

## Disipadores de energía - parte I: el salto hidráulico

Rafael Pardo Gómez

email: [rpardo@cih.cujae.edu.cu](mailto:rpardo@cih.cujae.edu.cu)

Centro de Investigaciones Hidráulicas (CIH).

Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría (Cujae). Habana.

### RESUMEN

El presente artículo es el primero de una serie de siete, todos relativos a los disipadores de energía que se pueden emplear en obras hidráulicas. Todos estos artículos en su conjunto conforman una monografía que sobre este tema desarrolló el autor, concluyéndola a mediados del año 2017 y posteriormente incorporándola a una nueva edición – en preparación – del libro de texto “Aliviaderos y Obras de toma”. Este primer artículo es una presentación detallada acerca del salto hidráulico empleado en funciones de disipación de energía.

**Palabras clave:** ocurrencia del salto, posición del salto, profundidades conjugadas, salto hidráulico, tipos de salto.

## Energy dissipation - part I: the hydraulic jump

### ABSTRACT

The present article is the first of a series of seven, all relatives to energy dissipators that can be used in hydraulic works. The whole group of these articles conform a monograph about the subject that is being prepared by the author, concluding it by the middle of the 2017 year and later on incorporating it into a new edition - in preparation - of the textbook "Spillways and Intake Structures." This first article is a detailed presentation about the hydraulic jump employed with the function of energy dissipation.

**Keywords:** jump occurrence, jump position, conjugated depths, hydraulic jump, jump types.

## **INTRODUCCIÓN**

Aunque han sido diseñados cientos de estanques amortiguadores y otros disipadores de energía en aliviaderos, obras de toma y estructuras en canales, aun se presentan casos en los que continúa siendo necesario realizar estudios en modelos físicos de tales elementos para tener confianza en que los correspondientes prototipos se comportarán de la forma en que se ha pronosticado (Pardo 2017).

Con el objetivo de proponer procedimientos y herramientas de diseño para disipadores de energía, una gran cantidad de programas de investigación sobre el estudio del salto hidráulico en general y otros aspectos específicos vinculados a la disipación de energía han sido llevados a cabo, observando todas las fases en las que el mismo ocurre en conducciones libres. Con un amplio entendimiento de ese fenómeno fue entonces posible entrar en los aspectos prácticos del diseño del disipador más adecuado para cada caso. Sin temor a exagerar se puede afirmar que suman cientos las publicaciones especializadas sobre este tema, de manera que es posible que no exista otro campo de la hidráulica que se haya estudiado tanto. A partir de la revisión exhaustiva de muchas de esas publicaciones y de resultados de estudios de más de 200 aliviaderos en modelos físicos desarrollados en los laboratorios del Centro de Investigaciones Hidráulicas (CIH) de la Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría (Cujae) en Cuba, se han podido organizar los resultados que se presentan detalladamente en el presente trabajo.

Se podrá apreciar en el desarrollo del presente trabajo que, de manera reiterada, se hace alusión a Peterka, lo que se debe a la importante contribución de dicho investigador al tema de los disipadores de energía, cuyo colofón fue la publicación en 1984 de una monografía sobre el tema.

### **Definición de disipador de energía**

El agua que vierte sobre una presa vertedora o por un aliviadero, adquiere una gran energía cinética en la parte final de cualquiera de ellas debido a la notable diferencia de nivel (energía potencial al nivel del embalse que se transforma en energía cinética al llegar el flujo a los niveles de la descarga) que por lo general hay entre los extremos de las mismas, que de ser entregada directamente al canal de salida, ocasionaría una gran erosión que podría atentar contra la integridad del propio aliviadero y de la cortina o terraplén de la presa si la descarga se realizara cercana a ésta.

Para evitar esta situación, como parte integrante de los aliviaderos se construyen objetos de obras conocidos como disipadores de energía que no son más que aquellas estructuras encargadas de reducir la gran energía cinética mencionada y de esa forma evitar las citadas grandes erosiones (Pardo y Alegret 2012).

