitudinales promediadas en el tiempo en diferentes puntos del flujo. En la Figura 14.2 se muestran los diagramas de dichas velocidades longitudinales en diferentes secciones verticales. La velocidad longitudinal promediada en el tiempo en un punto fijo  $M$  del espacio en el campo de flujo puede ser interpretada con ayuda del gráfico de oscilación de las velocidades longitudinales reales (actuales)  $v$  variables en el tiempo. Como se puede apreciar en el gráfico (Figura 14.3)  $v = v_a - v'$ , donde  $v'$  es la velocidad longitudinal oscilatoria que puede adquirir valor tanto positivo como negativo.

En caso de que en el punto dado  $M$  no hubiera la oscilación de la velocidad, se tendría  $v' = 0$  y  $v = v_a$ ; entonces la energía cinética específica (ECE) en el punto considerado sería igual a  $ECE'_{v' \neq 0} = \frac{v^2}{(2g)}$ . En presencia de oscilación de la velocidad en el punto  $M$  la energía cinética específica resulta ser igual a:

$$ECE'_{v' \neq 0} = \alpha_T \frac{v^2}{(2g)} \quad (13.1)$$

Donde:

$\alpha_T$ : coeficiente que considera la intensidad de la turbulencia (intensidad de la oscilación) en el punto dado,  $\alpha_T > 1$ .

Tomando en cuenta lo señalado, la energía cinética específica *promediada en una sección de flujo dada* puede ser presentada de la siguiente manera:

$$ECE = \alpha_c \frac{v^2}{(2g)} \quad (13.2)$$

Donde:

$v$ : velocidad media en la sección de flujo considerada.

$\alpha_c$ : corrector generalizado que considera dos factores diferentes: la no uniformidad de la distribución de velocidades  $v$  en la sección de flujo y la intensidad de la oscilación de velocidades reales (actuales)  $v_a$  en los diferentes puntos de la sección de flujo,  $\alpha_c = \alpha + \alpha_c + \alpha_T$ .

El valor de  $\alpha_c$  varía a lo largo del tramo postresalto, por lo que para las mismas velocidades medias  $v$  en diferentes secciones de flujo el tramo postresalto se obtiene diferente energía cinética.

El resalto hidráulico modifica fuertemente la estructura del flujo ubicado a continuación, como consecuencia de este hecho un tramo postresalto caracterizado por determinada velocidad media resulta ser, por el carácter del movimiento del agua, fuertemente diferente al del flujo uniforme caracterizado por la misma velocidad media.

Inmediatamente luego del resalto en la sección 2-2 (Figura 14.2) se presenta lo siguiente:

- El diagrama *A* de velocidades promediadas se diferencia fuertemente en su forma del diagrama *B* propio del flujo uniforme (ver la sección 4-4); el diagrama *A* se caracteriza por tener velocidades de fondo altas, por lo que para iguales velocidades medias la capacidad erosiva del flujo en la sección 2-2 es considerablemente mayor que, por ejemplo, en la sección 4-4 donde se tiene flujo uniforme.

- La intensidad de la turbulencia en la sección 2-2 será fuertemente incrementada, debido a lo que el coeficiente  $\alpha_T$  y por consiguiente el coeficiente  $\alpha_C$  para una sección dada será especialmente alto; por esta razón la capacidad erosiva en la sección 2-2 se incrementa aún más.
- La oscilación de la presión tanto en todo el espesor del flujo como en la superficie del fondo también crece fuertemente en la sección 2-2 lo que determina a su vez la oscilación de la superficie libre del flujo.

Las perturbaciones identificadas causadas en la sección 2-2 por el resalto hidráulico gradualmente disminuyen y al final del tramo postresalto se obtiene: el diagrama de velocidades promediadas, la oscilación de velocidades y la oscilación de presiones propias del flujo uniforme. El valor del coeficiente  $\alpha_C$  a lo largo del tramo postresalto gradualmente disminuye entre 1,0 y 1,1. Únicamente luego de la sección 4-4 es posible utilizar las velocidades máximas permisibles (no erosivas) por cuanto estas están referidas únicamente al caso del flujo uniforme.

La longitud del tramo postresalto se adopta de conformidad con los criterios formulados en hidráulica aplicada. También pueden ser utilizadas las siguientes relaciones:  $l_{PR} = (13 \text{ a } 28) h_2$ ;  $l_{PR} = (13 \text{ a } 15,6) h_2$ .

En la Figura 14.4 se presenta un gráfico referencial que evidencia un cuadro cualitativo de la disipación de la energía excedente en los diferentes tramos de un flujo de enlace de tramos. El gráfico muestra cómo a lo largo del flujo varía la energía cinética específica. Luego del resalto queda la energía cinética específica  $\delta(EC)$ . Esta magnitud es pequeña en comparación con la energía disipada hasta la sección 2-2; sin embargo, al mismo tiempo  $\delta(EC)$  es alta en comparación con la energía cinética específica aguas abajo igual a  $\frac{\alpha v^2}{(2g)}$ . Por esta razón, la longitud del tramo postresalto en cuyo trayecto se disipa la energía  $\delta(EC)$  resulta ser relativamente grande.

