

Vertedor de laberinto de un ciclo como regulador de nivel aguas arriba en canales

Ing. Alejandro Rojas León

Centro de Investigaciones Hidráulicas (CIH), Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (Cujae), Habana.

e-mail: alejandrrol@cih.cujae.edu.cu

Dr. Alcides J. León Méndez

Centro de Investigaciones Hidráulicas (CIH), Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, (Cujae), Habana.

e-mail: aleonm@cih.cujae.edu.cu

RESUMEN

Los aliviaderos de laberinto son estructuras hidráulicas que, independientemente del valor del caudal, mantienen casi constante, dentro de límites aceptables, el nivel aguas arriba de la obra. El presente estudio demuestra que existe una variación del coeficiente de gasto y el límite de vertimiento libre como función de la colocación de la obra respecto a la dirección del flujo en el canal: ápice hacia aguas arriba o hacia aguas abajo. Esta variación tiene importancia significativa para el diseño y la operación de esta obra que, por su sencillez estructural y su fácil diseño hidráulico, es una importante solución de regulación para los sistemas de abasto a usuarios de redes de canales.

Palabras clave: aliviadero de laberinto, regulador de nivel, vertedores diagonales.

One cycle labyrinth spillway as an upstream regulator in open channels

ABSTRACT

The labyrinth spillway as an upstream regulator is a hydraulic structure that, regardless of the flow rate, can keep its upstream level fairly constant within acceptable bounds. This study demonstrates that there is a variation in the discharge coefficient and in the free dumping limit, as a function of the location of the work with respect to the canal flow direction: apex upstream or apex downstream. This variation has significant importance for the design and operation of this work, which by its structural simplicity and easy hydraulic design, is a convenient regulatory solution for supply systems to canal network users.

Keywords: labyrinth spillway, level regulator, diagonal weirs.

INTRODUCCIÓN

Una obra de regulación con una larga longitud de vertimiento es conveniente para el control aguas arriba de los niveles o la velocidad. Las largas longitudes de vertimiento posibilitan que los cambios de caudales no tengan grandes repercusiones en el valor de la carga hidráulica sobre la obra (h_1) dentro de límites que varían en función de las dimensiones y tipo de obra, figura 1, donde h_1 es la carga sobre el Plano de Referencia del Vertimiento. Esta carga se mide a partir de la entrada de la obra, en dirección aguas arriba, a una distancia igual tres veces su valor máximo y dista del piso del canal una longitud dimensionada como p_1 . La sumatoria de h_1 más p_1 es igual a la profundidad, y_1 , a la entrada de la obra. La profundidad y_2 viene dada por las condiciones impuestas por la sección de control aguas abajo.

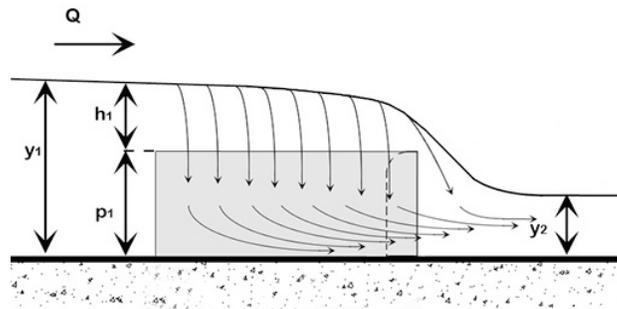


Figura 1. Perfil de un vertedor de laberinto de un solo ciclo (pico de pato)

La altura y la longitud efectiva de vertimiento (LEV), se determinan en relación con la descarga que debe evacuar la obra y con las necesidades específicas de regulación. Cuanto más estrechas son las tolerancias, mayor es la longitud efectiva de vertimiento. En los canales de distribución, la anchura disponible generalmente es insuficiente para poder construir obras con vertimiento frontal cuya LEV sea lo bastante larga como para no afectar las tolerancias de nivel cuando los gastos cambian.

Las tolerancias usuales según Kraatz and Mahajan (1982) son del orden de 5 a 10 centímetros, pero estos valores pueden ser intolerables para muchas aplicaciones. Por esta razón es preferible aconsejar un cálculo detallado en cada aplicación que permita personalizar sus fluctuaciones permisibles.

Estas circunstancias han llevado a la creación de vertedores diagonales, el vertedor de laberinto: el de un solo ciclo (pico de pato) o el de múltiples ciclos, el vertedor tipo Z y otros de formas especiales. De todos ellos, el vertedor de pico de pato es el que se usa más corrientemente, por ser el que mejor se adapta a la mayoría de los casos, aportando una buena capacidad de descarga en relación con la longitud de la estructura y la cantidad de material empleado en la construcción. La figura 1 muestra diferentes tipos de estas obras.

La gran ventaja que poseen las obras sin elementos móviles, es la simplicidad de su construcción y mantenimiento y la seguridad de su funcionamiento. La alteración por manipulaciones extrañas es casi imposible. Sin embargo, su capacidad para retener los sedimentos y arrastres de fondo impide su utilización en los lugares donde el agua va permanentemente cargada de sedimento. Si la carga de sedimentos y arrastres es pequeña o temporal, se puede evitar el azolvamiento disponiendo una abertura de arrastre en el suelo de la

estructura de la obra. En estructuras mayores es conveniente instalar una compuerta para permitir la evacuación del tramo de aguas arriba (SOGETHA 1970).

En estas obras hay casos en que la entrada del agua está invertida a como usualmente se aconseja en la literatura especializada (Bos 1976). Por ejemplo, referenciada en Kraatz and Mahajan (1982), aparece una solución tomada de un proyecto FAO-ICID, normalizado para gastos entre 110 L/s y 370 L/s, realizado por el organismo para la Reforma Agraria en Sicilia, Italia en que el ápice (pico o vértice) está apuntando hacia aguas arriba. La figura 2 muestra un esquema en planta de la obra e imágenes con las dos formas de colocación.