Según se podrá apreciar en el desarrollo del presente trabajo, el empleo de un disipador de energía se puede describir en términos de comportamiento hidráulico como el cambio brusco desde un régimen supercrítico a otro subcrítico, de ahí que el diseño hidráulico de un disipador de energía tiene como aspecto esencial la determinación de las dimensiones de dicho disipador y – muy importante – su ubicación en el nivel (cota) adecuado, para lograr el tránsito desde las características hidráulicas antes de la disipación de energía a las características después de la

misma. Ello significa que para tal diseño resulta imprescindible conocer tales variables hidráulicas.

### **Tipos de disipadores de energía de mayor empleo en aliviaderos, obras de toma y presas vertedoras**

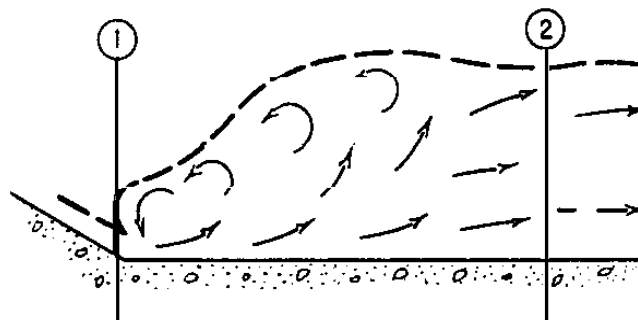
Existen distintos tipos de disipadores entre los que se pueden citar:

1. El pozo amortiguador
2. El estanque amortiguador
3. De bloques de impacto
4. La cubeta deflectora
5. Válvula cónica o de chorro hueco
6. Solera dentada
7. El trampolín

### **EL SALTO HIDRÁULICO EN CANALES HORIZONTALES O CON POCA PENDIENTE**

En los pozos y estanques amortiguadores la disipación de energía la lleva a cabo un salto hidráulico que tiene lugar dentro de las mencionadas estructuras, de manera que resulta imprescindible conocer al detalle las características de este fenómeno hidráulico para poder realizar un adecuado diseño de las mencionadas estructuras (Agroskin 1964), (Kiceliiov 1961).

En la figura 1 se muestra el esquema de partida para esta sección y en la figura 2 se muestran los símbolos empleados.



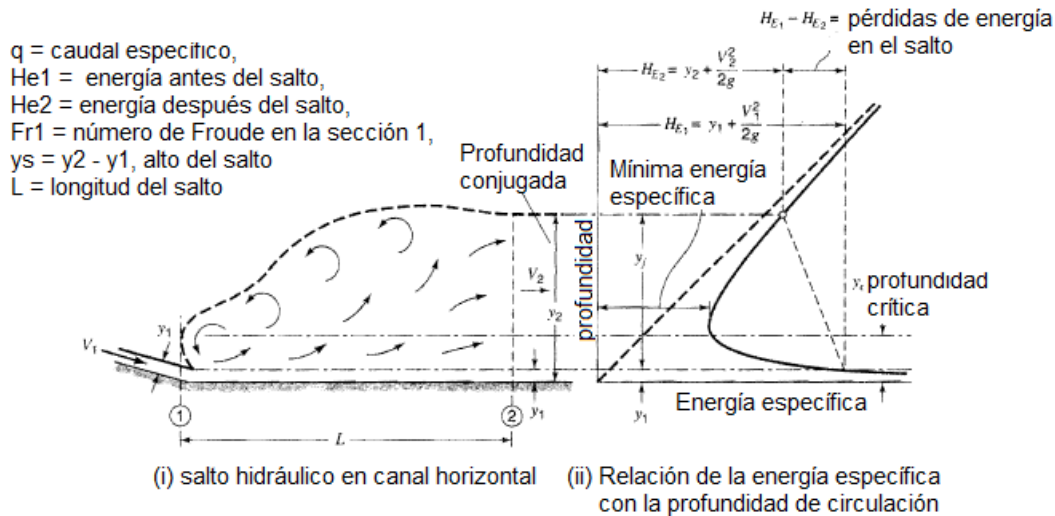
**Figura 1. El salto hidráulico en soleras horizontales**

