

Hydraulic evaluation of energy dissipation in four types of buffer basins, under variable flow conditions

Luis Vásquez^{*,a}, Nelson Terrones^b

^aFacultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Cajamarca, Perú.

^bFacultad de Ingeniería, Universidad Privada del Norte, Cajamarca, Perú.

Abstract.- The present investigation is focused on experimentally determining the dissipation of hydraulic energy for different types of buffer basins. For this purpose, a series of tests were developed in the laboratory under six flow conditions, so that six experimental data per bowl were obtained. The structures under study are type I, II, III and IV bowls according to the classification of the U.S. Bureau of Reclamation; bowls that dissipate energy mainly by the formation of the hydraulic shoulder and secondly by the presence of deflector dies, impact blocks and exit thresholds. Each bowl has been designed and sized according to the characteristics of the variable slope channel, for flow conditions tested with Froude numbers between 4,08 and 5,99. Finding that the type III damper bowl is the one that best dissipates the energy with the shortest bowl length for flows close to the design, with the disadvantage that the length of the hydraulic shoulder for flow rates far beyond exceeds the length of the bowl; while for all the flow rates tested, the type IV damping bowl presents the highest values of energy dissipation with hydraulic projections formed inside the bowl, with a better return of flow downstream.

Keywords: hydraulic jump; energy dissipation; specific energy; stilling basin.

Evaluación hidráulica de la disipación de energía en cuatro tipos de cuencos amortiguadores, bajo condiciones de flujo variable

Resumen.- La presente investigación está enfocada en determinar de manera experimental la disipación de energía hidráulica para diferentes tipos de cuencos amortiguadores. Para tal propósito, se desarrolló en laboratorio una serie de ensayos bajo seis condiciones de flujo, de manera que se obtuvieron seis datos experimentales por cuenco. Las estructuras en estudio son los cuencos tipo I, II, III y IV según la clasificación de la U.S. Bureau of Reclamation; cuencos que disipan la energía principalmente por la formación del resalto hidráulico y en segunda medida por la presencia de dados deflectores, bloques de impacto y umbrales de salida. Cada cuenco ha sido diseñado y dimensionado de acuerdo a las características del canal de pendiente variable, para las condiciones de flujo ensayadas con números de Froude entre 4,08 y 5,99. Se encontró que el cuenco amortiguador tipo III es el que disipa mejor la energía con menor longitud de cuenco para caudales cercanos al de diseño, con la desventaja que la longitud del resalto hidráulico para caudales alejados de este supera la longitud del cuenco; mientras que para todos los caudales ensayados el cuenco amortiguador tipo IV presenta los mayores valores de disipación de energía con resaltos hidráulicos formados dentro del cuenco, restituyendo mejor el flujo aguas abajo.

Palabras clave: resalto hidráulico; disipación de energía; energía específica; cuenco amortiguador.

Recibido: 07 de diciembre, 2018.

Aceptado: 09 de mayo, 2019.

1. Introducción

En el mundo existen miles de estructuras hidráulicas tipo vertedero de pared gruesa (rebosadero) que cumplen la función de regular o derivar flujos de agua, en las que su ubicación

genera una energía potencial que tiene que ser disipada, aguas abajo, para devolver al sistema sus condiciones naturales de flujo en su posterior recorrido. En un inicio, el ingeniero tenía que hacer uso del sentido común en el diseño de presas ya que carecía de los conocimientos más indispensables para prever las consecuencias de su emplazamiento como elemento obstructor del flujo y, desde luego, para proyectar la solera o el pie de aquella. El conocimiento del fenómeno del resalto hidráulico y las posteriores investigaciones

*Autor para correspondencia:

Correo-e: luvasram@hotmail.com (L. Vásquez)

realizadas por Gibson, Riegel y Bebe (1917), Safranzen (1927) y otros muchos a partir de la década de los treinta fueron fundamentales en la concepción y diseño hidráulico [1]. Investigadores como Peterka [2] en la década de los sesenta, presentan estudios experimentales orientados a la disipación de energía a partir del resalto hidráulico controlado, planteándose cuatro tipos de cuencos amortiguadores (I, II, III y IV) según la clasificación de la U.S. Bureau of Reclamation.

En la actualidad, investigadores como Ead y Rajaratnam [3], Chanson [4], Alikhani y Fathi [5], orientan sus trabajos experimentales al estudio del resalto hidráulico y la disipación de energía para estructuras con cuencos amortiguadores no convencionales, conscientes que el conocimiento general es insuficiente a la hora de diseñar estructuras singulares. Así mismo, Nasiri, Kavianpour y Haghighi [6], encuentran que debido a la característica fluctuante inherente del salto hidráulico, el piso del cuenco amortiguador está sujeto a variaciones de presión, lo que resulta en una inestabilidad de dicha estructura debido a las fuerzas de levantamiento. Liu y Zhu [7], cuando estudian la estructura del resalto hidráulico para números de Froude en el intervalo (2; 3,32), encuentran que la energía cinética de turbulencia máxima en cada sección disminuye linealmente con la distancia longitudinal dentro del salto y gradualmente se nivela en la región de transición, en contraposición con Gualtieri y Chanson [8] quienes, al experimentar con números de Froude altos en el intervalo (5,2; 14,3), llegaron a la conclusión que las capas de difusión de aire se estabilizan a longitudes mucho más grandes.

Manrique [9], en su investigación determina que la relación entre la pérdida de energía y la energía inicial ($\Delta E/E_1$) varía en proporción directa con el número de Froude. Esta aseveración permitirá evaluar la disipación de energía respecto a diversas condiciones de flujo en el canal de pendiente variable de manera que se logre demarcar dos aspectos: la disipación que genera el cuenco en función del número de Froude y el caudal.

Por otro lado, Ortega [10] determina que el porcentaje de disipación está entre un 65 % y un 86 % para los caudales representativos de

la estructura, observando que la disipación es inversamente proporcional al caudal. Adicionalmente, se realizaron modificaciones a este tipo de disipador colocando una viga intermedia que permitió sumergir el resalto hidráulico y de este modo disminuir su longitud, llegando a obtener disipaciones entre un 68 % y un 87 % conservando la relación inversa entre caudal y disipación. Las dos estructuras disipadoras propuestas en la investigación generan una considerable disipación cumpliendo con los requerimientos del flujo a la salida de la estructura, confirmando la eficiencia de estas en las obras de control y restitución de flujo.