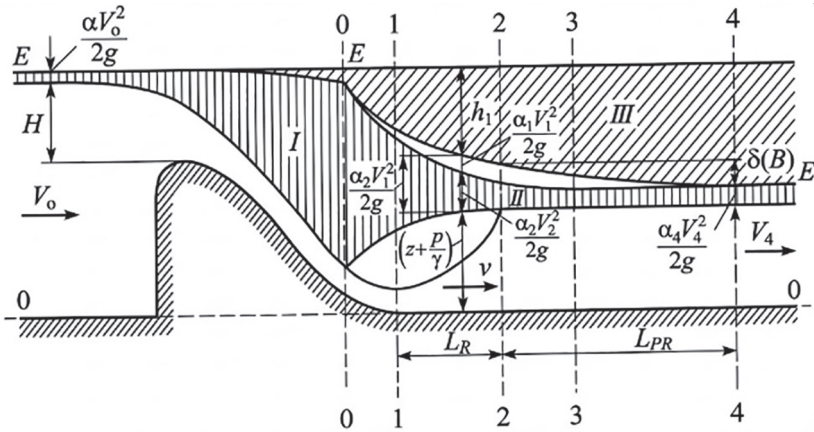


Figura 14.4. Cuadro cualitativo de disipación de la energía excedente en los diferentes tramos de un flujo al pie de una presa vertedero.

I- diagrama de la energía cinética obtenida de la consideración solo de las velocidades promediadas (tomando en cuenta su distribución no uniforme en las secciones de flujo); II- diagrama de la energía cinética complementaria originada en el aumento de la oscilación de las velocidades; III- diagrama de pérdida de carga.

Fuente: Chugaev, R. R. (1985). Construcciones hidráulicas: presas con vertido incorporado. AGRO-PROMIZDAT.

## 14.2. Datos iniciales, principales parámetros y dimensiones de los elementos del tramo aguas abajo

Las condiciones de operación del tramo aguas abajo son bastante complejas: a) la magnitud del caudal unitario  $q$  puede variar a lo largo del frente de la presa vertedero (debido a las diferentes aperturas de los orificios), así como también en el tiempo; b) también son diferentes en el tiempo los caudales del agua evacuada a través de los desagües de operación (obras de captación); c) la evacuación del agua hacia el tramo aguas abajo puede ser realizada con diferentes niveles agua arriba  $\nabla_{NAAR}$ ; d) en el tramo aguas abajo el movimiento del agua puede ser no estacionario durante el cual en dicho tramo puede haber acumulación o vaciado.

Resulta complicado cubrir a través de los cálculos todo el conjunto multifacético de posibles casos de operación del tramo de aguas

abajo. Para definir las dimensiones de los elementos constructivos de dicho tramo es común considerar preliminarmente las circunstancias referidas en el párrafo anterior en dos escenarios de diseño: básico y de verificación (ver apartado 13.4).

Para cumplir el análisis hidráulico del tramo aguas abajo deben estar dados:

- Las cotas aguas arriba del nivel normal de operación (NNO) y del nivel forzado (NF) para la evacuación de crecida de diseño.
- El frente de vertido de la presa.
- Los caudales de diseño de las diferentes obras de desagüe (de operación y de servicio).
- El caudal natural máximo en el sitio del cauce a ser intervenido.
- Las curvas de descarga de los caudales y niveles aguas abajo en las condiciones naturales del río.
- Las características constructivas de las compuertas en los orificios de vertido de la presa.
- Las condiciones de evacuación de los objetos flotantes hacia aguas abajo.
- La información sobre el macizo de cimentación.

Al considerar los escenarios de diseño mencionados anteriormente y con ayuda de los cálculos hidráulicos, se determinan (en primera aproximación) las dimensiones del tramo aguas abajo o de los parámetros que influyen en la operación de dicho tramo:

- Cota de la superficie de la losa de disipación.
- Longitud de la losa de disipación.
- Longitud del tramo postresalto.
- Profundidad del cono de erosión al final del tramo postresalto, del déficit de la presión actuante en la losa de protección, para el diseño de esta.
- El tamaño de la piedra de protección que forma parte del tramo postresalto.

- La profundidad del pozo de disipación o la altura del muro de disipación.
- Las fuerzas actuantes en los disipadores especiales de energía.

En el caso de estructuras suficientemente importantes los resultados obtenidos con ayuda de los cálculos teóricos siempre deben ser sometidos a ajuste sobre la base de las correspondientes investigaciones experimentales en modelos de laboratorio.

### **14.3. Particularidades del movimiento del agua en el tramo aguas abajo**

#### ***14.3.1. Condiciones tridimensionales del movimiento del agua en el tramo aguas abajo***

El ancho del cauce natural en el tramo aguas abajo generalmente es mayor al ancho del frente de vertido. Esta situación determina un escenario tridimensional del movimiento del agua en dicho tramo. Una particularidad de las condiciones espaciales del movimiento del agua constituye el hecho de que dentro de los límites del tramo aguas abajo se presentan pendientes transversales de la superficie libre las mismas que originan corrientes transversales de agua. A continuación del orificio que evacua el mayor caudal unitario se establece el más bajo nivel del agua en el tramo aguas abajo. Por esta razón las corrientes transversales de agua en el campo del tramo aguas abajo están dirigidas hacia aquellos sitios donde se tiene mayores caudales. Como resultado, el caudal de las corrientes relativamente potentes que salen del orificio se incrementa a lo largo del flujo. Se encuentran también otros casos del movimiento tridimensional del agua cuando el caudal unitario de las corrientes relativamente potentes disminuye a lo largo del flujo.

