

Estudio experimental de bloques de impacto trapezoidales

(Recibido: 28/04/2016; Aceptado: 21/06/2016)

López Moreno R.; Viguera Rodríguez A.; Castillo Elsitdié L.G.

Grupo de investigación Hidr@m - Ingeniería Hidráulica, Marítima y Medioambiental
Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos y de Ingeniería de Minas

Paseo Alfonso XIII, Nº 52, 30203 Cartagena (España)

Teléfono: 968327071

Email: lomor90@hotmail.com

Resumen. La misión principal de las estructuras disipadoras de energía en grandes presas es reducir el tamaño y, por tanto, el coste de los cuencos disipadores de energía. Con ellas se consigue un acortamiento de la longitud del resalto hidráulico, limitando, así, la erosión o socavación a pie de presa y su posible vuelco. El objetivo de este trabajo es la realización de un contraste teórico-práctico con otros estudios realizados por diferentes autores sobre estructuras disipadoras de energía.

Palabras clave. Cuenco de disipación; disipación de energía; deflectores de solera; Lyapin.

Abstract. The main aim of energy dissipators structures at large dams is to reduce the size, and thus the cost of stilling basins. Such reduction is obtained by shortening of the hydraulic jump length, in this way erosion in the dam base is limited as well as its own spill. The target of this research is the attainment of a theoretical and practical contrast with other research results which have been carried out by different authors about energy dissipative structures.

Keywords. Stilling basins; energy loss; baffle piers; Lyapin.

1. Introducción

La misión básica de los órganos de seguridad de una presa (vertederos y disipadores de energía) es dejar pasar las avenidas sin dañar la presa y sin que los daños que se produzcan sean mayores de los que se hubieran producido sin la existencia de la misma.

El objetivo de la disipación de energía mediante la construcción de bloques de impacto a pie de presa es eliminar gran parte de la energía de los flujos de alta velocidad; ya sea por fricción del agua con el aire, difusión dentro del cuenco de amortiguación y/o impacto con las estructuras disipadoras. De este modo, se limitan la erosión y socavación a pie de presa y su posible vuelco, y se garantiza un régimen de restitución al medio natural lo más estable posible.

La pérdida de energía en el vuelo de la lámina o en el impacto con las estructuras disipadoras son ideas cualitativamente aceptadas pero de las que se sabe poco desde el punto de vista cuantitativo.

El autor Ranga Raju, K. G. presentó en 1980 un estudio [3] en el que dio a conocer el funcionamiento de cuencos de disipación con bloques trapezoidales. Por otra parte, Oliveira Lemos F. y Lobo Ferreira J. [4] estudiaron en el Laboratorio Nacional de Ingeniería Civil de Lisboa el comportamiento de la estructura Lyapin.

En este estudio se han desarrollado los resultados obtenidos por estos dos tipos de estructuras disipadoras:

- La estudiada por Ranga Raju (Fig. 1), consistente en una fila de bloques trapezoidales con dimensiones que van en función de su altura.
- La estructura tipo Lyapin (Fig. 2) del Instituto Vedenev de Investigación en Ingeniería Hidráulica de la URSS (VNIIG) consistente en una fila de bloques de impacto con dimensiones que van en función del calado supercrítico.

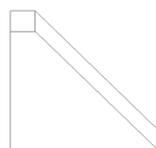


Fig. 1. Estructura tipo Ranga Raju.

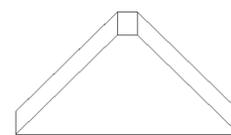


Fig. 2. Estructura tipo Lyapin.

2. Base teórica

El resalto hidráulico es el fenómeno por el que un flujo pasa de régimen supercrítico a régimen subcrítico. El tramo del canal donde se confina el resalto hidráulico es conocido como cuenco de disipación y su fondo se recubre para resistir la socavación. Su mérito está en prevenir la posible erosión aguas abajo. La estructura reduce rápidamente la velocidad del flujo sobre el fondo revestido hasta un punto donde el flujo pierde su capacidad de socavar el lecho del canal natural aguas abajo.