Nasiri [6], Hassanpour [11] y Abbas [12], han investigado el efecto de los parámetros geométricos e hidráulicos en el resalto hidráulico y su influencia en la disipación de la energía en los cuencos amortiguadores utilizando bloques amortiguadores con diferentes configuraciones, teniendo como base los cuencos convencionales; estos resultados generan nuevas incógnitas que tienden a profundizar el conocimiento, ya que si se tiene en cuenta que se está variando la rugosidad general, según el tamaño y ubicación de cada bloque, es lógico pensar que se tendrán condiciones de flujo particulares en cada distribución analizada. Por ello Shahid [13] y Mortazavi [14] investigan los efectos del flujo en dos fases agua-aire y la presión interna en el resalto hidráulico enfocándolo a la estabilidad del cuenco amortiguador. En [15] intentan, a partir de una ecuación semi-analítica, estimar la longitud del resalto hidráulico, la cual es limitada, pues a pesar de sus 387 series de datos utilizadas para su calibración y validación, no se puede generalizar, limitando su aplicación a condiciones de flujo validadas.

La disipación de energía en la descarga de vertederos sobre cuencos amortiguadores a partir del resalto hidráulico ha recibido mucha atención en los últimos años, pues según Palermo y Pagliara [16], la importancia del tema aún requiere importantes esfuerzos por parte de la comunidad científica. A saber, la predicción de las longitudes principales del salto hidráulico y la disipación de energía sigue siendo una pregunta abierta, ya que el conocimiento real sobre el tema no cubre

todas las configuraciones posibles y condiciones de contorno que generalmente se pueden encontrar en aplicaciones prácticas. En particular, los efectos de la rugosidad del lecho, la pendiente de este, la geometría del canal y la concentración del aire en la relación de las profundidades del conjugado aún no se comprenden completamente.

La presente investigación busca ampliar el conocimiento sobre la predicción de las longitudes principales del salto hidráulico y la disipación de energía, analizando la relación funcional entre dichas variables a través de la experimentación en cuatro tipos de cuencos amortiguadores comunmente utilizados, según la U.S. Bureau of Reclamation (USBR), que por la naturaleza de uso deben funcionar bajo condiciones de flujos variable, dado que, en la realidad, la gran mayoría de cuencos amortiguadores de estructuras de almacenamiento o derivación descargan sus flujos en lechos naturales compuestos por materiales de rigidez mucho menor a la del material utilizado en la construcción del cuenco amortiguador, lo que conlleva a problemas de erosión y socavación aguas abajo de la descarga, que genera la desestabilización estructural del cuenco, comprometiendo en muchos casos también la estabilidad del rebosadero.

2. Aspectos teóricos

2.1. Resalto hidráulico

El resalto o salto hidráulico es un fenómeno local que se presenta en flujo rápido variado, el cual siempre va acompañado por un aumento súbito del tirante y una pérdida de energía bastante considerable (disipada principalmente como calor), en un tramo relativamente corto. Ocurre en el paso brusco de régimen supercrítico (rápido) a régimen subcrítico (lento).

En un resalto se pueden realizar las siguientes observaciones:

1. Antes del resalto, cuando el agua todavía escurre en régimen rápido, predomina la energía cinética de la corriente, parte de la cual se transforma en calor (pérdida de energía) y parte en energía potencial (incremento del

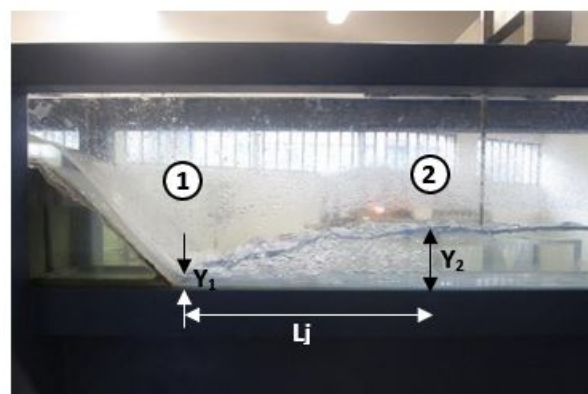


Figura 1: Elementos del resalto hidráulico.

tirante); siendo ésta la que predomina después de efectuado el fenómeno.

2. En la Figura 1 las secciones 1 y 2 marcan esquemáticamente el principio y el final del resalto. Los tirantes y_1 y y_2 se denominan tirantes conjugados, donde:

- y_2 : tirante conjugado mayor.
- y_1 : tirante conjugado menor.

3. E_1 es la energía específica antes del resalto y E_2 es la energía específica que posee la corriente después de él. Pues la energía específica en la sección 2 es menor que en 1 debido a las fuertes pérdidas de energía útil que el fenómeno ocasiona; esta pérdida o disipación se presenta como: $\Delta E = E_1 - E_2$.

2.2. Ecuación general del resalto hidráulico

Ya que la pérdida de energía asociada con el resalto hidráulico se desconoce al inicio, la aplicación de la ecuación de energía antes y después del resalto no proporciona un medio adecuado de análisis, siendo más adecuada la aplicación de la cantidad de movimiento en el estudio del fenómeno, debido a la gran variación de la velocidad media entre los dos extremos del resalto y al hecho de que no se requiere conocer los cambios de energía interna [17]. Aplicando la ecuación de la cantidad de movimiento, considerando que se satisfacen las siguientes condiciones:

1. El canal es horizontal y de sección constante, pudiendo despreciarse la componente del peso del fluido.

- Se deprecia la resistencia de fricción originada en la pared del canal, debido a la poca longitud del tramo en que se desarrolla el resalto.
- Se considera que la distribución de velocidades en las secciones 1 y 2 de la Figura 1, es prácticamente uniforme y que los coeficientes de Boussinesq son: $\beta_1 = \beta_2 = 1$.

Resulta la ecuación (1).

$$\delta Q(V_1 - V_2) = F_{P_1} - F_{P_2} \quad (1)$$

Donde:

ρ : Densidad del fluido [kg/m^3].