Es necesario distinguir dos tipos de alteración: distorsión del eje del flujo (en planta) y alteración del caudal. Cuando el valor del caudal unitario  $q$  se incrementa a lo largo del eje del flujo (debido a la entrada del agua desde los costados), el eje mismo del flujo (en planta) podría no modificarse.

14.3.1.1. Casos cuando los caudales unitarios de algunas láminas de agua que salen del orificio aumentan a lo largo del flujo

En los dos casos mostrados en la Figura 14.5, a y b  $q_2 > q_1$  con la particularidad que la lámina de agua que sale del orificio e ingresa en el tramo aguas abajo ensanchado puede apretarse se hacia la margen derecha o hacia a la margen izquierda (Figura 14.5b). Como es evidente en este caso simultáneamente tienen lugar las dos alteraciones ya mencionadas.

Se puede identificar una alteración estable cuando, el escenario del movimiento del agua en el tramo aguas abajo luego de su alteración por alguna causa retorna nuevamente a su forma inicial y alteración no estable de la lámina de flujo cuando dicha lámina debido a unas u otras circunstancias aleatorias cambia en el tiempo su posición (Figura 14.5b).

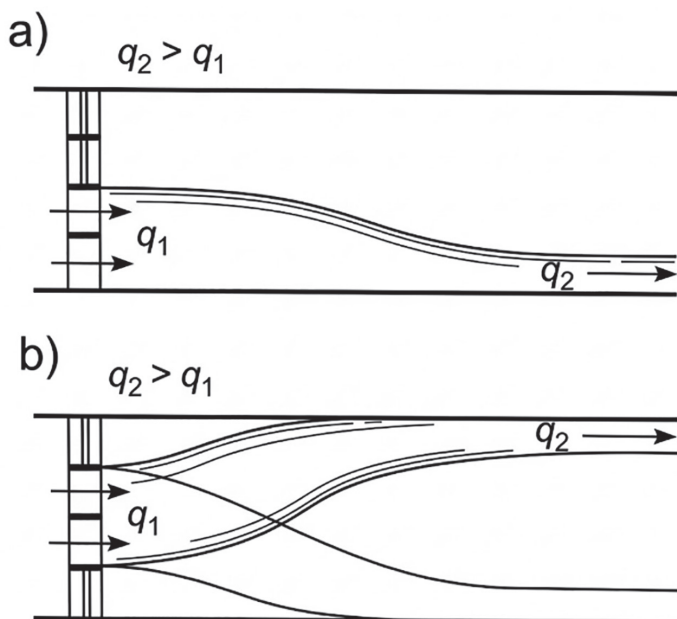


Figura 14.5. Casos de alteraciones del flujo

Fuente: Chugaev, R. R. (1985). Construcciones hidráulicas: presas con vertido incorporado. AGRO-PROMIZDAT.

En el comportamiento de la lámina que sale del orificio en gran medida puede influir la protección del tramo aguas abajo, la longitud de las pilas, la simetría o no simetría en la apertura de los orificios etc. En caso de que se intente diseñar una protección tomando en cuenta las alteraciones entonces se podría obtener una estructura protectora demasiado costosa. Por esta razón con frecuencia el esfuerzo está direccionada más bien a evitar el surgimiento de las distorsiones del flujo.

En este aspecto pueden ser considerados los siguientes caminos: a) ante todo para establecer el programa o gráfico de operación de las compuertas es necesario excluir aquellos esquemas que claramente pueden dar origen a una alteración indeseable. Si, por ejemplo, para evacuar objetos flotantes se requiere abrir solo una sección de las compuertas, entonces es necesario resolver qué sección precisamente debe ser abierta. En algunos casos no debería en absoluto permitirse la apertura de un orificio sino abrir al mismo tiempo dos o tres; b) en caso de que las medidas operativas no sean suficientes para evitar la alteración entonces es necesario prever diferentes medidas constructivas complementarias: prolongar las pilas de la presa sobre la losa de disipación; en este caso podría prolongarse no todas las pilas sino pasando una, dos (menos frecuente); incluir en el esquema disipadores especiales que permitan la difusión del flujo, etc. Se sobreentiende que las medidas enumeradas pueden ser definidas con suficiente grado de confiabilidad únicamente sobre la base de experimentación de laboratorio a la cual hay que recurrir en los casos necesarios.

En consecuencia, en los cálculos del enlace de tramos no cabe permitir una alteración del flujo claramente manifestada. Una alteración pequeña del caudal en el cálculo del tramo postresalto de alguna manera puede ser considerada a través del incremento del caudal unitario (dentro de los límites del tramo postresalto) por ejemplo en 20 a 30 %.

### 14.3.1.2. Casos cuando los caudales unitarios de algunas láminas de agua que salen de los orificios disminuyen a lo largo del flujo

Dicha disminución de los caudales unitarios se produce por el esparcimiento (ensanchamiento) de la lámina en el tramo aguas abajo debido a:

- Ensanchamiento de la lámina luego de las pilas en la magnitud del ancho de las pilas (Figura 14.6a).
- Operación con orificios abiertos pasando uno (Figura 14.6b).
- Cuando el flujo que sale de los orificios es protegido del ingreso de agua desde los costados con ayuda de muros de encausamiento, los mismos que en estos casos permiten al flujo la posibilidad de ensancharse en planta (Figura 14.6c).