En la práctica, cuando se quiere evitar confinar toda la longitud del resalto hidráulico libre sobre la zona

revestida, se puede incorporar un cuenco disipador de menor longitud con accesorios disipadores de energía para controlar el resalto dentro del mismo.

Los disipadores de energía son, por tanto, estructuras que se diseñan para generar pérdidas hidráulicas importantes en los flujos de alta velocidad. Con ellas se acorta el rango dentro del cual el resalto ocurrirá y por consiguiente se reduce el tamaño y el costo del cuenco disipador.

2.1. Definición de cantidad de movimiento específico

Como resultado de la pérdida de energía se produce un cambio en la cantidad de movimiento lineal del flujo. Examinando la ecuación integral de la cantidad de movimiento o momentum (en una forma unidimensional) para el volumen de control de la Fig. 3 se obtiene:

$$F'_1 + Wsen\theta - F'_2 - F'_f - F'_{aire} = \frac{\gamma}{g} Q(\beta_2 \bar{u}'_2 - \beta_1 \bar{u}'_1) \quad (1)$$

Donde

F'_1 y F'_2 = componentes de la presión que actúan en las secciones 1 y 2, respectivamente.

W = peso del fluido entre las secciones 1 y 2.

F'_f = sumatorio de las fuerzas de fricción con las paredes del canal

F'_{aire} = sumatorio de las fuerzas de fricción con el aire

γ = peso específico del fluido

g = gravedad

Q = caudal

θ = ángulo de la pendiente del canal

β_1 y β_2 = coeficientes de corrección de la uniformidad de la velocidad.

\bar{u}'_1 y \bar{u}'_2 = velocidad promedio espacial en la dirección x de las secciones 1 y 2, dada por

$$\bar{u}' = \frac{1}{A} \iint u \cdot dA \quad (2)$$

A = área hidráulica

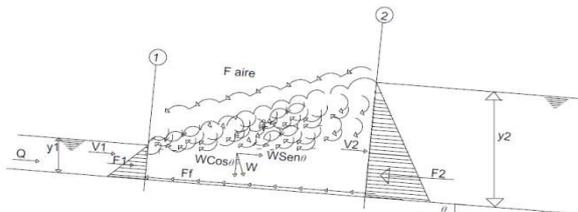


Fig. 3. Definición esquemática para la cantidad de movimiento específico o momentum.

Si se supone que, θ es pequeña y por tanto $sen\theta=0$ y $cos\theta=1$; $\beta_1 = \beta_2=1$, y, $F'_f = 0$, la ecuación será

$$\gamma \bar{z}'_1 A_1 - \gamma \bar{z}'_2 A_2 - F'_{aire} = \frac{\gamma}{g} Q(\bar{u}'_2 - \bar{u}'_1) \quad (3)$$

Donde

\bar{z}'_1 y \bar{z}'_2 = distancias a los centroides de las respectivas áreas hidráulicas A_1 y A_2 desde la superficie libre.

$$F'_1 = \gamma \bar{z}'_1 A_1 \quad \text{y} \quad F'_2 = \gamma \bar{z}'_2 A_2 \quad (4)$$

$$\bar{u}'_1 = \frac{Q}{A_1} \quad \text{y} \quad \bar{u}'_2 = \frac{Q}{A_2} \quad (5)$$

Por tanto, sustituyendo y reagrupando obtenemos

$$\frac{F'_{aire}}{\gamma} = \left(\frac{Q^2}{gA_1} + \bar{z}'_1 A_1 \right) - \left(\frac{Q^2}{gA_2} + \bar{z}'_2 A_2 \right) \quad (6)$$

$$\frac{F'_{aire}}{\gamma} = M_1 - M_2 \quad (7)$$

$$M = \frac{Q^2}{gA} + \bar{z}A \quad (8)$$

Conociéndose M como la función “momentum” (cantidad de movimiento específico) o fuerza específica.