Q : Flujo volumétrico [m^3/s].

V_1, V_2 : Velocidades de flujo [m/s].

F_{P_1}, F_{P_2} : Fuerzas hidrostáticas [N].

A partir de la ecuación (1) se logra determinar la ecuación (2) de la energía específica, de la cual se deduce la ecuación general del resalto hidráulico, ecuación (3).

$$\frac{Q^2}{gA_1} + \bar{y}_{G_1}A_1 = \frac{Q^2}{gA_2} + \bar{y}_{G_2}A_2 \quad (2)$$

$$\bar{y}_{G_2}A_2 - \bar{y}_{G_1}A_1 - \frac{Q^2}{g} \left(\frac{A_2 - A_1}{A_1A_2} \right) = 0 \quad (3)$$

Donde:

g : aceleración de la gravedad [m/s^2].

A_1, A_2 : Áreas de sección transversal [m^2].

$\bar{y}_{G_1}, \bar{y}_{G_2}$: Profundidad de centros de gravedad [m].

Para el caso de la sección rectangular, utilizada en la presente investigación, $\bar{y}_{G_1}$ y $\bar{y}_{G_2}$ están representadas por la mitad del tirante y_1 y y_2 respectivamente, resultando la ecuación (4).

$$\frac{y_2}{y_1} = \frac{1}{2} \left(\sqrt{8(F_{r1})^2 + 1} - 1 \right) \quad (4)$$

Ecuación que permite calcular el tirante conjugado mayor en un canal de sección rectangular, conocido el tirante menor y el número de Froude (F_{r1}) indicado en la ecuación (5).

$$F_{r1} = \frac{V_1}{\sqrt{gy_1}} \quad (5)$$

2.3. Estabilidad de resalto hidráulico

Lo que determina el sitio de formación del resalto y la estabilidad de este resulta de la comparación entre las energías que se tengan en las secciones 2 y n . Se pueden presentar tres casos [18]:

- $E_2 > E_n$: en este caso la energía en la sección 2 es mayor que la existente en n , por lo que puede pensarse fácilmente que para que no exista discontinuidad en las energías a lo largo del canal, el resalto tendrá que ser barrido, como se muestra en la Figura 2.

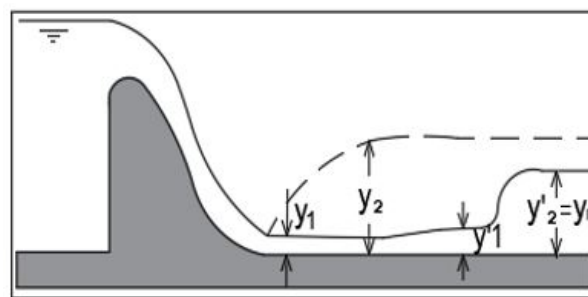


Figura 2: Resalto barrido ($E_2 > E_n$) [18].

- $E_2 = E_n$: representado en la Figura 3, es el caso más conveniente y el más estable, ya que se genera el resalto justamente en el lugar deseado (al pie de la estructura o del canal de llegada); sucede que las pérdidas generadas en el resalto son exactamente las deseadas para igualar la energía en n y el flujo no precisa barrerse para generar más energía. Por lo que el resalto será claro.

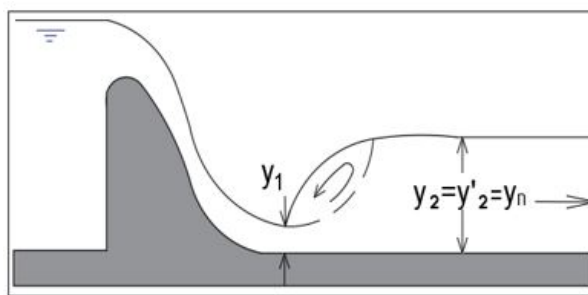


Figura 3: Resalto claro ($E_2 = E_n$) [18].

- $E_2 < E_n$: cuando ocurre esto, como se aprecia en la Figura 4, la energía en la sección n por

ser mayor que la energía remanente del resalto en 2, y por estar determinada la energía de la sección en su mayor parte por la altura de presión (tirante) se presentará un resalto ahogado.

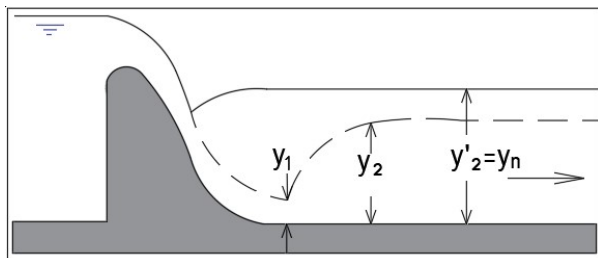


Figura 4: Resalto ahogado ($E_2 < E_n$) [18].

2.4. Disipación de energía hidráulica

Con el objetivo de minimizar los efectos debido a las perturbaciones introducidas en el régimen natural por la ejecución de un aprovechamiento hidráulico, se hace necesario que la restitución de los caudales se haga en condiciones que se aproximen lo más posible a las condiciones naturales. Siendo así, se requiere que el exceso de energía, creada por la ejecución del aprovechamiento, se disipe sin que se verifiquen erosiones significativas en el lecho del río, aguas debajo de las obras, las cuales podrían poner en peligro su estabilidad [19].

2.5. Resalto hidráulico como disipador de energía

Chow [18] define la importancia del resalto hidráulico como disipador de energía y menciona que su mérito está en prevenir la posible erosión aguas abajo de un vertedero, rápidas o compuertas deslizantes, debido a que reducen rápidamente la velocidad del flujo sobre un piso protegido hasta un punto donde el flujo pierde su capacidad de socavar el lecho del canal natural aguas abajo. El resalto hidráulico utilizado como disipador de energía a menudo se confina parcial o totalmente en un tramo del canal que se conoce como cuenco de disipación, cuyo fondo se recubre para resistir la socavación. El cuenco disipador rara vez se construye para confinar toda la longitud de un resalto hidráulico libre sobre la zona revestida, debido a que sería

muy costoso. A menudo se instalan accesorios para controlar el resalto dentro del cuenco. El control tiene ventajas adicionales, debido a que mejora la función de disipación del cuenco, estabiliza la acción del resalto y, en algunos casos, incrementa el factor de seguridad [18].