En los casos cuando el frente de vertido es ancho la disminución del caudal unitario gracias al ensanchamiento del flujo en el tramo aguas abajo resulta despreciable y por tanto puede no ser considerada. En la práctica el ensanchamiento del flujo tiene sentido considerar en el caso de ensanchamiento luego de las pilas (Figura 14.6a) para determinar la profundidad contraída, considerando que el caudal unitario en la sección contraída es igual a  $q = \frac{Q_{orif}}{b_2}$ , donde  $b_2$  es la distancia entre los ejes de las pilas y  $Q_{orif}$  el caudal evacuado a través del orificio considerado, dicho caudal es determinado con la ecuación convencional del vertedero colocado en ella como ancho del vertedero la magnitud  $b_1$ . Sin embargo, si opera únicamente un orificio del vertedero y los contiguos permanecen cerrados, es decir si se tiene el caso cuando el ingreso de agua a la lámina desde los costados no se dificulta, entonces en este caso resulta más cercano a la realidad si la profundidad contraída se determina a partir del caudal unitario  $q = \frac{Q_{orif}}{b_1}$ .

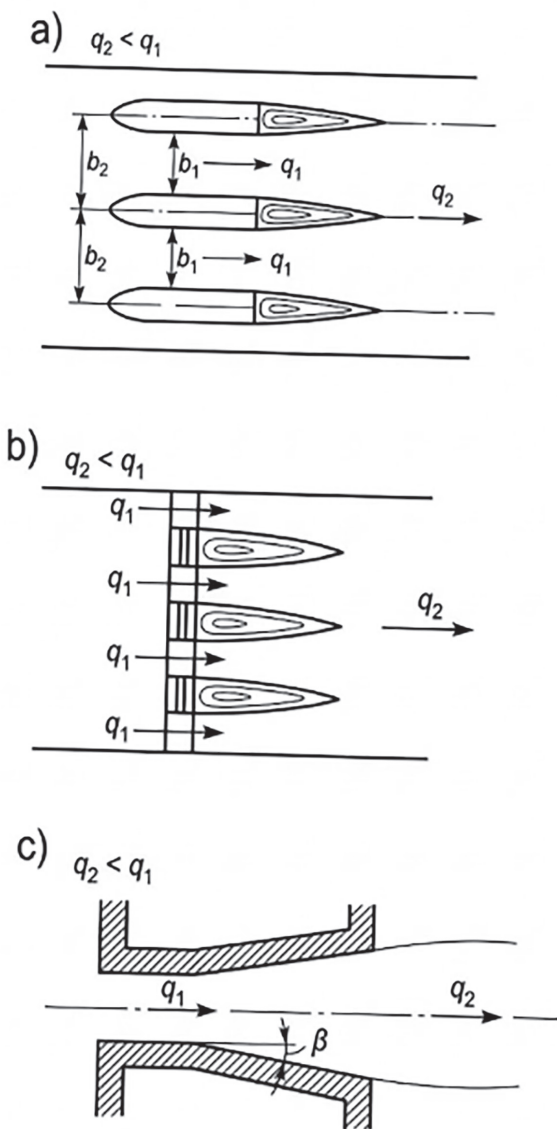


Figura 14.6. Casos de ensanchamiento del flujo.

Fuente: Chugaev, R. R. (1985). Construcciones hidráulicas: presas con vertido incorporado. AGRO-PROMIZDAT.

### 14.3.2. Cálculo del enlace de tramos

Alguna tridimensionalidad complementaria del movimiento del agua está condicionada por el hecho que el flujo contornea a los disipadores especiales de energía. Sin embargo, despreciando esta tridimensionalidad local del movimiento del agua, frecuentemente en calidad de esquema de cálculo se puede establecer el movimiento  $b_1$  o bidimensional (plano) del agua. En realidad, en caso de un ancho  $b_1$  suficientemente grande siempre será posible identificar en el eje del orificio una lámina de flujo de 1 m de ancho, la misma que puede ser calculada para las condiciones de esquema plano (en la Figura 14.7 se muestra sombreado). En este caso es posible obtener un resalto hidráulico tridimensional que determina una sumersión complementaria de la lámina de tránsito desde sus costados. Sin embargo, esta sumersión puede ser despreciada, como margen de reserva.

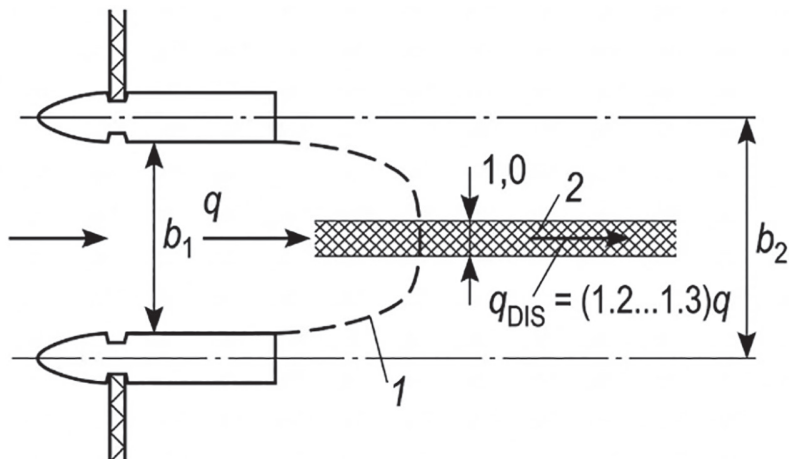


Figura 14.7. Reemplazo del movimiento tridimensional del agua [en el tramo aguas abajo] por bidimensional (plano).