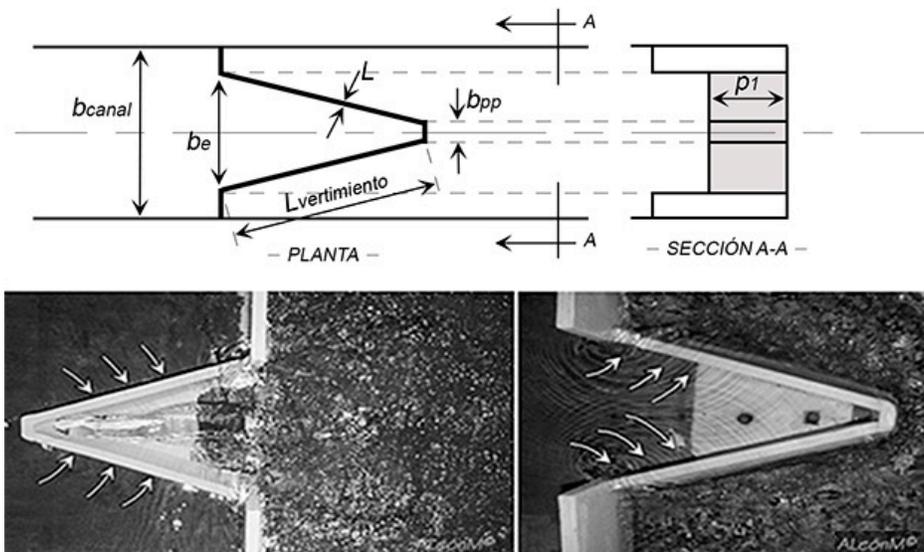


Figura 2. Esquema en planta de un pico de pato e imágenes del trabajo con las dos formas posibles de colocación

Esta inversión de la entrada del agua a la obra puede traer cambios cuantitativos en los coeficientes de gasto de la estructura (C_Q), por lo que en caso de emplearse esta obra con una u otra orientación, hay que verificar a nivel de laboratorio, o consultando estudios realizados en instituciones de reconocido prestigio los coeficientes a emplear, ya que la literatura consultada no aporta información en este sentido (Bos 1976), (Kraatz and Mahajan 1982), (Tullis et al. 1995), (Delgado y Matthey 2009).

El otro parámetro de importancia a evaluar en esta obra es el límite de vertimiento libre (LVL). Cuando la obra se emplea en otras aplicaciones es posible que este parámetro no tenga una importancia significativa, pero al emplearse la obra como reguladora del nivel aguas arriba en canales de cualquier orden, el conocimiento del límite de vertimiento libre de la obra es vital para la correcta proyección y operación de la misma.

En el caso del LVL en la literatura consultada no hay información que permita tener una valoración del mismo ni aproximada, (Kraatz and Mahajan 1982), (Bos 1976), (Tullis et al. 1995), (Tullis et al. 2007), (Delgado y Matthey 2009), (Crookston and Tullis 2012).

Con el objetivo de validar la anterior afirmación sobre la necesidad de diferenciar el valor de C_Q para las dos posiciones posibles y de cuantificar los valores del LVL, también para las dos posiciones posibles del ápice, se desarrolló en el Centro de Investigaciones Hidráulicas (CIH) del Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (Cujae) en La Habana una investigación

tendiente a contrastar los resultados para obras con diferentes ángulos de apertura cuyos resultados dan lugar al presente artículo.

GENERALIDADES DE LOS VERTEDORES DE LABERINTO

Se emplean y se han empleado para la regulación del nivel en canales de abasto de pequeña, mediana y grandes dimensiones y se emplea también como vertedor lateral, como regulador del nivel en grandes cursos de agua o como aliviadero del agua en exceso en obras hidráulicas.

Debe señalarse que cada aplicación tiene diferencias en cuanto a cómo debe diseñarse la obra y qué parámetros del diseño tienen mayor o menor significación.

En canales, el empleo de esta obra como regulador del nivel aguas arriba se diseña en función del ancho disponible para su ubicación en planta y las exigencias de la regulación. Generalmente en canales de segundo y tercer orden se emplea la obra con un solo ciclo y en canales secundarios y de orden superior se emplea también con dos, tres o más ciclos según sean las condiciones.

La capacidad de un vertedor de laberinto es una función de la carga aguas arriba, la longitud efectiva de la cresta, y el coeficiente de gasto. El coeficiente de gasto depende de la carga aguas arriba, altura entre el plano de vertimiento y el piso del canal aguas arriba, del espesor del muro de la obra, de la forma de la cresta, configuración del pico y del ángulo de las paredes laterales.

Una ecuación general de la capacidad de servicio (relación gasto-carga) es la ecuación (1).

$$Q = K_A C_Q L_{et} H_1^{1,5} (1)$$

donde:

- Q : gasto real que vierte sobre la obra (m^3/s),
- K_A : constante que depende del autor que investiga o propone los valores de C_Q (dimensional o adimensional dependiendo del autor),
- C_Q : coeficiente de gasto (adimensional),
- L_{et} : longitud efectiva total de la cresta (m),
- H_1 : carga total aguas arriba de la obra (m). Esta variable se obtiene de la sumatoria de la carga sobre la obra (h_1) más la carga a velocidad en la sección de aproximación ($h_1 + v_1^2/2g$).

El valor del coeficiente K_A reviste un interés particular. De forma general se demuestra que para estas obras la ecuación teórica de gasto está dada por la ecuación (2).

$$Q_{teórico} = \frac{2}{3} \sqrt{2g} L_{et} H_1^{1,5} (2)$$

- donde: $Q_{teórico}$: caudal teórico que vierte sobre la obra (m^3/s),
- g : aceleración de la gravedad (m/s^2).