3. Material y métodos

La labor experimental llevada a cabo en el presente estudio ha consistido, en primer lugar, en el estudio de los distintos perfiles del flujo que se dan, en un canal abierto, en consecuencia de los elementos de control dispuestos.

Una vez analizados dichos perfiles, se han diseñado las dos estructuras objeto de estudio y se han vuelto a analizar los perfiles para su posterior comparación teórico-práctica con trabajos ya analizados, así como para la obtención de nuevos resultados.

3.1. Canal del laboratorio de Hidráulica UPCT

Dicha labor experimental se ha realizado en el laboratorio de Hidráulica de la Universidad Politécnica de Cartagena, el cual dispone de un canal de ensayo HM 162 con un recorrido de medición de 10 m y una sección transversal de flujo de 309 mm de anchura y 450 mm de profundidad.

Los elementos de control dispuestos para la realización de los ensayos han sido un vertedero recto tipo Creager y una compuerta plana.

3.2. Impresora del Área de Hidráulica UPCT

Las estructuras disipadoras de energía han sido impresas mediante la impresora 3D “Prusa bq i3”, con un área de impresión de 20x30 cm del área de

f(X₀/Y₁)

Hidráulica de la UPCT. El material que se ha usado para dichas impresiones ha sido PLA el cual se considera con una dureza suficiente para esta labor.

3.3. Diseño de los modelos de estructuras disipadoras de energía.

En base al análisis dimensional del problema y a los resultados empíricos se puede considerar que la fuerza de resistencia ejercida por una fila de bloque de impacto, despreciando la viscosidad debido a la alta turbulencia y alto número de Reynolds, dependerá de

$$\frac{F_D/b}{\frac{1}{2}\rho g y_1^2} = f(Fr_1, \frac{\Delta Z}{y_1}, \frac{X_0}{y_1}, \frac{W}{\Delta Z}, \frac{S}{\Delta Z}, \text{forma del deflector}) \tag{9}$$

Siendo:

- F_D/b la fuerza de resistencia por ancho del canal (b)
- ρ la densidad del agua
- g la gravedad
- y_1^* el calado conjugado supercrítico según la ecuación de Bélanger [2]
- Fr_1 el número de Froude debido al calado supercrítico
- y_1 el calado supercrítico
- ΔZ la altura del bloque
- X_0 la posición del bloque respecto al pie del aliviadero o a la compuerta
- W el ancho del bloque
- S la separación entre bloques

Según los estudios realizados por Ranga Raju, en el caso de una sola fila de bloques trapezoidales con longitud del tramo horizontal superior del bloque dada por $0,2\Delta Z$, $W=0,75\Delta Z$ y longitud total del bloque entre una y dos veces ΔZ , dicha ecuación funcional puede verse reducida a

$$\frac{F_D/b}{\frac{1}{2}\rho g y_1^2} = \frac{f(\frac{X_0}{y_1})}{\psi_1(\frac{\Delta Z}{y_1}) \psi_2(\frac{W}{W+S})} \tag{10}$$

Donde f y ψ_1 se recogen en las Fig. 4 y 5 respectivamente, y ψ_2 en la Tabla 1.

Visto lo anterior, se deduce que el diseño de la pieza se simplifica a elegir una altura. Esta decisión se ha tomado de tal forma que dicha altura sea en todo caso mayor que los calados supercríticos ensayados. Por tanto, el modelo de ensayo se ha diseñado con una altura $\Delta Z=6$ cm.