### **Ocurrencia del salto hidráulico**

El salto tiene lugar en la unión de dos regímenes de flujo, uno de llegada *supercrítico* y otro de salida *subcrítico*. Las características principales del salto así como la notación empleada se detallan en la figura 2.

En el uso de este gráfico y en lo sucesivo en este texto – hasta tanto no se exprese otra cosa – debe tenerse presente que se denomina “y” a la profundidad de circulación (medida

verticalmente desde el fondo del canal a la superficie del agua) y “D” al tirante de circulación (medido perpendicular al fondo y desde este hasta la superficie del agua), resultando evidente que en canales horizontales o con poca pendiente longitudinal se cumple que  $D = y$  (Peterka 1984).



**Figura 2. Características y notación del salto hidráulico** [Fuente: Peterka (1984)]

El salto tendrá lugar en aquella sección de un canal rectangular horizontal en la que se satisfaga la siguiente ecuación (1).

$$\frac{y_2}{y_1} = \frac{1}{2} \left[ \sqrt{8F_r^2 + 1} + 1 \right] \quad (1)$$

O también:

$$\frac{D_2}{D_1} = \frac{1}{2} \left[ \sqrt{8F_r^2 + 1} + 1 \right] \quad (1')$$

donde:

- $y_1 = D_1$ : profundidad de circulación en la sección inicial del salto.
- $y_2 = D_2$ : profundidad de circulación después del salto (conjugada de  $y_1$ ).
- $Fr$ : número de Froude en la sección inicial del salto, tal que

$$F_r = \frac{V_1}{\sqrt{gy_1}} \quad (2)$$

donde:

- $V_1$ : velocidad del flujo en la sección inicial del salto.

### Longitud del salto hidráulico

La determinación de la longitud del salto ha sido un tema muy debatido por los diversos investigadores del tema por la indefinición que hay en cuanto a dónde puede considerarse que termina el mismo. El criterio más generalizado es aquel que define como longitud del salto ( $L_s$ ) la distancia horizontal desde la entrada de éste (muy bien definida) hasta la sección donde se alcanza su profundidad conjugada.

Esa longitud puede obtenerse a partir de las curvas que se presentan en las figuras 3 y 4 o mediante alguna de las ecuaciones que brindan los investigadores que a continuación se relacionan:

- Smetana (Checoslovaquia):  $L_s = 6 (y_2 - y_1)$  (3)

- Safranets (Alemania):  $L_s = 5,9 y_1 Fr_1$  (4)

- Einwachter (Alemania):  $L_s = 8,3 y_1 (Fr_1 - 1)$  (5)

- Chertousov (Rusia):  $L_s = 10,3 y_1 (Fr_1 - 1)^{0,81}$  (6)