Los dos primeros términos de la ecuación (2) son una constante y existe una tendencia a combinarlos con el valor del coeficiente de gasto (C_Q), con lo que, el valor numérico de este coeficiente cambia, convirtiéndose, en el caso que se incorpora a (C_Q) el término raíz de dos veces la gravedad, en una variable dimensional (C_{QD}), sin que esto implique ninguna contradicción en el comportamiento de la obra, desde el punto de vista físico. Así, por ejemplo, Kraatz and Mahajan (1982) incorporan ambos términos y dan su propio valor de C_{QD} ; Castro

(2015) solo incorpora la constante dos tercios dando un valor numéricamente diferente para su coeficiente de gasto, que, aunque adimensional, no representa numéricamente el significado que este tiene, ya que su valor no es la relación entre el gasto real y el gasto teórico. Por otra parte otros como Tullis et al. (1995 y 2007), Delgado y Matthey (2009), Crookston and Tullis (2012) y otros más, como los autores del presente trabajo, mantienen en la ecuación de gasto teórico los valores de dos tercios y la raíz de dos veces la gravedad siendo adimensional el valor del coeficiente de gasto es (C_D) y además, representa la relación entre el gasto real y el gasto teórico.

Haciendo un análisis de las regularidades de esta obra puede llegarse a las siguientes conclusiones:

- El número de lados rectos es el número de ápices (picos) más uno, figura 3.
- El ancho total disponible para todos los lados rectos, es igual al ancho neto del canal menos el número de ápices (picos) por la longitud de un ápice, figura 3.
- El ancho disponible para cada lado recto es igual al ancho total disponible para todos los lados rectos entre el número de lados rectos, figura 3.
- La longitud de vertimiento de cada lado recto es igual al ancho disponible para un lado recto entre el coseno del ángulo de inclinación del lado, figura 3.
- La longitud de la obra (ápice a ápice) es igual al ancho disponible para un lado recto por la tangente del ángulo de inclinación del lado, figura 3.
- El ancho total disponible para todos los lados rectos debe ser mayor, o igual, que la suma de la parte frontal de todos los ápices (picos). El no cumplimiento de esta restricción trae como consecuencia una obra que tiende a un vertedor frontal, figura 3.

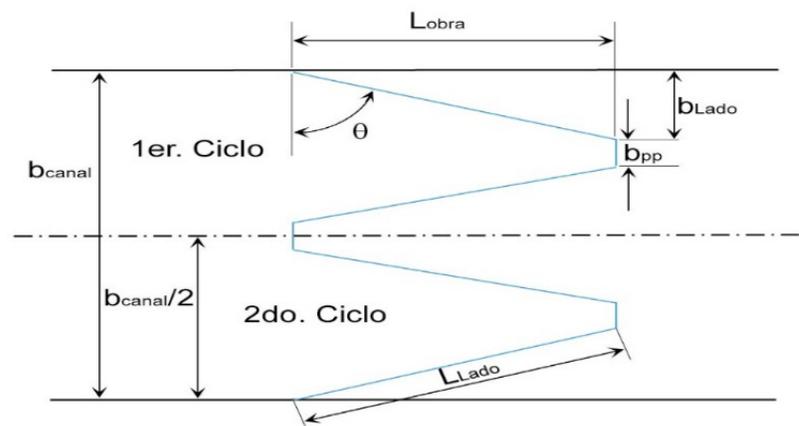


Figura 3. Esquema en planta de un regulador de laberinto

El otro parámetro a evaluar en este trabajo es el límite de vertimiento libre de la obra en sus dos formas de trabajo.

El límite de vertimiento libre, o LVL, cuantifica la respuesta de la carga aguas arriba de la obra (h_1 o H_1) a los cambios de los niveles aguas abajo (h_2 o H_2), figura 4. En una obra que trabaje con vertimiento libre, la ecuación del gasto solo depende de la carga aguas arriba, mientras que si trabaja con vertimiento sumergido el nivel aguas abajo entra a formar parte de la ecuación de gasto, y en la mayoría de los casos la determinación precisa del gasto se vuelve difícil por las fluctuaciones que puede introducir el nivel aguas abajo.

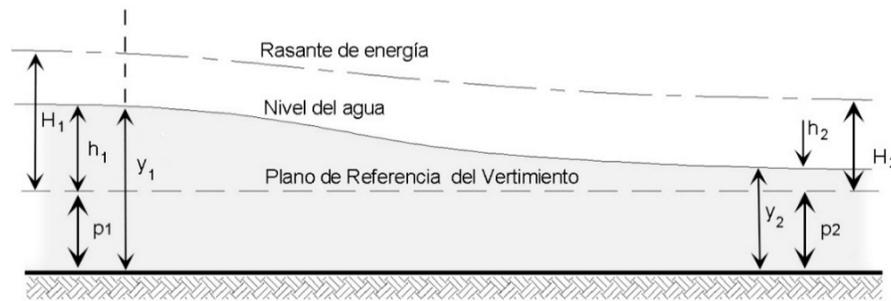


Figura 4. Esquema para definir el LVL

El plano de referencia del vertimiento (PRV) es el plano horizontal que pasa por el borde superior de la cresta de la obra y a partir de él se definen los valores de las cargas (h_1 y h_2) y las cargas totales (H_1 y H_2) aguas arriba y aguas abajo.

El valor de h_2 depende del nivel real del flujo aguas abajo de la obra (y_2) y de la altura a que está el PRV del fondo del canal. Por su parte el valor de y_2 no depende de la obra y sí de la sección de control que se encuentre aguas abajo, ya que este tipo de obra se ubica en conducciones con régimen subcrítico. En cuanto al valor del PRV respecto al fondo del canal aguas arriba y aguas abajo, este puede ser el mismo ($p_1 = p_2$) o diferente ($p_1 < p_2$), en dependencia de la flexibilidad que se quiera tener para garantizar el LVL.

La importancia práctica del LVL en este tipo de obra es innegable, ya que la función de la misma es regular el nivel aguas arriba y mantenerlo casi constante, dentro de un intervalo aceptable, e independiente del gasto que se está vertiendo, para de esta forma poder derivar con una carga estable los caudales necesarios para abastecer a uno o varios usuarios.