2.6. Pérdida o disipación de Energía (ΔE)

La pérdida de energía en el resalto hidráulico es igual a la diferencia de las energías específicas antes y después del resalto. La pérdida se calcula a partir de la ecuación (6).

$$\Delta E = \left(y_1 + \frac{(v_1)^2}{2g} \right) - \left(y_2 + \frac{(v_2)^2}{2g} \right) \quad (6)$$

Operando esta ecuación se tiene la ecuación (7).

$$\Delta E = E_1 - E_2 = \frac{(y_1 - y_2)^3}{4y_1y_2} \quad (7)$$

Para French [20], la relación $\Delta E/E_1$ representa generalmente la pérdida o disipación de energía relativa, así como E_2/E_1 , define la eficiencia de disipación.

2.7. Cuencos amortiguadores de resalto hidráulico

La gran mayoría de las obras evacuadoras de crecidas, así como las presas derivadoras, utilizan este tipo de disipador de energía. La extensa experimentación desarrollada por USBR, entre 1952 y 1954, permitió entregar recomendaciones para diseñar estas obras con gran seguridad. Como se ha indicado, el número de Froude del torrente caracteriza el tipo de resalto en el tanque. Algunos diseños consultan bloques de impacto, para acortar la longitud del tanque, bloques dispersores del chorro en la entrada para dispersar mejor el torrente entrante, y umbrales de salida con bloques para asegurar la altura de aguas abajo y el control del resalto dentro del tanque [21].

2.8. Descarga en vertederos de pared gruesa tipo cimacio

La descarga en vertederos de pared gruesa como se muestra en la Figura 5, se puede determinar

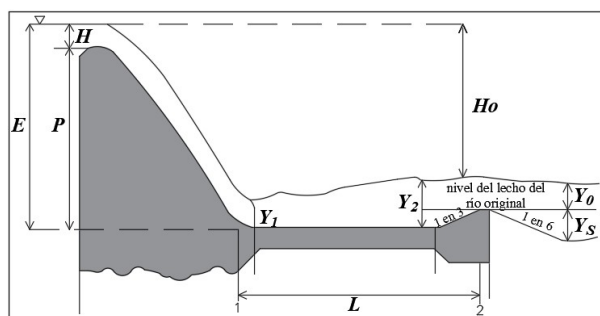


Figura 5: Esquema de rebosadero con cuenco de amortiguación de resalto hidráulico [22].

a partir de la ecuación (8), denominada ecuación general de vertederos.

$$q = C_d(H)^{\left(\frac{3}{2}\right)} \quad (8)$$

Donde:

q : Caudal unitario (Q/B) [m^2/s].

B : Ancho del canal [m].

H : Carga hidráulica [m].

C_d : Coeficiente de descarga.

3. Desarrollo de la Investigación

La investigación consta de tres fases:

3.1. Concepción, diseño y construcción de estructuras de disipación

Las estructuras de disipación seleccionadas en la presente investigación fueron los cuencos tipo I, II, III y IV según la clasificación de la USBR, por la presencia común en la gran mayoría de estructuras hidráulicas importantes, que deben funcionar bajo condiciones de flujo diferentes.

Los cuencos amortiguadores tipo I, II, III y IV fueron dimensionados con la metodología del USBR, en el canal de pendiente variable con sección rectangular de 25 cm $\times$ 30 cm y 6 m de largo, limitados por la altura útil en el canal sobre el rebosadero, por lo que se trabajó con un rebosadero de doble curvatura (tipo Creager), de acrílico, con una altura $P = 15$ cm con radios de curvatura de 2,5 cm y 1 cm y una longitud de base total de 12 cm en la posición que se muestra en la Figura 6, dimensiones ideales para conseguir cargas hidráulicas H que generen en la sección



Figura 6: Rebosadero de doble curvatura y cuenco amortiguador por resalto hidráulico.

comprimida números de Froude (F_r) típicos de resaltos estables.

Se dimensionaron los cuencos amortiguadores para una misma condición de flujo con cargas hidráulicas sobre el rebosadero, limitadas por la altura del canal de pruebas en el rango de 0 a 10 cm, tomando por conveniencia como carga teórica de diseño $H = 5$ cm, que generaría en la descarga un caudal teórico de 0,00612 m^3/s , un tirante comprimido ($y_1 = 1,21$ cm), y un número de Froude de 5,9 que encaja dentro de la clasificación de resaltos estables ($4,5 < F_r < 9$). El diseño de los cuencos amortiguadores tipo I, II, III y IV, quedaron definidos con sus elementos (dientes, bloques y umbrales) indicados en cada una de las Figuras 7, 8, 9 y 10 respectivamente, con las dimensiones siguientes:

- Tipo I: con una longitud $L = 57,27$ cm y una altura de umbral $h = 1,51$ cm.
- Tipo II: con una longitud $L = 37,87$ cm, $w_1 = h_1 = e_1 = 1,21$ cm, $w_2 = 1,42$ cm, $h_2 = 1,89$ cm y $e_2 = 1,42$ cm.
- Tipo III: con una longitud $L = 23,00$ cm, $w_1 = 1,21$ cm, $h_1 = 2,42$ cm, $e_1 = 3,02$ cm, $w_3 = 1,45$ cm, $h_3 = 1,94$ cm, $e_3 = 1,45$ cm y $h_4 = 1,63$ cm.
- Tipo IV: con una longitud $L = 56,80$ cm, $w = 1,21$ cm, $h = 2,42$ cm, y $e = 3,02$ cm.

Para generar condiciones de flujo variable, se seleccionaron seis caudales de prueba para cada

tipo de cuenco, que fueron para cargas hidráulicas H próximas a 4,5; 5,0; 5,5; 6,0; 6,5 y 7,0 cm limitados por las ondas generadas por las fluctuaciones antes de conseguir el caudal de prueba, ya que la altura máxima disponible (sin generar desborde) en el canal de experimentación fue de 10 cm.

1. Cuenco amortiguador tipo I: la Figura 7 muestra el cuenco tipo I, donde la disipación de energía se da a través de un resalto hidráulico que ocurre en una superficie plana sin elementos de disipación adicionales.