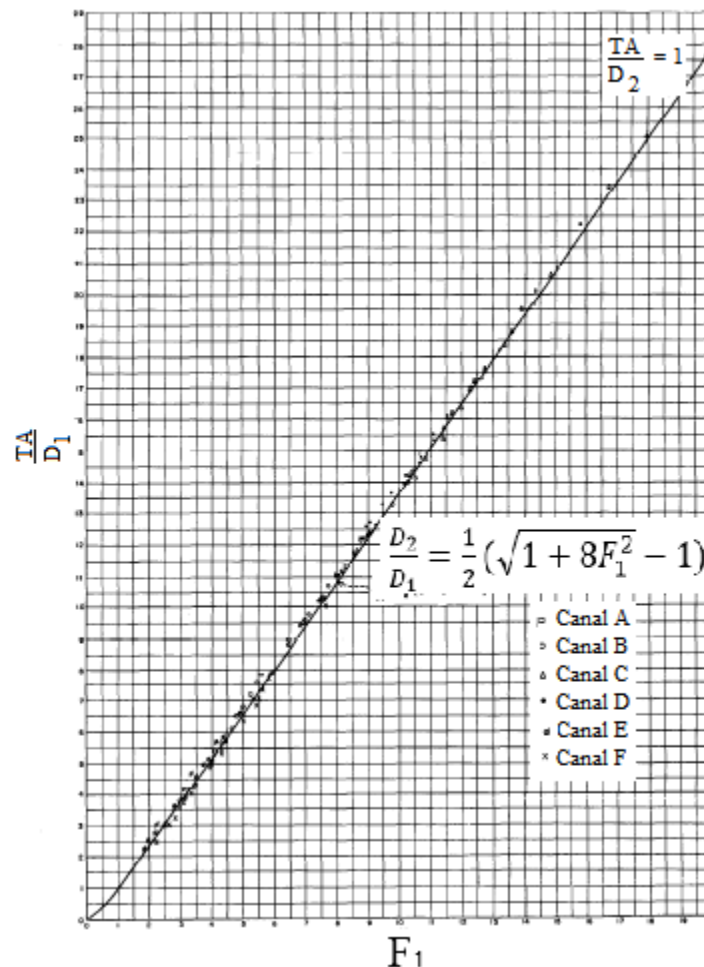


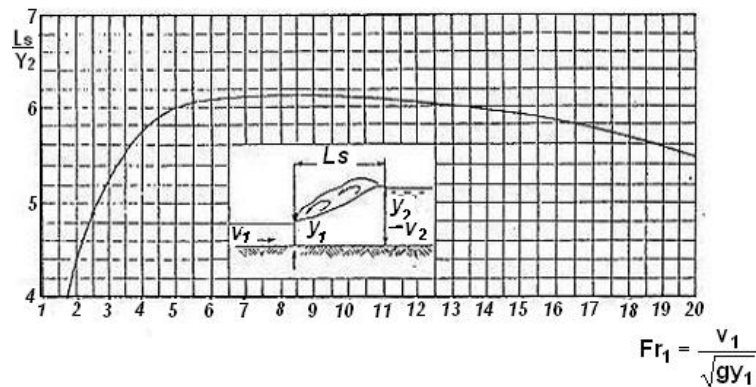
Figura 3. Longitud del salto en función de  $D_1$  [Fuente: Peterka 1984]

El ajuste matemático de la curva de la figura 3 a una ecuación polinómica es:

$$L/D_1 = a + bF_{r_1} + cF_{r_1}^2 + dF_{r_1}^3 + eF_{r_1}^4 + fF_{r_1}^5 \quad (7)$$

donde:

$$\begin{aligned} a &= -11,302116 & b &= 11,518535 & c &= -0,4451386 \\ d &= 0,044488353 & e &= -0,0023731986 & f &= 0,0000427 \end{aligned}$$



**Figura 4. Longitud del salto en función de  $Y_2$  (=D<sub>2</sub> en soleras horizontales)**

[Fuente: Ven Te Chow (1988)]

El ajuste matemático de la curva de la figura 4 a una ecuación polinómica es:

$$L_s/D_2 = a + bF_{r_1}^{0,5} + cF_{r_1} + dF_{r_1}^{1,5} + eF_{r_1}^2 + fF_{r_1}^{2,5} + gF_{r_1}^3 + hF_{r_1}^{3,5} + iF_{r_1}^4 + jF_{r_1}^{4,5} \quad (8)$$

donde:

$$\begin{aligned} a &= -623,83611 & b &= 2291,9638 & c &= -3633,6128 & d &= 3576,4055 \\ e &= -1850,1815 & f &= 679,27155 & g &= -162,41587 & h &= 24,432902 \\ i &= -2,1021007 & j &= 0,078934378 \end{aligned}$$