Fuente: Chugaev, R. R. (1985). Construcciones hidráulicas: presas con vertido incorporado. AGRO-PROMIZDAT.

Una sumersión total de la lámina desde los costados en el tramo postresalto plano (en todo el ancho de la lámina) se obtiene en caso de que la profundidad en el tramo aguas abajo sea  $h_2 = \frac{2}{3}h''$ .

Donde:

$h''$ : segunda profundidad conjugada determinada con la ecuación del resalto bidimensional.

Debido a las fugas y a la succión de las masas contiguas de agua por el flujo de tránsito, en el tramo postresalto tiene lugar el aumento de los caudales específicos promediados en 1,5 a 2,0 veces.

Asumiendo para el cálculo el esquema plano, se adoptan las condiciones iniciales (para el cálculo del movimiento del agua en el tramo aguas abajo):

- Cota del nivel de agua en el tramo aguas arriba ( $\nabla N A A R$ ).
- Caudal unitario de agua  $q$  evacuado a través de la presa.
- Cota del nivel de agua en el tramo aguas abajo ( $\nabla N A A B$ ), determinada en muchos casos en correspondencia con la curva de descarga del río en el sitio considerado  $Q_{AAB} = f(\nabla N A A B)$ .

#### **14.4. Capacidad erosiva del flujo dentro de los límites del tramo postresalto**

El material de este apartado se limita a la consideración de algunos problemas prácticos, que se presentan en el diseño de los elementos constructivos para el tramo aguas abajo.

##### ***14.4.1. Selección del tamaño del material que cubre el fondo del cauce horizontal dentro de los límites del tramo postresalto***

El tamaño del material (piedra, grava, arena) debe ser seleccionado de tal manera que no sea erosionado por el flujo de agua y su costo sea el menor posible. Con ayuda del cálculo hidráulico cabe determinar el tamaño mínimo permisible de dicho material. Por cuanto dentro de

los límites del tramo postresalto la capacidad erosiva del flujo disminuye en dirección de la corriente está claro que también disminuirá en dicha dirección el tamaño mínimo permisible buscado de las fracciones del material de protección.

Al considerar el caso cuando el cauce del tramo aguas abajo es horizontal (el cono de erosión, es decir el segundo escalón de protección no se tiene) y que a continuación del tramo postresalto, en dirección del flujo, no tiene lugar la erosión del cauce.

#### *14.4.1.1. Caso cuando no se tienen disipadores de energía sobre la losa de disipación*

Se traza en la Figura 14.8 dos secciones: 4-4 dentro de los límites del tramo postresalto y 6-6 dentro de los límites del cauce aguas abajo, inmediatamente después del tramo postresalto, donde ya está presente el flujo uniforme; se representa a través de  $v_o$  la velocidad media del flujo uniforme (es decir la velocidad media en la sección 6-6) y a través de  $v$  la velocidad media para las secciones identificadas dentro de los límites del tramo postresalto (ver sección 4-4), donde no está presente el flujo uniforme.

Por cuanto las profundidades del agua a lo largo del cauce, desde la sección 2-2 hasta la sección 6-6 (Figura 14.8) son aproximadamente iguales (en particular  $h_4 \approx h_6$ ) se concluye que las velocidades medias en la longitud del cauce considerado también son aproximadamente iguales, es decir  $v = \text{const.}$

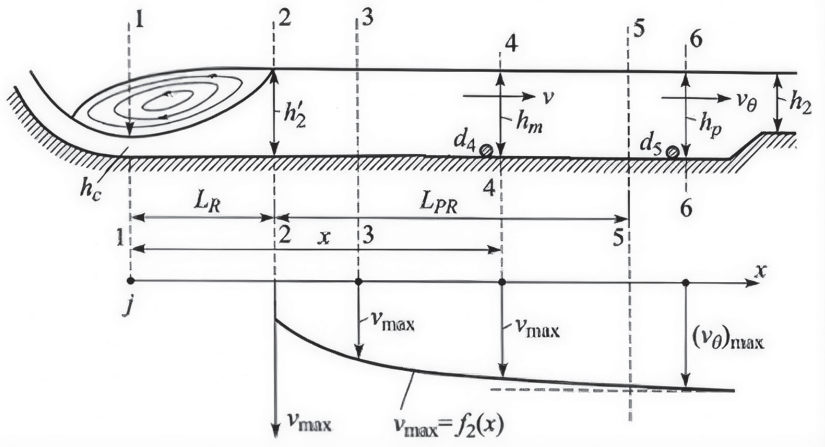


Figura 14.8. Para calcular el tamaño de las fracciones del material dentro de los límites del tramo postresalto.