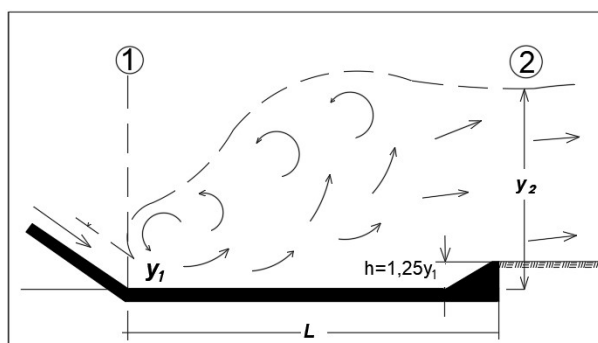


Figura 7: Cuenco de amortiguamiento tipo I [2].

2. Cuenco amortiguador tipo II: es mostrado en la Figura 8, compuesto por dados en la entrada del cuenco (aguas arriba) y un umbral dentado en la salida (aguas abajo).

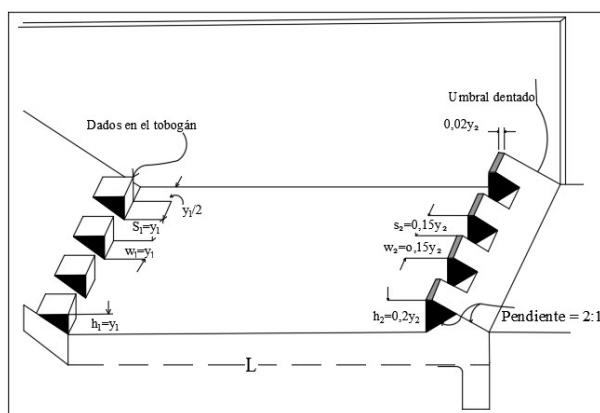


Figura 8: Dimensiones del cuenco tipo II [23].

3. Cuenco amortiguador tipo III: cuencos más cortos que los del tipo II, y poseen un umbral de salida y bloques de impacto aguas abajo de

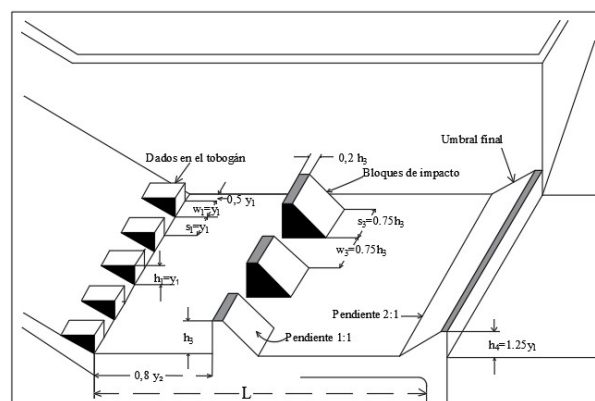


Figura 9: Dimensiones del cuenco tipo III [23].

los dados de caída, cuya distribución se ilustra en la Figura 9.

4. Cuenco amortiguador tipo IV: como puede visualizarse en la Figura 10, este cuenco amortiguador utiliza grandes dados en la rápida. Algunas veces es necesario emplear amortiguadores de ondas para asegurar una corriente tranquila, aguas abajo.

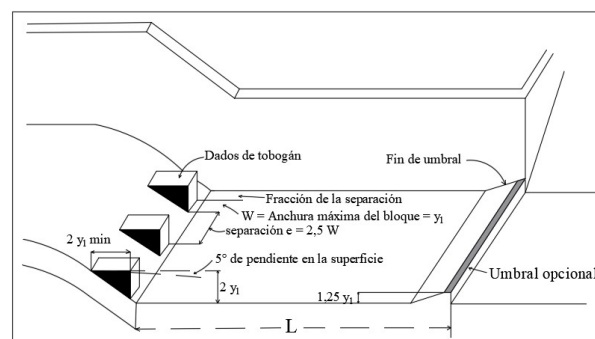


Figura 10: Dimensiones del cuenco tipo IV [23].

3.2. Experimentación y recolección de datos

Una vez construidos los cuencos amortiguadores, se puso en marcha el estudio experimental en cada una de las 4 estructuras de disipación así como en la condición sin cuenco amortiguador; pues cada una de ellas fueron ensayadas en laboratorio bajo las 6 condiciones de flujo, midiéndose en forma directa para cada uno de los 30 ensayos:

- La carga hidráulica H sobre el rebosadero, como se muestra en la Figura 11.

- Los tirantes conjugados mayor y_2 , menor y_1 y la longitud del resalto L en cada cuenco amortiguador.

Para poder estimar con caudales en cada condición de flujo se calibró el rebosadero de doble curvatura tipo Creager, con el método volumétrico para siete caudales diferentes con un ajuste gráfico, relacionando la carga hidráulica H y el caudal unitario q .



Figura 11: Medición de tirantes en modelo de laboratorio.

3.3. Procesamiento de datos

Los datos experimentales obtenidos en los 30 ensayos de laboratorio fueron registrados mediante las fichas de observación permitiendo determinar a partir de ellos, las principales variables físicas, como:

- Caudales volumétricos Q , a partir del caudal unitario q obtenido por medio de la ecuación de ajuste experimental en función de la carga hidráulica H medida.
- Velocidades de flujo (V_1 , V_2), calculadas con los caudales Q obtenidos en el ítem anterior y los tirantes y_1 y y_2 medidos en cada ensayo.
- Energías específicas (E_1 , E_2), calculadas a partir de las variables medidas y calculadas, utilizando las ecuaciones (6) y ((7)).

En el proceso experimental se han identificado como variables independientes el caudal de flujo

volumétrico Q y el tipo de cuenco amortiguador; mientras que como variables dependientes se tiene: la disipación de energía ($\Delta E = E_1 - E_2$) y la longitud del resalto hidráulico L_j . El procesamiento estadístico de datos es del tipo descriptivo y los resultados para su interpretación serán presentados en gráficos de barras y de dispersión, relacionando las variables independientes y dependientes en estudio.