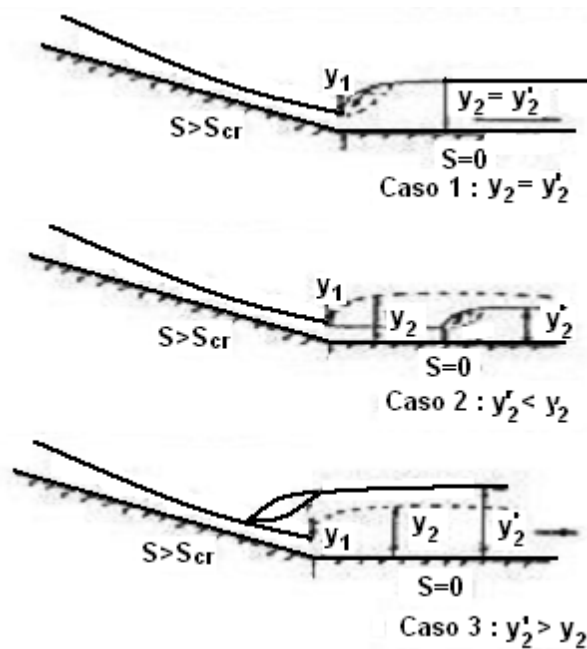
### Posición del salto

Hay tres esquemas ilustrativos (figura 5) que describen la formación de un salto hidráulico aguas abajo de una compuerta, al pie de un cimacio o al final de una rápida. Para la correcta interpretación de los casos que se exponen a continuación, debe tenerse total claridad sobre el significado de los términos  $y_2$  y  $y_2'$ . El primero es la profundidad conjugada del tirante de llegada  $y_1$ , mientras que el segundo (también conocido en la literatura especializada como  $y_3$ ) es el tirante que resulta impuesto por las condiciones de circulación aguas abajo del salto (característica del régimen subcrítico).

*Caso 1:* Ocurre cuando  $y_2 = y_2'$ . El salto ocurre inmediatamente a la salida de la compuerta, al pie del cimacio o al final de la rápida (en lo sucesivo solo se mencionará una de las tres situaciones, quedando entendido que es válido para las otras dos, a no ser que se especifique otra cosa). Para el propósito del diseño del disipador es un caso ideal, sin embargo, tiene la desventaja de que una pequeña diferencia entre los coeficientes hidráulicos reales y los supuestos, puede ocasionar que el salto se mueva hacia aguas abajo

*Caso 2:* Ocurre cuando  $y_2' < y_2$  resultado de lo cual el salto se corre hacia aguas abajo hasta un punto en el que las dos curvas superficiales tengan profundidades conjugadas, esto es, que satisfagan la ecuación (1). Este caso debe ser evitado ya que la posición del salto es muy inestable y pudiera incluso ocurrir que se desplace lo suficiente como para salirse de las losas que protegen al fondo.