Gráfico de variación a lo largo de este tramo de la velocidad máxima permisible  $v_{max}$  (en caso de cubrir el fondo del cauce dentro de los límites del tramo postresalto con material de igual tamaño  $d = const$  a lo largo del flujo).

Fuente: Chugaev, R. R. (1985). Construcciones hidráulicas: presas con vertido incorporado. AGRO-PROMIZDAT.

La capacidad erosiva del flujo a lo largo del tramo postresalto (en dirección de la corriente) disminuye principalmente debido a la disminución de las velocidades promediadas de fondo también en dirección de la corriente. Tomando esto en cuenta se puede afirmar que la velocidad máxima permisible  $v_{max}$  a lo largo del tramo postresalto debe aumentar en dirección de la corriente-curva  $v_{max} = f_2(x)$  relativa a determinado tamaño del material de protección constante (tamaño constante) a lo largo de todo el cauce ( $d = const$ ).

El coeficiente de capacidad erosiva del flujo está dado por la relación

$$k = \frac{v_{0max}}{v_{max}} \tag{13.3}$$

Donde:

$v_{omax}$ : velocidad máxima permisible en caso de movimiento uniforme, relativa al mismo tamaño de las fracciones que  $v_{max}$ .

D. I. Kumin sobre la base investigaciones en modelos de laboratorio elaboró un gráfico para determinar el coeficiente  $k$  (Figura 14.9) en la cual se representa como  $h_2$ - la profundidad del agua en el tramo postresalto y luego de este  $h_2 \approx h_4 \approx h_6$ ;  $x$ -abscisa que determina la posición de la sección de flujo considerada dentro de los límites del tramo postresalto (por ejemplo la sección 4-4); la abscisa  $x$  se mide desde la sección contraída 1-1;  $\eta$ - coeficiente de ensanchamiento vertical de la lámina de tránsito dentro de los límites del resalto:  $\eta = \frac{h_2}{h_c}$ .

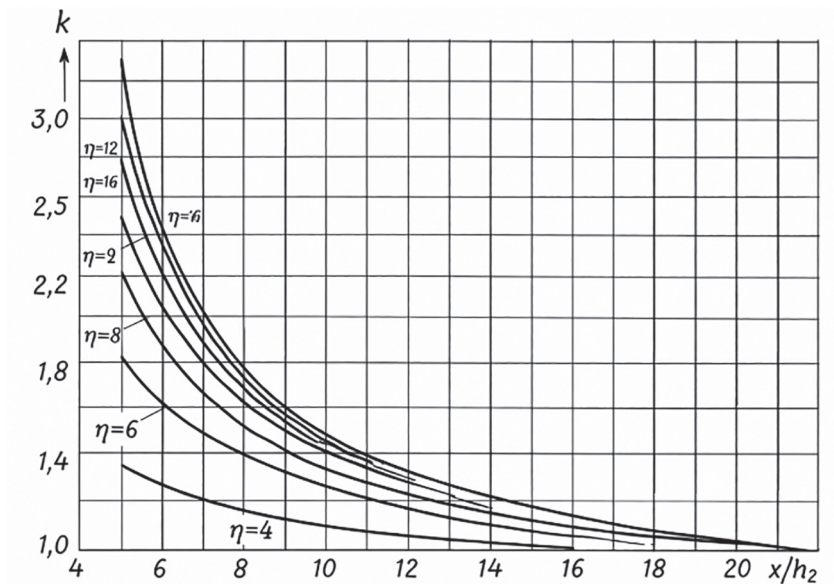


Figura 14.9. Nomograma para determinar el coeficiente  $k$  de la capacidad erosiva del flujo.

Fuente: Chugaev, R. R. (1985). Construcciones hidráulicas: presas con vertido incorporado. AGRO-PROMIZDAT.

Es posible para cualquier sección del tramo postresalto determinar:  $k = f_1\left(\eta; \frac{x}{h_2}\right)$ . Utilizando el nomograma se resuelve el problema propuesto:

- Dentro de los límites del tramo postresalto se identifica la sección 4-4 (Figura 14.8), para la cual se requiere determinar el diámetro mínimo límite  $d$  (diámetro de la piedra, partículas de grava o arena).
- Se establecen los parámetros  $\eta$  y  $\frac{x}{h_2}$ .
- Se encuentra el coeficiente  $k$ , que caracteriza la sección dada 4-4.
- Se determina la velocidad media  $v$  en la sección 4-4;  $v = \frac{q}{h_2}$ .
- A la velocidad media obtenida se le asigna el valor de velocidad máxima permisible, es decir:  $v_{max} = v = \frac{q}{h_2}$ .
- Conociendo el valor máximo permisible de la velocidad media para el tramo postresalto y el valor  $d$   $k$  para la sección 4-4 se determina el valor correspondiente a la sección 4-4 de la velocidad máxima permisible del flujo uniforme  $v_{0max} = kv_{max} = \frac{kq}{h_2}$ .
- Finalmente, a partir de la velocidad encontrada  $v_{0max}$  se establece el tamaño necesario de las fracciones para la sección considerada 4-4.

Para resolver el último punto es necesario tener para las condiciones de flujo uniforme la función  $v_{0max} = f_3(d)$ , con ayuda de la cual en el caso de movimiento uniforme generalmente se determina la velocidad máxima permisible  $v_{0max}$  en función del tamaño de las fracciones del suelo del que está constituido el fondo del cauce.