4. Análisis y discusión de resultados

4.1. Ajuste experimental de la ecuación del caudal de descarga en rebosadero de doble curvatura.

En todo estudio experimental es importante la precisión, por lo que las descargas fueron obtenidas para cada cuenco amortiguador luego de un ajuste experimental para la ecuación (8), con un coeficiente de determinación $R^2 = 0,998$, resultando la ecuación (9):

$$q = 3,1587(H)^{1,6539} \quad (9)$$

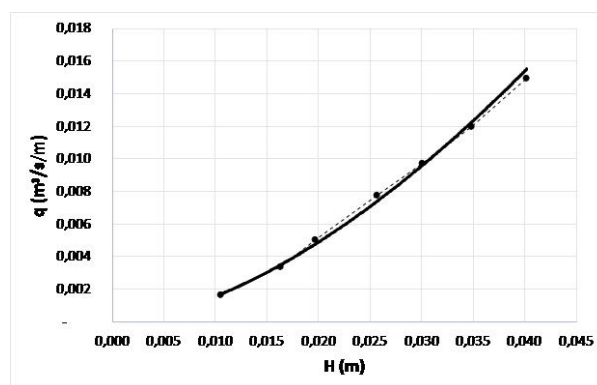


Figura 12: Ajuste experimental de la relación caudal unitario (q) contra la carga hidráulica (H).

En la Figura 12, se muestra la curva de ajuste que permitió encontrar los caudales de prueba para las seis condiciones de carga ensayadas para cada cuenco amortiguador.

4.2. Relación entre la disipación de energía (ΔE) y el caudal (Q)

El comportamiento de la disipación de energía en función de los caudales experimentales se muestra

en la Figura 13, pues en ella se puede observar que la mayor disipación se produjo para el caudal de $0,00562 \text{ m}^3/\text{s}$ llegando a disipaciones de: 60,09 %; 60,10 %; 54,86 %; 59,93 % y 61,70 % para el rebosadero sin cuenco de amortiguamiento, cuenco tipo I, II, III, y IV respectivamente.

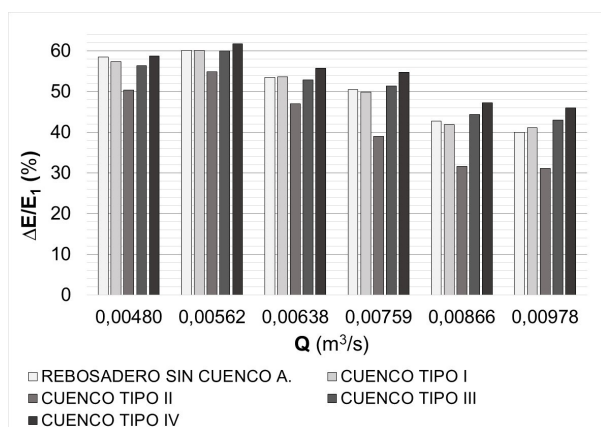


Figura 13: Relación de la disipación de energía relativa ($\Delta E/E_1$) contra el caudal (Q).

Para el caudal experimental menor a $0,00562 \text{ m}^3/\text{s}$ el porcentaje de disipación disminuye al igual que para los caudales mayores a dicho valor; esto implica que las estructuras de amortiguamiento cumplen mejor su función de disipación bajo este caudal, valor obtenido con la carga hidráulica de ($H = 0,05 \text{ m}$), poniendo en evidencia el mejor funcionamiento de las estructuras para valores cercanos al caudal teórico de diseño ($Q = 0,00612 \text{ m}^3/\text{s}$). También se puede observar que, a medida que el caudal incrementa, la disipación de energía disminuye, estableciéndose una relación inversa entre estas dos variables, lo que concuerda con lo encontrado por Ortega [10].

4.3. Relación entre la disipación de energía (ΔE) y el número de Froude (F_r)

En la Figura 14, se observa el comportamiento de la disipación de energía en función del número de Froude, notándose un aumento en la disipación a medida que el número de Froude va creciendo, generándose una relación directa entre estas dos variables.

Por otro lado, se puede apreciar que el número de Froude en el proceso experimental está comprendido en el intervalo (4,08; 5,99),

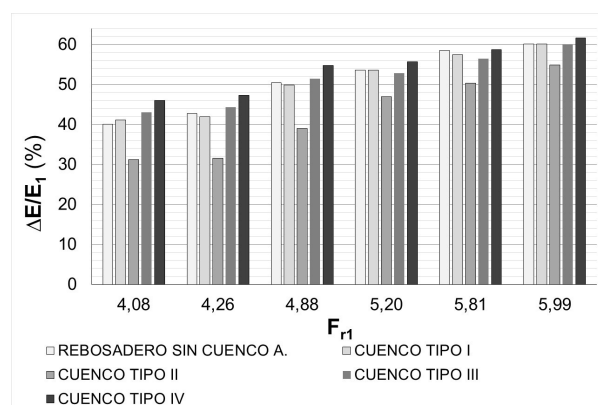


Figura 14: Relación de la disipación de energía relativa ($\Delta E/E_1$) contra el número de Froude (F_{r1}).

valores que entran en una clasificación de resalto estable. Teóricamente la disipación de energía por resalto hidráulico estable está entre 40 % y 50 %; experimentalmente se puede apreciar que los valores de la disipación de energía generados solo por resalto hidráulico (ensayo en rebosadero sin cuenco de amortiguamiento) están comprendidos entre 40,07 % y 60,09 %, porcentajes cercanos a los valores teóricos.

4.4. Relación entre la longitud del resalto hidráulico (L_j) y el caudal (Q)

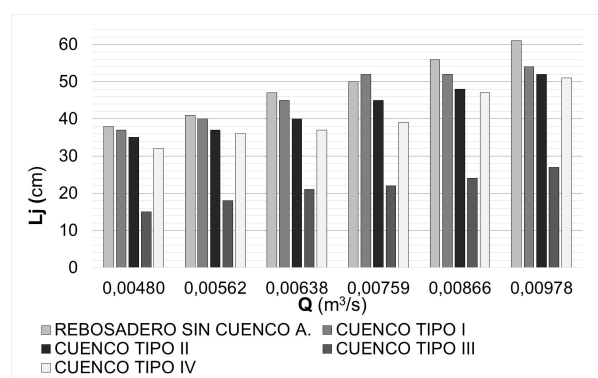


Figura 15: Relación de la longitud de resalto (L_j) contra el caudal (Q).