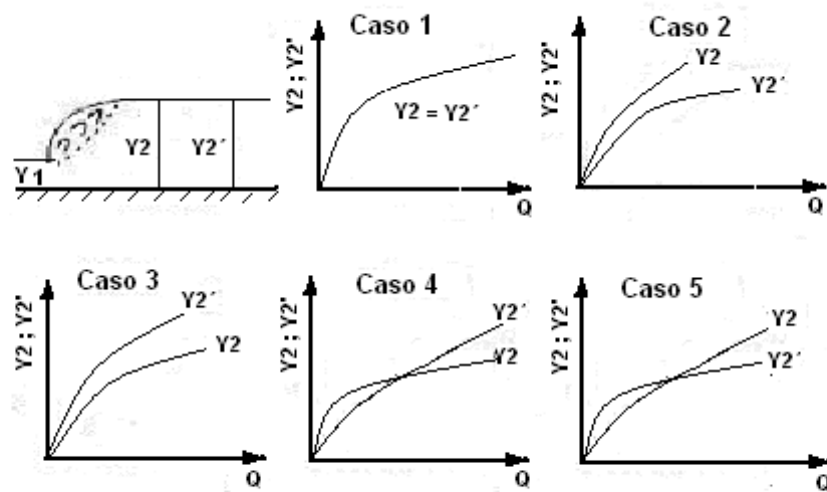
*Caso 3:* Ocurre cuando  $y_2' > y_2$  lo que origina que sea un salto sumergido o ahogado. Tiene la ventaja de ser muy estable la posición del salto, pero el ahogo le resta de manera sensible capacidad disipadora; además si se trata del salto a la salida de una rápida, el mismo treparía en la rápida lo cual es totalmente indeseable pues por lo general llevaría al fallo de la rápida.



**Figura 5. Posición del salto** [Fuente: Ven Te Chow (1988)]

### Condiciones aguas abajo

En el inciso anterior se asumió que la profundidad aguas abajo tiene un valor fijo  $y_2$ , pero en la mayoría de los problemas prácticos no es así, sino que este nivel varía con el gasto en el canal de salida al igual que también lo hace  $y_2$ . En correspondencia con lo anterior Leliavsky (figura 6) sugirió cinco posibles condiciones o clases.



**Figura 6. Casos aguas abajo** [Fuente: Ven Te Chow (1988)]

*Clase 1:* En esta condición las dos curvas de variación siempre coinciden, es decir, que el caso 1 en cuanto a la posición del salto es el que siempre tiene lugar. Es la situación ideal para el diseño del dissipador, pero casi nunca se da en la realidad.

*Clase 2:* En esta condición la curva de la conjugada  $y_2$  está siempre por encima de la de niveles  $y_2'$ , es decir, que el caso 2 de la posición siempre tiene lugar y el salto permanece corrido hacia aguas abajo y para asegurarse que el salto ocurra sobre el lecho protegido y en el lugar deseado, la solución efectiva es un pozo amortiguador o un estanque amortiguador con umbral terminal.

*Clase 3:* Esta representa la condición en que la curva de conjugadas  $y_2$  está siempre por debajo de la de  $y_2'$ . Esto significa la constancia del caso 3 de las posiciones. Es aconsejable evitar esta situación bajando o inclinando la solera al pie del cimacio; cambiar la pendiente o concluir antes la rápida o ambas, etc.

*Clase 4:* En esta condición para gastos pequeños  $y_2$  es mayor que  $y_2'$ , mientras que para gastos grandes ocurre lo contrario. La solución más efectiva es combinar un pozo con una solera inclinada para desarrollar un salto satisfactorio para descargas altas.

*Clase 5:* En esta condición las conjugadas son menores que los tirantes de aguas abajo para gastos pequeños y a la inversa para gastos grandes. La solución más efectiva es colocar un umbral terminal para elevar los niveles  $y_2'$  de los gastos grandes y así evitar el corrimiento del salto.