La altura en el canal aguas arriba entre el PRV y la elevación de la cresta (p_1) influye en las pérdidas por aproximación y por tanto afecta la capacidad de la obra. Para un vertedor frontal, C_Q alcanza un máximo que se mantiene casi constante para valores altos del término (H_1/p_1), figura 5. Para un vertedor de laberinto, o pico de pato múltiple, es necesario limitar el término (H_1/p_1) para mantener la efectividad del laberinto. Tullis et al. (1995) recomienda que el máximo valor de (H_1/p_1) debe ser aproximadamente de 0,9.

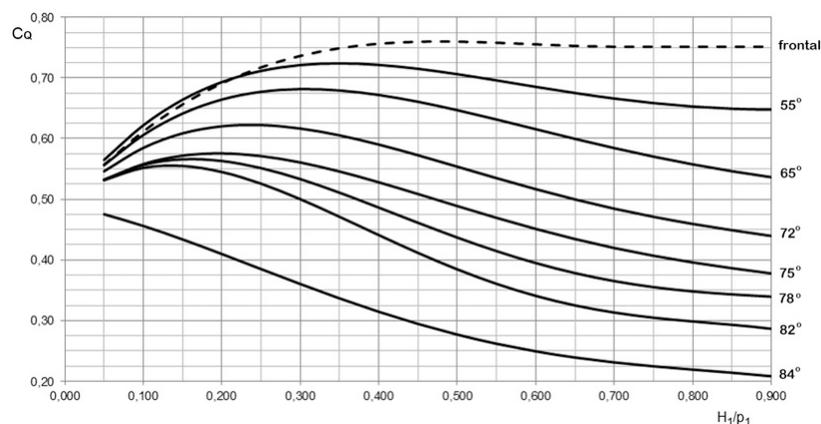


Figura 5. C_Q para laberintos de más de un ciclo presentado por Tullis et al. (1995)

La anchura de la parte frontal, o nariz, figura 2, influye en la capacidad de la obra, reduciendo la longitud neta de vertimiento del laberinto y su capacidad. Por consiguiente, el valor de b_{pp} , figura 2, debe ser tan pequeño como sea posible. Típicamente el largo interior es una o dos veces el espesor de la pared según Tullis et al. (1995), mientras que Kraatz y Mahajan (1982) recomiendan 0,40 m para todos los casos. Estos criterios son muy disímiles y para el caso particular de estas obras como obras para la regulación del nivel, es más acertado emplear el criterio más reciente.

Tullis et al. (1995) recomienda también que aguas abajo de la obra debe existir un pequeño tramo de canal con pendiente supercrítica para evitar la sumersión de la lámina vertiente. Lo anterior complica la solución en canales, en los que esta obra se emplea como reguladora del nivel, donde el régimen de circulación es típicamente subcrítico. Por tanto es preferible valorar el incremento de p_1 ó p_2 para evitar la sumersión de la lámina vertiente antes de decidir otra solución.

En su trabajo Tullis et al. (1995) presentan gráfica y matemáticamente el resultado del C_Q para diferentes ángulos de apertura de las paredes de los laberintos, figura 4. Este resultado es válido para laberintos con cresta cuarto redondeada y las restricciones expresadas por las ecuaciones (3), (4) y (5).

$$t \leq b_{pp} \leq 2t \quad (3)$$

$$H_1/p_1 \leq 0,9 \quad (4)$$

$$t \approx p_1/6 \quad (5)$$

COMPORTAMIENTO DEL VERTEDEDOR DE LABERINTO DE UN CICLO CON LAS DOS POSIBLES POSICIONES DEL ÁPICE

Para analizar el comportamiento del C_Q y del LVL en los vertedores de laberinto de un ciclo con el ápice a favor o en contra de la dirección del flujo se ensayaron dos obras con ángulos de apertura de las paredes diferentes, tabla 1, figura 2 y figura 3. Los ángulos ensayados fueron 70° y 45° .

Las características de la instalación de investigación son:

- Un canal de 5,00 m x 0,72 m x 0,50 m, con paredes de cristal.
- Una compuerta de accionamiento manual en la descarga para regular el nivel aguas abajo de la obra.
- Tanque de aforo de $0,66 \text{ m}^3$ de capacidad neta y piezómetro de 0,80 m de alto graduado cada 0,10 m.

Tabla 1. Dimensiones de las obras referidas a la figura 2

θ	70°	45°
b_e	38,0 cm	53,6 cm
$L_{\text{vertimiento lado}}$	36,5 cm	
b_{pp}	2,0 cm	
p_1	10,0 cm	
L	1,8 cm	
Coronación pared vertedora	A escuadra la entrada y la salida	

Que la obra tenga, o no, contracciones se refiere a que la obra ocupe todo el ancho del canal de aproximación (sin contracciones) o que esta tenga un ancho de entrada menor que el ancho del canal ($b_e < b_{canal}$) y eso implique la existencia de paredes laterales. En la figura 6 a la izquierda aparece una de las obras ensayadas que ocupa todo el ancho de canal, mientras que a la derecha otra obra en este caso con paredes laterales que crean una contracción del flujo.

La no tenencia de contracción implica que la obra se abre a todo el ancho del canal sin necesidad de muros laterales.

En este trabajo se abordarán las características de las obras con contracción ya que las condiciones del laboratorio, en cuanto a caudales máximos a emplear, no son suficientes para las obras sin contracción.