En calidad de dicha función puede ser utilizada la ecuación de D. I. Kumín  $v_{0max} = 39,2d^{0,3}h^{0,2}$ .

Donde:

$$h = h_2.$$

$v_{0max}$ : en cm/s.

$d$  y  $h$ : en cm.

En la Tabla 13.1 se presentan los valores permisibles de  $v_{0max}$  calculados con dicha ecuación.

Tabla 13.1  
Velocidades máximas permisibles  $v_{0max}$  calculadas con la ecuación de D. I. Kumín

$d, \text{ cm} \backslash h, \text{ m}$	1	2	4	6	8	10	15	20	25	30
0,5	0,8	0,92	1,05	1,14	1,21	1,27	1,37	1,46	1,52	1,58
1	0,98	1,13	1,30	1,41	1,50	1,56	1,69	1,80	1,87	1,95
2	1,21	1,39	1,60	1,74	1,84	1,92	2,08	2,21	2,31	2,40
4	1,49	1,72	1,96	2,14	2,27	2,06	2,56	2,72	2,84	2,95
6	1,68	1,93	2,22	2,41	2,56	2,66	2,90	3,06	3,20	3,33
8	1,84	2,11	2,42	2,63	2,79	2,91	3,16	3,35	3,49	3,63
10	1,96	2,25	2,52	2,81	2,98	3,10	3,37	3,57	3,73	3,88

A la par con la ecuación de D. I. Kumín puede también ser recomendada la ecuación de G. I. Shamova:

$$v_{0max} = 4,6d^{1/3}h^{1/6} \quad (13.4)$$

Donde:

$d$  y  $h$ : en metros.

$v_{0max}$ : en m/s.

Para resolver el “problema inverso” propuesto líneas arriba resulta cómodo presentar la ecuación de G. I. Shamova con la siguiente forma:

$$d \approx \frac{0,01v_{0max}^3}{\sqrt{h}} = \frac{0,01}{h_2} \left( \frac{kq}{h_2} \right)^3 \quad (13.5)$$

Tanto la ecuación de D. I. Kumín como la de G. I. Shamova en rigor son aplicables para  $0,02 \text{ cm} < d \leq 10 \text{ cm}$ .

El cálculo señalado cabe realizar para varios niveles de agua en el tramo aguas abajo, por cuanto no es posible conocer previamente el nivel de agua en dicho tramo con el cual se obtiene el mayor tamaño del material protector del cauce, es decir aquel tamaño a partir del cual cabe finalmente diseñar la protección del tramo aguas abajo.

#### *14.4.1.2. Caso cuando dentro de los límites de la losa de disipación se han implantado disipadores de energía*

La presencia sobre la losa de disipación de disipadores de energía correctamente diseñados disminuye el coeficiente de capacidad erosiva del flujo  $k$ , determinado para la sección de flujo dada 4-4, para la condición de ausencia de disipadores. Sin embargo, el coeficiente  $k$  de reducción puede ser determinado únicamente con ayuda de experimentación en modelo físico. A continuación, se formulan recomendaciones orientadoras que pueden ser utilizadas para diseño preliminar, es decir, hasta la etapa de factibilidad del proyecto:

- En caso de que la cota de la losa de disipación haya sido calculada bajo la premisa de presencia de disipadores de energía (ver Apéndice C) entonces el valor del coeficiente  $h_2$  e  $k$  cabe tomar del gráfico de la Figura 14.9; la profundidad en el caso de presencia de disipadores es algo menor que en el caso de ausencia de éstos, por esta razón el valor de  $k$  determinado en el gráfico de la Figura 14.9 para la sección considerada 4-4 es también algo menor que para el caso de ausencia de disipadores.
- En el caso de que la cota de la losa de disipación haya sido calculada (ver Apéndice C) sin considerar la presencia de disipadores (los disipadores son colocados únicamente para tranquilizar al flujo y para disipar la energía excedente) entonces los coeficientes encontrados en el gráfico de la Figura 14.9 cabe disminuir en 10 a 20 %. A continuación, el cálculo del tamaño del material que conforma el fondo debe ser realizado como se ha indicado en el punto anterior.

### 14.4.2. Determinación del tamaño de la piedra estable para la superficie del fondo del cono

#### 14.2.2.1. Caso de talud protector AB vertical: cálculo de la profundidad del cono de erosión

El procedimiento general de cálculo del diámetro mínimo  $d$  de la piedra estable en el caso del esquema mostrado en la Figura 14.10a puede ser el siguiente:

- Se asume la longitud  $x_0$  de la protección dentro de los límites del primer escalón y para el punto A, determinado por la abscisa  $x_0$ , con ayuda del gráfico de la Figura 14.9 (a partir de las profundidades  $h_2$  y  $k_c$  y de la distancia  $x_0$ ) se determina  $k$  representándola como  $k_A$ .