### Tipos de salto

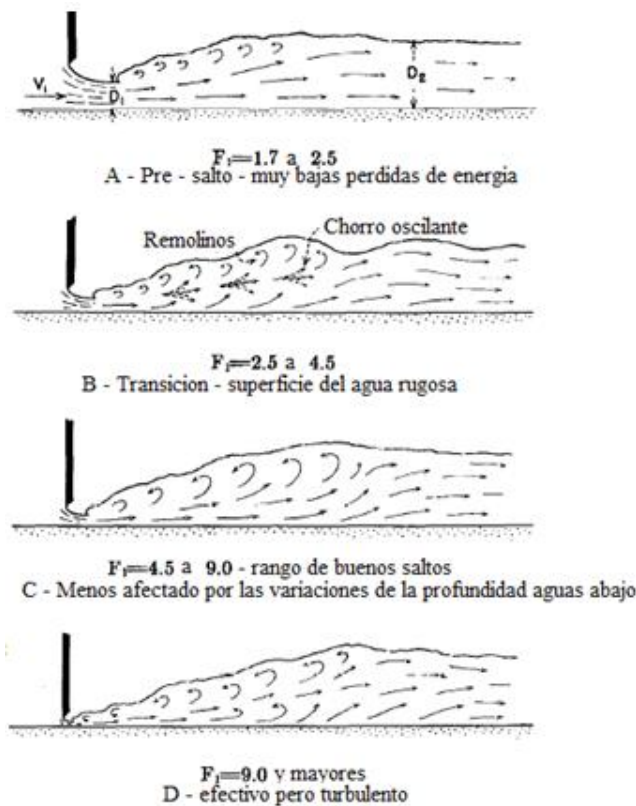
Los saltos se clasifican de acuerdo con el valor del número de Froude correspondiente a la sección inicial  $F_{r1}$ . Ver figura 7.



- $F_{r1} = 1 - 1,7$  Salto ondular.
- $F_{r1} = 1,7 - 2,5$  Salto débil, también conocido como estado de presalto.
- $F_{r1} = 2,5 - 4,5$  Salto oscilante, también conocido como estado transicional.
- $F_{r1} = 4,5 - 9,0$  Salto estable o bien balanceado.
- $F_{r1} > 9,0$  Salto fuerte.

Cuando el número de Froude  $F_{r1}$  vale uno el régimen es crítico y no se produce el salto hidráulico. Para valores de  $F_{r1}$  entre 1 y 1,7 solo se aprecian leves diferencias entre las profundidades  $D_1$  y  $D_2$  y ligeras perturbaciones en la superficie del agua marcan la diferencia con el régimen crítico.

Cuando el  $F_{r1}$  se aproxima a 1,7 aparecen pequeños remolinos en la superficie del agua, situación que se mantiene aunque con intensificación de los remolinos en la medida que  $F_{r1}$  se aproxima a 2,5. Para este rango no se requiere de estanques especiales y la disipación de energía es de aproximadamente un 20%.



**Figura 7. Tipos de salto hidráulico atendiendo al valor del número de Froude**  
[Fuente: Peterka (1984)]

La figura 7B muestra el tipo de salto que tiene lugar para valores de  $F_{r1}$  entre 2,5 y 4,5. Este tipo tiene una acción pulsante y se encuentra frecuentemente para estructuras con baja carga. El chorro de entrada oscila intermitentemente del fondo a la superficie y viceversa sin seguir ninguna periodicidad; la turbulencia tiene lugar cercana al fondo y un instante después próxima a la superficie.

Cada oscilación produce una gran ola en la superficie del agua que se traslada por varios kms hacia aguas abajo causando daños en las márgenes del canal. Este problema es de tal importancia que se le han dedicado estudios especiales para lograr la solución que se muestra en el artículo “Disipadores de energía - parte II: pozo y estanque amortiguador”.

Un salto hidráulico estable se produce para el rango de  $F_{r1}$  comprendido entre 4,5 y 9,0, figura 7C. En este rango el punto de la superficie donde terminan los remolinos superficiales prácticamente cae en la misma sección en la que el chorro de alta velocidad tiende a abandonar el fondo. El salto es bien balanceado y la disipación de energía oscila entre 45 y 70%.

Cuando el  $F_{r1}$  se incrementa y supera el valor de 9, se aproxima a la forma de la figura 7D; la velocidad de entrada  $V_1$  es muy alta, mientras que  $D_1$  es comparativamente muy pequeño y la diferencia entre conjugadas es alta; el chorro de alta velocidad no alcanza toda la longitud del salto, de manera que los remolinos de la superficie son el factor determinante para establecer la longitud del salto.