Figura 6. Imagen de las obras con contracciones y sin ellas incluyendo detalles

El sistema de mediciones estuvo constituido por los siguientes instrumentos:

- Banco piezométrico por el eje de simetría del canal espaciados 0,10 m (rango de medición de 0 a 500 mm; resolución $\pm 0,1$ mm).
- Sensor de nivel resistivo (GHM Levelmeter del Delft Hydraulic Laboratory), rango de medición de 0 a 500 mm; resolución $\pm 0,1$ mm).
- Micromolineté direccional sobre carro móvil en dos direcciones con hélice de 15 mm de diámetro y rangos de velocidades de 0 a 18 cm/s; 0 a 45 cm/s; 0 a 90 cm/s y 0 a 180 cm/s (VDM Omni-directional liquid-velocity and directional meter del Delft Hydraulic Laboratory).
- Mira limnimétrica sobre carro móvil en dos direcciones (rango de medición de 0 a 500 mm; resolución $\pm 0,1$ mm).
- Cronómetro digital (resolución $\pm 0,001$ s).
- Raspberry Pi 2 (Placa base ARM Quad-Core 900 MHz, 1 GB RAM, 4 x USB, HDMI, RJ-45) conectada a Pc para la adquisición de datos de nivel y velocidad (frecuencia de adquisición hasta 800 Hz). Esta información en tiempo real se procesó con un programa sobre hoja de cálculo creado para este fin.

Uno de los piezómetros del banco se ubicó aguas arriba de la obra para realizar la medición de (h_1), la cual se ratificó con la mira limnimétrica. La distancia entre la entrada de la obra y el piezómetro fue entre 3 y 4 veces la mayor de las cargas medidas, en dependencia de la obra ensayada. El resto de los piezómetros se ubicaron dentro de la obra a lo largo de su eje y aguas abajo de ella.

La mira también se empleó, utilizando su posibilidad de movimiento para tomar muestras del nivel en una malla de puntos aguas arriba de la obra, dentro de ella y aguas abajo de la misma.

El micromolinete tomó información a $0,8h$; $0,6h$ y $0,2h$ en tres secciones aguas arriba de la obra para garantizar la uniformidad del flujo a la entrada de la obra, siendo h la profundidad local del flujo. Con este equipo, que mide simultáneamente velocidad y dirección del vector de máxima velocidad. Además se levantó la información de una red de puntos sobre la obra y aguas abajo de la misma siempre a profundidades de $0,6h$ para posteriores trabajo de modelación matemática de la obra.

El cronómetro digital con precisión de $0,001$ s, se empleó para el aforo volumétrico de los caudales ensayados, siguiendo lo estipulado por la Norma UNE-EN ISO 8316 (1996).

Determinación de la relación gasto-carga

Como se ha expresado anteriormente el valor del coeficiente de gasto de esta obra, además de depender de los factores geométricos e hidráulicos como toda obra de este tipo, depende de la amplitud con la cual se realizarán los ensayos y de la fórmula con que el investigador o institución presente el resultado. Por lo que es decisivo el conocimiento de la ecuación carga-gasto empleada para poder hacer un uso adecuado del valor del importante valor de C_Q . En los siguientes resultados los valores del C_Q son adimensionales, ya que modifican la expresión teórica del caudal, ecuación (2), para convertirlo en caudal real.

Los resultados obtenidos al evaluar las dos obras aparecen a continuación, figura 7. Las mediciones, para la relación gasto-carga de las obras ensayadas, dieron como resultado los puntos y las curvas de mejor ajuste que se presentan en la figura 6. Estos resultados no dejan duda alguna de la diferencia del coeficiente de gasto como función del sentido en que apunta el ápice, estando los valores mayores cuando este apunta hacia aguas arriba.

Tanto en la variante de 70 grados, como en la de 45 grados, en la que la obra no ocupa todo el ancho del canal (con contracción), las diferencias son muy notables. Para la variante con el ápice aguas abajo el coeficiente de gasto tiene valores inferiores debido a las contracciones que sufre el flujo al llegar a la obra. La figura 9, en las dos imágenes superiores, muestra claramente esta aseveración. Con el ápice aguas abajo hay una tendencia al decrecimiento del C_Q muy fuerte al crecer la relación (H_1/p_1).

El post-procesamiento de la información obtenida permitió obtener las ecuaciones (6), (7), (8) y (9) para el valor del C_Q . Los resultados que aparecen en las referidas ecuaciones se obtuvieron con errores menores que $\pm 1,2$ % y correlaciones superiores a $0,967$. Es de destacar que la composición en términos de las ecuaciones es la misma que la presentada por otros autores (Tullis et al. 1995), (Tullis et al. 2007).

$$C_{Q_{70_{cc}_{aarr}}} = -6,6104 \left(\frac{H_1}{p_1}\right)^3 + 4,3736 \left(\frac{H_1}{p_1}\right)^2 - 0,2483 \left(\frac{H_1}{p_1}\right) + 0,4923 \quad (6)$$

$$C_{Q_{70_{cc}_{aab}}} = 2,6037 \left(\frac{H_1}{p_1}\right)^3 - 4,3601 \left(\frac{H_1}{p_1}\right)^2 + 2,0906 \left(\frac{H_1}{p_1}\right) + 0,2211 \quad (7)$$

$$C_{Q_{45_cc_aarr}} = 7,1209 \left(\frac{H_1}{p_1}\right)^3 - 9,0975 \left(\frac{H_1}{p_1}\right)^2 + 3,8044 \left(\frac{H_1}{p_1}\right) + 0,2288 \quad (8)$$

$$C_{Q_{45_cc_aab}} = 0,2287 \left(\frac{H_1}{p_1}\right)^3 - 1,9026 \left(\frac{H_1}{p_1}\right)^2 + 1,1216 \left(\frac{H_1}{p_1}\right) + 0,5250 \quad (9)$$

donde: C_Q : coeficiente de gasto (adimensional),
 H_1 : carga total aguas arriba de la obra (m),
 p_1 : altura del plano de referencia del vertimiento del piso (m).

Las ecuaciones anteriores representan los coeficientes de gasto del laberinto de un solo ciclo ensayado con las especificidades siguientes:

- 70_cc_aarr ángulo de 70 grados, con contracción, con el pico hacia aguas arriba,
- 70_cc_aab ángulo de 70 grados, con contracción, con el pico hacia aguas abajo,
- 45_cc_aarr ángulo de 45 grados, con contracción, con el pico hacia aguas arriba,
- 45_cc_aab ángulo de 45 grados, con contracción, con el pico hacia aguas abajo.