En la Figura 15 se puede observar que el máximo control sobre el resalto lo genera el cuenco tipo III, logrando una longitud de resalto mínima de 15,00 cm para un caudal de $0,00480 \text{ m}^3/\text{s}$ y una longitud de resalto máxima de 27,00 cm para un caudal de $0,00978 \text{ m}^3/\text{s}$, esto en comparación

con los 38 cm y 62 cm de longitud mínima y máxima de resalto para el rebosadero sin cuenco de amortiguamiento bajo las mismas condiciones de flujo, evidencia un control mucho mayor del cuenco tipo III en comparación a las demás estructuras. Además, se puede notar que la longitud del resalto se incrementa a mayor caudal, evidenciando una relación directa entre estas dos variables.

4.5. Relación entre la longitud del resalto hidráulico (L_j) y la disipación de energía (ΔE)

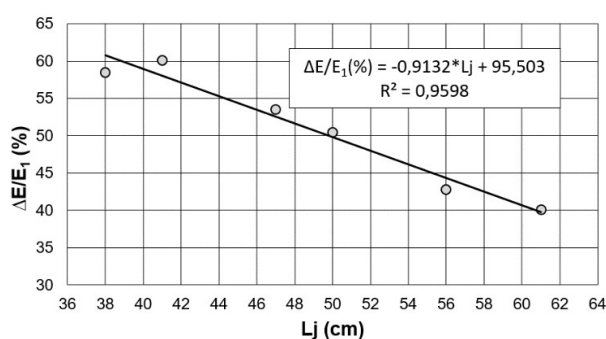


Figura 16: Relación de la longitud de resalto hidráulico (L_j) contra la disipación de energía relativa ($\Delta E/E_1$) en rebosadero sin cuenco amortiguador.

En la Figura 16 se observa una línea de tendencia con pendiente negativa, de la que se puede inferir que a medida que se aumenta la longitud del resalto, se reduce la disipación de energía considerando que el coeficiente de determinación es cercano a uno. Esto implica que la mejor disipación lograda por el cuenco corresponde a una longitud donde el resalto es claro, estable y contenido dentro del cuenco; además, a medida que el resalto va ganando distancia, la disipación disminuye, formando un resalto con ondulaciones muy marcadas que se desplazan a una gran distancia aguas abajo.

En la Figura 17 se observa una línea de tendencia con pendiente negativa, de la que se puede inferir que a medida que se aumenta la longitud se reduce la disipación de energía en virtud que el coeficiente de determinación es cercano a uno. Además, para este cuenco tipo I la longitud del resalto va desde 37 cm a 54 cm, manteniendo en todo momento el

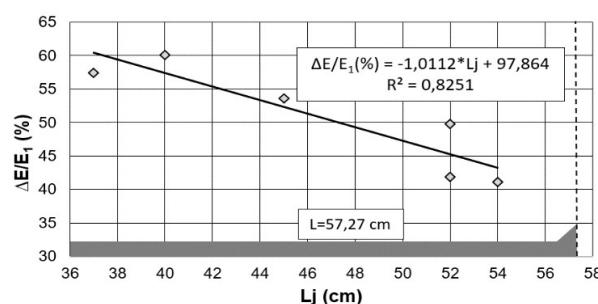


Figura 17: Relación de la longitud de resalto hidráulico (L_j) contra la disipación de energía relativa ($\Delta E/E_1$) en cuenco tipo I.

resalto dentro de su estructura, ya que la longitud de diseño del cuenco amortiguador es de 57,27 cm.

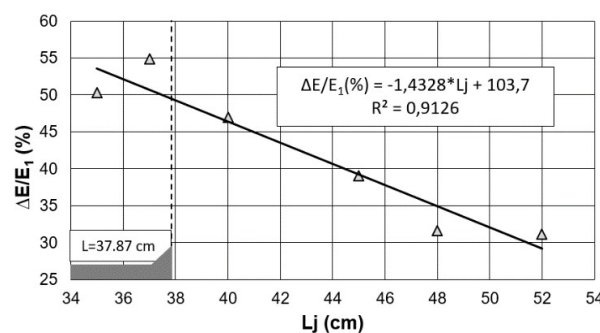


Figura 18: Relación de la longitud de resalto hidráulico (L_j) contra la disipación de energía relativa ($\Delta E/E_1$) en cuenco tipo II.

Para el cuenco tipo II de la Figura 18, la longitud de resalto va desde 35 cm hasta 52 cm disminuyendo la longitud en función del cuenco tipo I, sin embargo, para caudales mayores o iguales a $0,00638 \text{ m}^3/\text{s}$ el resalto se genera fuera del cuenco (longitud de diseño de cuenco de 37,87 cm), lo que significa que el disipador ya no cumple su función de contener el resalto dentro de su estructura.

Para el cuenco tipo III, cuyos resultados se muestran en la Figura 19, se infiere que a medida que se aumenta la longitud del resalto se reduce la disipación de energía en virtud que el coeficiente de determinación para la línea de tendencia es cercano a uno. Además, se puede notar que es la estructura de mayor control sobre el resalto generando longitudes que van desde los 15 cm a los 27 cm, sin embargo, para caudales mayores o iguales a $0,00866 \text{ m}^3/\text{s}$, parte del resalto se genera

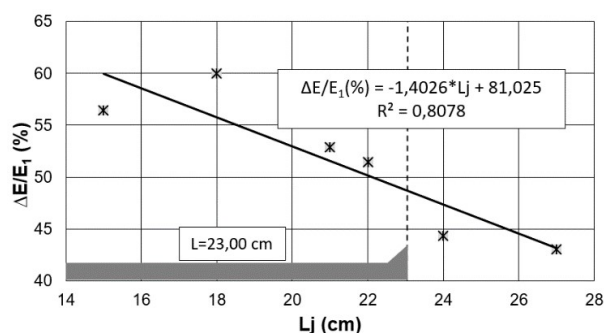


Figura 19: Relación de la longitud de resalto hidráulico (L_j) contra la disipación de energía relativa ($\Delta E/E_1$) en cuenco tipo III.

fuera del cuenco por lo que no cumple con su función de retener el resalto ya que la longitud de diseño del cuenco es de 23 cm.