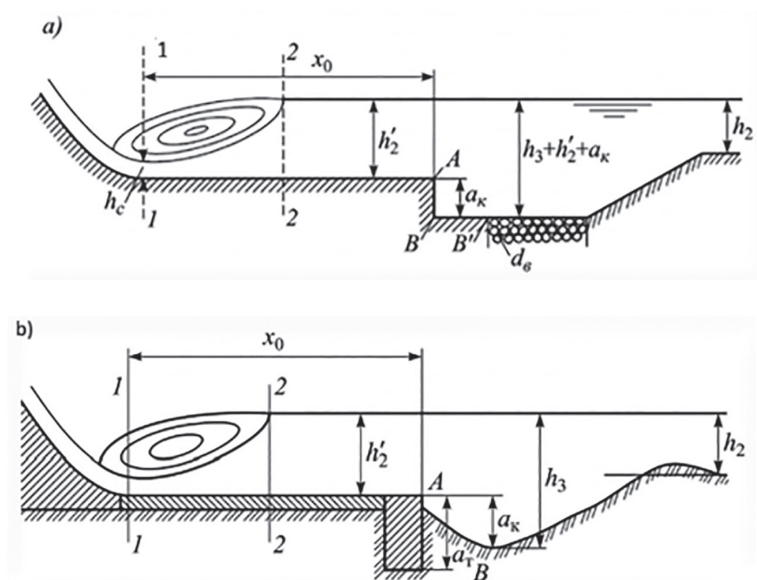


Figura 14.10. Para calcular el tamaño de las fracciones del material que conforma el fondo del cono (caso de talud protector AB vertical).

Fuente: Chugaev, R. R. (1985). Construcciones hidráulicas: presas con vertido incorporado. AGRO-PROMIZDAT.

- Se adopta la altura del escalón  $a_k$ - profundidad del cono (Figura 14.10b) y con la siguiente ecuación se determina el coeficiente de capacidad erosiva del fondo del cono en la región del punto B:

$$k_B = k_A(1 + \beta) \tag{13.6}$$

Dónde el coeficiente adicional  $\beta$  que considera el aumento de la intensidad de la turbulencia del flujo originado por el escalón AB:

$$\beta = 1,5 \left( \frac{a_k}{h_3} \right)^{1,5} \tag{13.7}$$

O con el gráfico de la Figura 14.11 en función de la relación  $\frac{a_k}{h_3}$  considerando que en este caso:

$$h_3 = a_k + h_2 \tag{13.8}$$

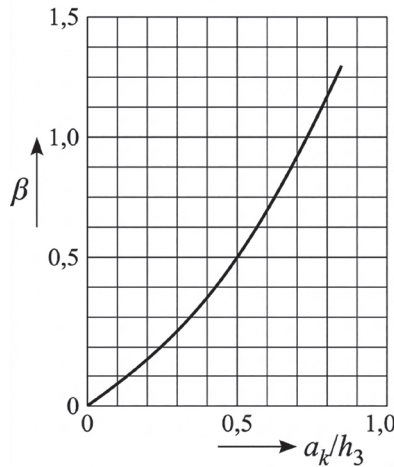


Figura 14.11. Nomograma para obtener  $\beta = f\left(\frac{a_k}{h_3}\right)$ .

Fuente: Chugaev, R. R. (1985). Construcciones hidráulicas: presas con vertido incorporado. AGROPROMIZDAT.

- La velocidad media en el cono es:

$$v_B = \frac{q}{h_3} \quad (13.9)$$

- La velocidad máxima permisible (no erosiva) del movimiento uniforme (para profundidad la  $h_3$ ), en correspondencia con la velocidad  $v_B$ :

$$v_{maxB} = k_B v_B \quad (13.10)$$

- Conociendo  $v_{maxB}$ , con ayuda de las ecuaciones correspondientes o utilizando la Tabla 13.1 se determina la magnitud buscada  $d_B$  (diámetro mínimo de la piedra estable en la región del punto  $B$ ).

A continuación, se considera el cálculo de la profundidad del cono de erosión que se forma luego de una protección corta, con la aclaración que sobre este tema se considera únicamente el caso cuando el cauce natural está constituido por suelo no cohesivo.

Es necesario aclarar que con alguna aproximación el tamaño mínimo de la piedra (arena o grava) que sea estable en el fondo del cono de erosión (Figura 14.10b) se puede determinar con ayuda de la Figura 14.10a, es decir, en el cálculo se supone que el talud natural del cono de erosión es vertical. Determinando de esta manera  $d_B$  (asumiendo  $x_o y a_k$ , donde  $a_k$  es la profundidad del cono de erosión) se puede aseverar lo siguiente: si el valor encontrado de  $d_B$  resulta ser igual al diámetro de las partículas de la arena natural que constituye el fondo del cono, es decir  $d_B = d_{nat}$ , entonces, en el fondo del cono se puede no hacer protección. En este caso  $a_k$  es la profundidad del cono de erosión que se forma al final de una protección corta.

#### 14.2.2.2. Caso de talud protector inclinado

Para determinar aproximadamente el diámetro de la piedra estable cabe proceder de igual manera que en el caso del talud vertical  $AB$

(Figura 14.10a) con la única diferencia que el coeficiente  $\beta$  determinado con ayuda del gráfico de la Figura 14.11 debe ser disminuido en un 20 % en caso de  $m = 3$ ; en 40 % en caso de  $m = 4$ ; en 60 % en caso de  $m = 5$ , donde  $m = \text{ctg } \vartheta$  y  $\vartheta$  es el ángulo de inclinación respecto a la horizontal del talud protector.