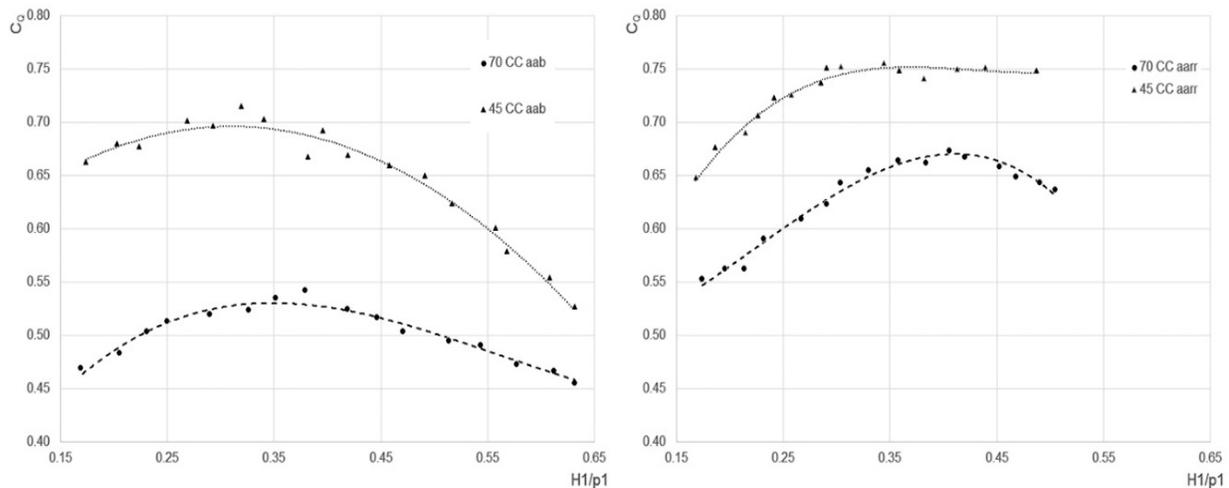


Figura 7. Coeficiente de gasto de las dos obras ensayadas

Determinación del límite de vertimiento libre de las obras (LVL)

El límite de vertimiento libre es de gran significación para el trabajo de la obra como reguladora del nivel aguas arriba en canales de abasto, en sustitución de otras obras de regulación del nivel aguas arriba, de larga o corta longitud de vertimiento. Este parámetro puede no tenerse en cuenta, si la obra cumple otras funciones, como por ejemplo el de mantener el nivel en cursos de agua naturales para permitir la navegación en ellos.

Los resultados obtenidos son concluyentes y novedosos en cuanto a la posición del ápice, hacia aguas arriba o hacia aguas abajo, figura 8. Esto reviste importancia para los proyectistas de estas obras, ya que la estabilidad del nivel aguas arriba depende de que se supere, o no, el LVL del regulador.

Lo primero que se destaca en los resultados, es que la obra con el ápice orientado en la dirección del flujo, desplaza el nivel hacia aguas abajo, figura 9(derecha), provocando una región de régimen supe crítico alrededor de ella, logrando así tener mayores valores del LVL. Es muy

significativo este comportamiento y reviste además importancia constructiva, ya que en el caso de la obra con el ápice orientado hacia aguas arriba, algunos investigadores plantean la necesidad de construir en una zona del fondo, cerca del ápice, una rampa con pendiente fuerte, para tratar de alejar lo más posible los efectos de sumersión de la lámina vertiente. La figura 9 muestra, en dos imágenes a la izquierda y dos a la derecha, este comportamiento.

La obra con el ápice orientado hacia aguas arriba, con mejores valores de coeficiente de gasto, tiene una concentración de caudal dentro de ella, produciendo una subida del nivel cerca del ápice y una concentración de zonas turbulentas que impiden el bloqueo de los niveles aguas abajo y como resultado de esto el valor de h_2 influye más que para la otra posición.

Las ecuaciones (10) a la (13) expresan matemáticamente los resultados obtenidos. Es significativo que las expresiones, de tipo polinómicas, ajustadas a cada juego de datos tuvieron altos coeficientes de correlación que oscilaron entre 0,91 y 0,98. La dispersión de los puntos respecto al valor ajustado en este tipo de ensayo se debe, fundamentalmente, a la dificultad que tiene el laboratorista en precisar en qué momento el nivel aguas abajo comienza a alterar el nivel aguas arriba, para un caudal determinado.

Los ensayos para el LVL se realizaron estableciendo las lecturas aguas arriba de la obra y aguas debajo de ella con el banco piezométrico (con lecturas de 0,1 mm), realizando, además, mediciones del caudal sistemáticamente para garantizar su estabilidad en el tiempo (régimen permanente).

La figura 10 muestra imágenes del proceso de vertimiento de esta obra con la misma carga (h_1) y diferentes niveles aguas abajo. Es de notar como al elevarse el nivel aguas abajo, imágenes (a), (b), (c) y (d) de la figura 10, la zona turbulenta producida por un incipiente salto hidráulico llega hasta la sección de salida de la obra.