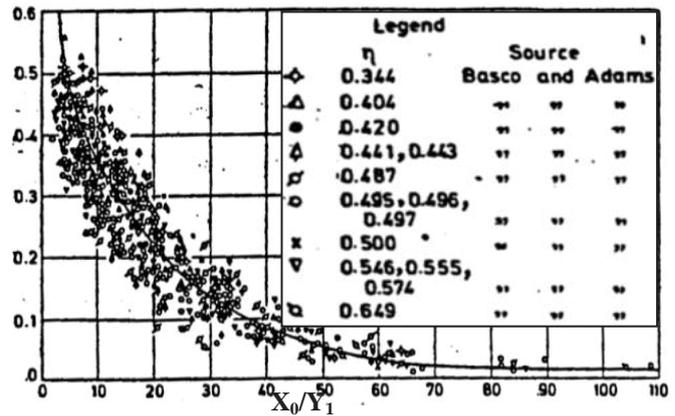


Fig. 4. Gráfica donde se recoge el valor de f en función de X_0/y_1 [3].

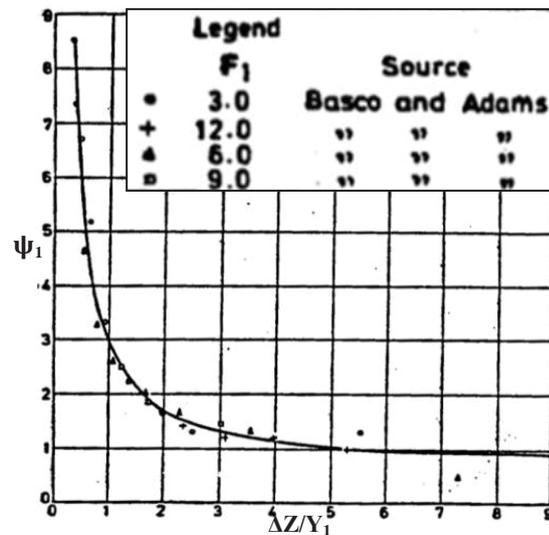


Fig. 5. Gráfica donde se recoge el valor de ψ_1 en función de $\Delta Z/y_1$ [3].

Tabla 1. Valor de ψ_2 en función de $W/(W+S)$ [3]

$W/(W+S)$	0.34	0.40	0.50	0.60	0.70
ψ_2	1.00	0.80	0.64	0.54	0.47

Por otra parte, el Instituto Vedeneev de Investigación en Ingeniería Hidráulica de la URSS, da una serie de condiciones que definen los parámetros de la estructura Lyapin. Son las siguientes:

- Altura (h): $1,5 y_1 \leq h \leq 3,5 y_1$
- Ancho (W): $0,42 h \leq W \leq h$
- Espesor de la cresta (e): $e \approx 0,2 h$
- Separación entre piezas (S): $S=0,294W$
- Ubicación (X_0): $X_0=3y_2$
Siendo y_2 = calado subcrítico

Dado que se tiene una gran diversidad de caudales para ensayar, no es posible diseñar una pieza que cumpla con las condiciones de altura para todos ellos. Por tanto, se ha procedido a diseñar 3 piezas, con alturas de 4, 6 y 10 cm, con las que se pueden realizar los ensayos para todos los caudales.



Fig. 6. Ensayo realizado con la pieza Ranga Raju.



Fig. 7. Ensayo realizado con la pieza Lyapin de 6 cm de altura.

4. Análisis de datos y resultados

Una vez que se han diseñado e imprimido los bloques disipadores de energía, se ha repetido la campaña de medición de los perfiles del flujo.

En el caso de la estructura tipo Ranga Raju se han ensayado varias posiciones de la misma con respecto al aliviadero y compuerta, con el fin de comprobar los resultados obtenidos por el autor en la gráfica de la Fig. 4.

Realizados dichos ensayos, se han digitalizado los resultados del presente estudio con el software Octave y la solución obtenida se muestra en la Fig. 8, en la que se incluye, además, 3 líneas en las que se representan los valores medios y una banda de confianza de los resultados obtenidos por Ranga Raju en la Fig. 4.