La superficie muy turbulenta del agua actúa sobre el chorro de alta velocidad de manera intermitente provocando la aparición de oleaje irregular que viaja aguas abajo. La energía disipada es superior a 85%.

Precisamente esta clasificación del salto hidráulico en función del número de Froude también se ha utilizado para la estandarización de los estanques amortiguadores, lo que se podrá apreciar en el mismo artículo arriba mencionado.

Algunas consideraciones iniciales acerca del salto hidráulico como disipador de energía son las siguientes:

1. Todos los tipos de saltos presentados en la figura 7 tienen soluciones para el uso de estanques amortiguadores.
2. La forma de la figura 7A no requiere la presencia de accesorios en el estanque amortiguador. El único requerimiento es dar al estanque una longitud igual a la del salto, la cual es relativamente pequeña.
3. La forma de la figura 7B presenta problemas por la existencia de oleaje. El empleo de accesorios en el estanque es poco relevante. Siempre que sea posible se debe evitar este tipo de salto, aunque en aliviaderos de poca carga, obras de toma y obras en canales se presenta con frecuencia y en esos casos se deben seguir los criterios que se exponen en el antes citado artículo.

4. No se encuentran dificultades para el diseño de estanques para la forma 7C. El empleo de dientes deflectores, umbral terminal y/o dados amortiguadores suelen ser formas efectivas para reducir la longitud del estanque amortiguador. En el antes citado artículo se presentan detalles para el diseño.
5. En la medida que  $F_{r1}$  crece, más sensible es el salto a las condiciones de aguas abajo; para valores cercanos y por debajo de 8 el tirante de aguas abajo mayor que la profundidad conjugada es una medida efectiva para garantizar que el salto se mantenga en la solera. En el arriba referido artículo se ampliará este aspecto.
6. Cuando el  $F_{r1} > 10$ , la diferencia entre las profundidades conjugadas es muy grande y por lo general se requieren estanques muy profundos con altas paredes laterales. En aliviaderos muy altos el estanque amortiguador puede ser una solución muy cara. El empleo del disipador tipo cubeta deflectora o el trampolín, suelen ser soluciones más atractivas.

## CONCLUSIONES

- Las características del salto hidráulico permiten su empleo como disipador de energía en obras hidráulicas.
- Las principales herramientas para el cálculo del salto hidráulico que se han recopilado a partir de la literatura especializada, han sido procesadas para presentar ecuaciones polinómicas que facilitan el empleo de las mismas mediante sistemas informáticos.

## RECONOCIMIENTO

El autor desea dejar constancia de su agradecimiento al actual ingeniero Dayron Martí Díaz, quien como estudiante de ingeniería hidráulica culminó sus estudios mediante la tesis de grado “Disipadores de energía” tutelado por el autor del presente trabajo, la cual fue de inestimable ayuda para el logro de los presentes trabajos.

## REFERENCIAS

- Agroskin I. I.** (1964). “Hidráulica” (en ruso), Editorial Energía, Moscú.
- Chow V. T.** (1988). “Hidráulica de canales abiertos”. Traducción al español. Editorial Nomos, ISBN: 958-600-228-4. Bogotá, Colombia.
- Kiceliiov P. C.** (1961) “Manual de Cálculos Hidráulicos” (en ruso), Editorial Energía, Moscú.
- Pardo R. y Alegret E.** (2012). “Diseño hidráulico de aliviaderos y obras de toma para presas”. Editorial Félix Varela, ISBN 978-959-07-1692-8, La Habana.
- Pardo R.** (2017). “Monografía sobre disipadores de energía”. ISBN: 978-959-261-565-6. Departamento de Ediciones CUJAE, La Habana, Cuba.
- Peterka A. J.** (1984). “Hydraulic design of stilling basins and energy dissipators”. Engineering monograph No. 25. United States Bureau of Reclamation (USBR). Denver, Colorado, USA.