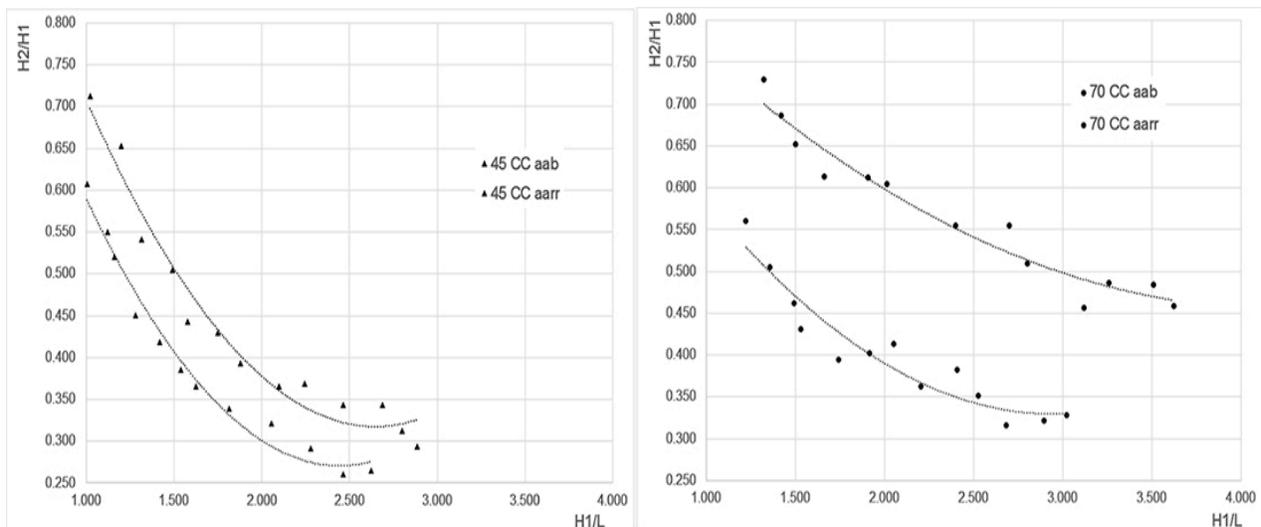


Figura 8. Resultados del LVL en las obras ensayadas

Es importante señalar que, por la geometría posible de la coronación de estas obras (a escuadra, cuarto redonda, semi-redonda y otras) y los valores (H_1/p_1) con que usualmente trabajan, la hidráulica del vertimiento pasa, para una misma obra, de comportarse como una pared delgada inestable, a comportarse como un umbral corto y en pocas ocasiones, como un umbral largo.

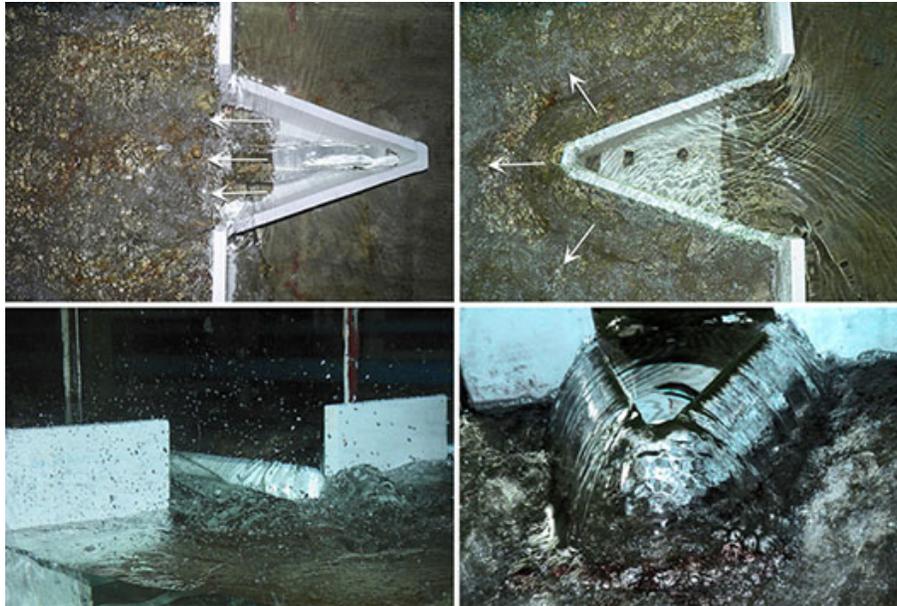


Figura 9. Imágenes del efecto sobre el LVL de la posición del ápice

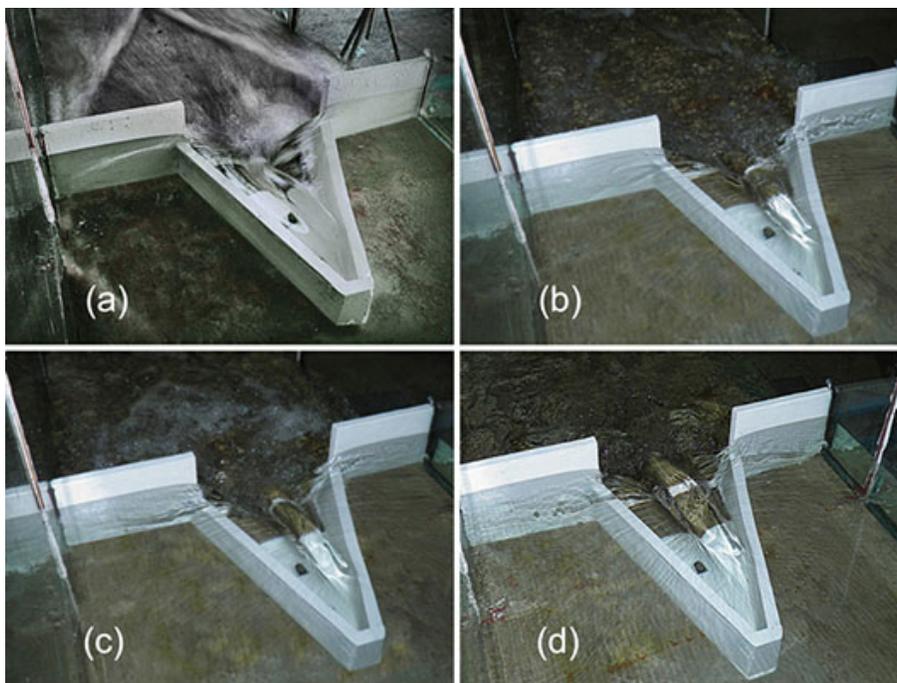


Figura 10. Cuatro momentos del trabajo de la obra con el ápice hacia aguas arriba