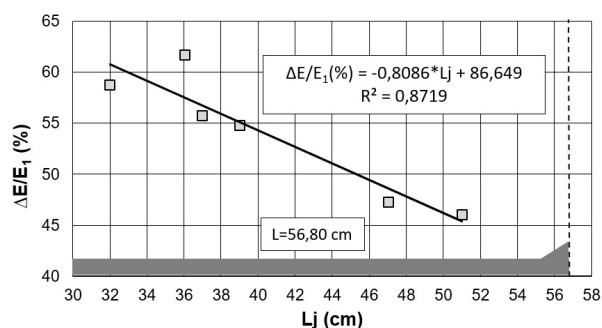


Figura 20: Relación de la longitud de resalto hidráulico (L_j) contra la disipación de energía relativa ($\Delta E/E_1$) en cuenco tipo IV.

Para el cuenco tipo IV (Figura 20), las longitudes del resalto que van desde 32 cm para el caudal menor hasta 51 cm para el caudal mayor, todos los resaltos se desarrollan dentro de la longitud de diseño del cuenco de 56,80 cm.

5. Conclusiones.

Para las condiciones de flujo ensayadas con números de Froude en el intervalo (4,08; 5,99), el cuenco amortiguador tipo III es el que disipa mejor la energía con menor longitud de cuenco para caudales cercanos al de diseño con la desventaja que la longitud del resalto hidráulico para caudales alejados de éste supera la longitud del cuenco, mientras que para todos los caudales ensayados el cuenco amortiguador tipo IV presenta los

mayores valores de disipación de energía con resaltos hidráulicos formados dentro del cuenco, restituyendo mejor el flujo, aguas abajo.

La disipación de energía y la longitud del resalto hidráulico claramente indican una fuerte tendencia decreciente, con coeficientes de determinación (R^2) que superan el 80 % para todas las condiciones de flujo ensayadas tanto para el rebosadero sin cuenco amortiguador como en los cuencos tipo I, II, III y IV (según la USBR).

6. Referencias

- [1] J. Díez-Cascón y F. Bueno. *Ingeniería de presas: presas de fábricas*. Universidad de Cantabria, 2001.
- [2] A. Peterka. *Hydraulic design of stilling basins and energy dissipators*. Engineering Monograph N° 25, United States Department of the Interior Bureau of Reclamation, United States, 1964.
- [3] S. Ead and N. Rajaratnam. Hydraulic jumps on corrugated beds. *Journal of Hydraulic Engineering*, 128(7):656–663., 2002.
- [4] H. Chanson. *Hidráulica del flujo en canales abiertos*. McGraw-Hill, 2002.
- [5] A. Alikhani, R. Behrozi-Rad, and M. Fathi-Moghadam. Hydraulic jump in stilling basin with vertical end sill. *International journal of physical sciences*, 5(1):25–29, 2010.
- [6] K. Nasiri, M. Kavianpour, and S. Haghighi. The baffle blocks effects of pressure characteristics on USBR III basin floor. In *Advances in Hydrology and Hydraulic Engineering*, volume 212-213 of *Applied Mechanics and Materials*, pages 821–825. Trans Tech Publications Ltd, 10 2012.
- [7] M. Liu, N. Rajaratnam, and D. Zhu. Turbulence structure of hydraulic jumps of low froude numbers. *Journal of hydraulic engineering*, 130(6):511–520., 2004.
- [8] C. Gualtieri and H. Chanson. Experimental analysis of froude number effect on air entrainment in the hydraulic jump. *Environmental Fluid Mechanics*, 7(3):217–238., 2007.
- [9] V. Manrique. Comportamiento del resalto hidráulico en canales con pendiente y sección rectangular. Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia, 2013.
- [10] B. Ortega. Análisis experimental para la optimización de la disipación de energía a la salida del túnel de desvío del proyecto hidroeléctrico sopladora. Trabajo Especial de Grado, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador, 2012.
- [11] N. Hassanpour, A. Hosseinzadeh, D. Farsadizadeh, and C. Gualtieri. An experimental study of hydraulic jump

- in a gradually expanding rectangular stilling basin with roughened bed. *Water*, 9(12), 2017.
- [12] A. Abbas, H. Alwash, and A. Mahmood. Effect of baffle block configurations on characteristics of hydraulic jump in adverse stilling basins. In *MATEC Web of Conferences*, volume 162, 2018.
- [13] I. Shahid. Investigation of hydraulic jump due to two phase air - water flow in a rectangular duct. *International Journal on Design & Manufacturing Technologies*, 9(2):12–18, 2015.
- [14] M. Mortazavi, V. Le Chenadec, P. Moin, and A. Mani. Direct numerical simulation of a turbulent hydraulic jump: turbulence statistics and air entrainment. *Journal of Fluid Mechanics*, 797:60–94., 2016.
- [15] S. Movahed, J. Mozaffari, D. Davoodmaghami, and M. Akbari. A semi-analytical equation to estimate hydraulic jump length. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 62(4):1001–1006, 2018.
- [16] M. Palermo and S. Pagliara. A review of hydraulic jump properties on both smooth and rough beds in sloping and adverse channels. *Acta Sci. Pol. Formatio Circumiectus*, 16(1):91–105, 2017.
- [17] G. Sotelo. *Hidráulica de canales*. UNAM, México, 2002.
- [18] V. Chow. *Hidráulica de canales abiertos*. McGraw Hill, Bogotá, Colombia, 1994.
- [19] A. Coutinho y C. Robles. *Manual de Ingeniería Hidráulica*. Universidad Pública de Navarra, España, 1998.
- [20] R. French. *Hidráulica de canales abiertos*. McGraw Hill, México, 1988.
- [21] H. Mery. *Hidráulica aplicada al diseño de obras*. Ril Editores, Santiago de Chile, Chile, 2013.
- [22] P. Novak, A. Moffat, C. Nalluri y R. Narayanan. *Estructuras hidráulicas*. McGraw Hill, Bogotá, Colombia, 2001.
- [23] E. Martínez, P. Batanero, I. Martínez, E. Martínez y E. González. *Diseño de pequeñas presas*. Editorial Bellisco, Madrid, España, 2007.