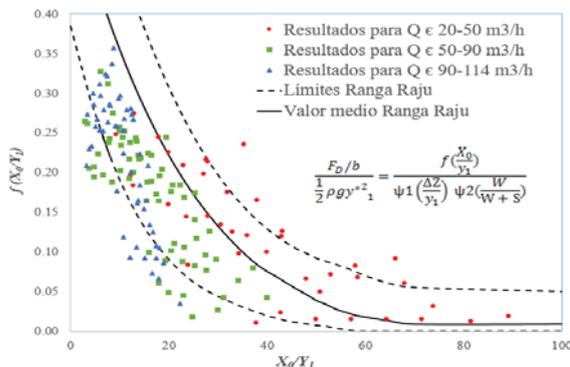


Fig. 8. Resultados obtenidos con el bloque de Ranga Raju.

Para la estructura tipo Lyapin, el bloque de impacto está ubicado a 3 veces el calado subcrítico, como ya se ha mencionado anteriormente. Por lo que en los ensayos se ha colocado cada pieza en su posición correspondiente, registrando tanto la reducción del calado subcrítico como la de la longitud del resalto hidráulico. En la Fig. 9 se pueden observar la variación que sufren los calados subcríticos en función del número de Froude del ensayo.

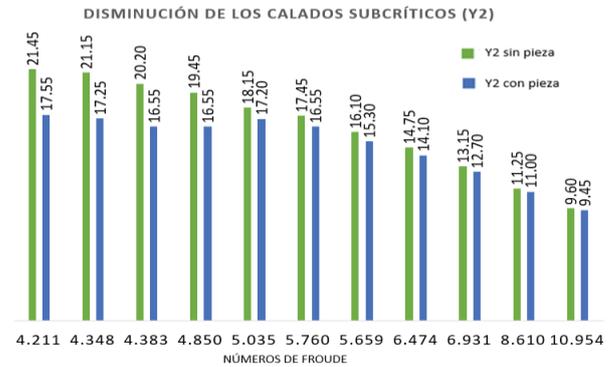


Fig. 9. Comparación de los calados subcríticos con y sin bloques Lyapin.

5. Conclusiones

Las conclusiones obtenidas en el presente estudio son:

- Para las estructuras estudiadas por Ranga Raju, se observa como los resultados de los ensayos parece que se comportan de forma similar a los aportados por Ranga Raju en la Fig. 4. No obstante, se observa una mayor dispersión de los resultados obtenidos y la tendencia promedio aparentemente da valores de $f(x_0/y_1)$ inferiores a la observada en la Fig. 4.
- Siguiendo las recomendaciones del Instituto Vedeneev para la posición de la pieza tipo Lyapin, se consigue una reducción media del calado subcrítico del 10%. Por otra parte las longitudes de los resaltos hidráulicos sufren una disminución media aproximada al 40%.
- Se observa que realizando ensayos con posiciones diferentes a las recomendadas, hay casos en los que dicha disminución se incrementa. Particularmente en posiciones más alejadas de las estipuladas.
- Se podría seguir la línea de investigación en este punto, buscando una relación entre la posición de las piezas (X_0) y el calado subcrítico (y_2) que mejore los resultados hasta ahora obtenidos. De esta forma también se puede caracterizar la fuerza de resistencia ejercida por este tipo de bloque.

Referencias

- [1] Vigueras, A. (2015). "Apuntes de Presas y Embalses". Universidad Politécnica de Cartagena.
- [2] Ven Te Chow, Ph. D. (2004) "Hidráulica de Canales Abiertos". Ed Mc Graw-Hill.
- [3] Ranga Raju, K.G. (1980). "Analysis of Flow Over Baffle Blocks and End Sills". Journal of Hydraulic Research. Vol 10, N°4.
- [4] Oliviera Lemos, F. y Lobo Ferreira, J. (1978). "Estructuras compactas para dissipacao de enegia por ressalto". Laboratorio Nacional de Engenharia Civil de Lisboa. Memoria N° 502.