El tratamiento numérico de la información obtenida para el LVL de estas obras, ha arrojado los siguientes resultados:

$$\left(\frac{H_2}{H_1}\right)_{70_{cc_aarr}} = 0,0667 \left(\frac{H_1}{L}\right)^2 - 0,3939 \left(\frac{H_1}{L}\right) + 0,9111 \quad (10)$$

$$\left(\frac{H_2}{H_1}\right)_{70_cc_aab} = 0,0295 \left(\frac{H_1}{L}\right)^2 - 0,2480 \left(\frac{H_1}{L}\right) + 0,9763 \quad (11)$$

$$\left(\frac{H_2}{H_1}\right)_{45_cc_aab} = 0,1441 \left(\frac{H_1}{L}\right)^2 - 0,7622 \left(\frac{H_1}{L}\right) + 1,3262 \quad (12)$$

$$\left(\frac{H_2}{H_1}\right)_{45_cc_aarr} = 0,1531 \left(\frac{H_1}{L}\right)^2 - 0,7479 \left(\frac{H_1}{L}\right) + 1,1847 \quad (13)$$

donde: H_2/H_1 : límite de vertimiento libre (adimensional),
 H_2 : carga total aguas abajo: h_2 más carga a velocidad aguas abajo (m)
 H_1 : carga total aguas arriba: h_1 más carga a velocidad aguas arriba (m)
 L : ancho de la pared vertedora en la dirección del flujo (m).

Es de destacar la novedad que representa el obtener el LVL para estas obras, por cuanto la estabilidad de la regulación aguas arriba de estas obras depende de que se cumpla con los requisitos de vertimiento libre. La estructura de este grupo de formulaciones también es novedosa, ya que no aparece recogida en la bibliografía consultada.

CONCLUSIONES

Mediante la evaluación en laboratorio de dos diferentes dimensiones de una obra de regulación del nivel aguas arriba, del tipo vertedor de laberinto de un ciclo, se logró demostrar que la posición del ápice respecto a la dirección del flujo tiene una marcada influencia en los valores del límite de vertimiento libre (LVL) y del coeficiente de gasto (C_Q) de estas obras.

Estos parámetros, que caracterizan a toda obra hidráulica, son de singular importancia, cuando la obra se emplea como regulador del nivel aguas arriba, para canales de abasto o conducciones libres naturales.

Se destaca en los resultados que los coeficientes de gastos son mayores cuando el ápice está aguas arriba para una misma altura relativa del vertedor. Esto se debe a la resistencia que le hace la forma geométrica del regulador de laberinto al paso del agua. La figura 2 y la figura 9, superior derecha, explican gráficamente esta situación, al mostrar el recrecimiento del flujo, cuando el ápice está aguas abajo, dentro de la obra. Este recrecimiento surge por la confluencia de todo el caudal en un corto espacio en planta, lo que necesariamente recrece la carga para un mismo caudal y entonces disminuye el valor del C_Q .

En los ensayos realizados se logró obtener por vez primera funciones que relacionan el LVL con el ángulo de apertura de los lados del regulador.

El trabajo deja pendiente un grupo de interrogantes, no abordadas en la literatura consultada, que permitirán en un futuro desentrañar cuestiones que pueden resultar de interés para los proyectistas que decidan emplear esta obra, de fácil diseño y bajo costo tanto en su construcción como en su mantenimiento.

RECONOCIMIENTO

Los autores agradecen y destacan el trabajo realizado, en la construcción y evaluación de los primeros prototipos en el laboratorio, por el entonces alumno de ingeniería, hoy Ing. Mikel Sánchez Domínguez. También se agradece la asesoría brindada por el Dr. Jorge Ramírez Beltrán para la puesta en marcha del conjunto para la adquisición de datos en tiempo real.

REFERENCIAS

- Bos M. G.** (1976). “Discharge measurement structures”. Publication No. 161, Working Group on Small Hydraulics Structures, International Institute for Land Reclamation and Improvement, Wageningen, The Netherlands.
- Castro Y.** (2015). “Transformación del coeficiente de descarga de vertedores de laberinto”. Diploma en opción al título de Ingeniero Hidráulico, CIH, Facultad de Ingeniería Civil, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (Cujae), La Habana, Cuba.
- Crookston B. M. and Tullis B. P.** (2012). “Labyrinth weirs: nappe interference and local submergence”. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, vol. 138, no. 8, pp. 757-765, ISSN 0733-9437/2012/8-757-765. August 1, 2012, ASCE, USA.
- Delgado G. y Matthey M.** (2009). “Obtención de los coeficientes de descarga de aliviaderos de laberinto según especificaciones de forma”. Tesis de Magister en Ingeniería, Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Universidad Austral de Chile, Chile.
- Kraatz D. B. and Mahajan I. K.** (1982). “Small hydraulic structures”. Commission on Irrigation and Drainage, Land and Water Development Division, Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Second printing, ISBN 92-5-100160-X, Rome.
- Sánchez M.** (2015). “Estudio del vertedor de laberinto de un ciclo como regulador de nivel aguas arriba en canales”. Diploma en opción al título de Ingeniero Hidráulico, CIH, Facultad de Ingeniería Civil, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (Cujae), La Habana, Cuba.
- Tullis J. P., Nosratollah A. and Waldron D.** (1995). “Design of labyrinth spillways”. *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 121, no. 3, pp. 247-255, ISSN 0733-9429, ASCE, USA.
- Tullis B. P., Young J. C. and Chandler M. A.** (2007). “Head-discharge relationships for submerged labyrinth weirs”. *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 133, no. 3, pp. 248-254, ISSN 0733-9429, ASCE, USA.
- UNE-EN ISO 8316** (1996). “Medida del caudal de líquidos en conductos cerrados. Método por recogida de líquidos en tanque de aforo volumétrico”. Comité Técnico AEN/CTN 82, Metrología y Calibración, Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), España.