

# Análisis de un vertedero tipo laberinto con Iber

## *Analysis of a labyrinth weir with Iber*

(Recepción 04/03/2020; Aceptación 04/08/2020)

Ros-Casajús, M.<sup>1</sup>; Vigueras-Rodríguez, A.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos y de Ingeniería de Minas,  
Universidad Politécnica de Cartagena, Paseo Alfonso XIII, 52, 30203, Cartagena (España)  
Email: mercedesroscasajus@gmail.com

**Resumen.** En las últimas décadas, el avance del conocimiento sobre la hidráulica de vertederos tipo laberinto se ha realizado principalmente en modelos físicos. En este estudio, se realizaron simulaciones numéricas de vertederos tipo laberinto en régimen de descarga libre utilizando el código bidimensional Iber. Las simulaciones consideraron tres enfoques diferentes y se compararon con datos experimentales previamente publicados. Aunque el problema es tridimensional, se encontró un ajuste relativamente adecuado (diferencias entre el 10 y 20%) en el coeficiente de descarga para valores de carga sobre vertedero elevados.

**Palabras clave.** Vertederos tipo laberinto; coeficiente de descarga; Iber.

**Abstract.** In recent decades, the advancement of knowledge on the hydraulics of labyrinth weirs has resulted mainly from physical modeling. In this study, numerical simulations of free-flow labyrinth weirs were conducted using a two-dimensional code, considering three different approaches. These simulations were compared with experimental data previously published. Although the phenomenon is three dimensional, relative good agreement was found on the discharge capacity coefficient for larger energy head over the weir.

**Keywords.** Labyrinth weir; discharge coefficient; Iber.

## 1. Introducción

Los vertederos no lineales tipo laberinto son estructuras de desborde con forma quebrada de su trazado en planta. El planteamiento no lineal del labio del vertedero les proporciona una longitud efectiva total mayor que la longitud de un vertedero de pared delgada rectilínea de igual ancho. Por lo general, el trazado del laberinto se repite en módulos o ciclos.

Debido a su forma poligonal, los vertederos tipo laberinto pueden proporcionar una capacidad de descarga más alta que la de los vertederos de pared recta para el mismo ancho y la carga sobre vertedero. Los vertederos tipo laberinto son de particular interés cuando el ancho de la estructura de control es limitado, como en la rehabilitación de estructuras hidráulicas existentes, cuando es necesario aumentar el caudal de descarga proyectado. También son estructuras adecuadas para situaciones donde la altura máxima disponible es reducida.

Dado que los vertederos tipo laberintos son estructuras de relativamente bajo costo en comparación con los aliviaderos con compuertas, a menudo se usan en el crecimiento de presas para aumentar el volumen de almacenamiento (Schleiss, 2011).

Aunque se han llevado a cabo considerables estudios experimentales (Tullis et al. 2007, Lopes et al. 2009, Crookston y Tullis 2013), es necesario mejorar el conocimiento de la caracterización del flujo de aproximación sobre los vertederos tipo laberinto en descargas libres y sumergidas con herramientas informáticas.

Debido a la componente fuertemente tridimensional de este tipo de vertederos, han sido mayoritariamente analizados mediante métodos experimentales, siendo muy pocos los estudios realizados numéricamente con modelos tridimensionales de tipo CFD.

En los últimos años se han realizado avances en la modelización numérica tridimensional de estas estructuras.

Salazar et al. (2015) realizaron simulaciones con Kratos vertederos tipo laberinto con un ángulo de 7.45° y obtuvieron resultados razonablemente buenos con los valores propuestos por Crookston y Tullis (2013). Para pequeñas relaciones de carga total/altura del vertedero ( $H/P$ ), las diferencias relativas fueron de alrededor del 12%, mientras que para relaciones  $H/P$  entre 0.4 y 0.8, las diferencias fueron de alrededor del 2%.

Savage et al. (2016) compararon datos experimentales y simulaciones CFD con FLOW-3D para expandir el rango de  $H/P$  de la curva de ajuste propuesta por Crookston y Tullis (2013) para ángulos de 15° hasta 2.1. Los errores relativos se limitaron a 6.4% para  $H/P = 0.502$ , y mostraron una tendencia a disminuir para valores mayores de  $H/P$ .

Carrillo et al. (2019) analizaron un vertedero tipo laberinto con ANSYS CFX. Las diferencias relativas máximas entre los resultados numéricos y los datos experimentales fueron inferiores al 1.0% para descarga libre y 3.6% para condiciones de descarga sumergida.

Teniendo en cuenta el elevado coste computacional de los modelos tridimensionales, este estudio tiene como objetivo analizar la capacidad de un modelo bidimensional para resolver vertederos no lineales



tipo laberinto de diferentes ángulos. En el estudio se analizan los coeficientes de descarga en descarga libre para aliviaderos no lineales tipo laberinto con ángulos entre 6 y 35°, considerando tres enfoques de simulación diferentes. Las simulaciones se llevaron a cabo aplicando Iber, un software bidimensional para la simulación de flujo en lámina libre en ríos y estuarios no estratificados.

## 2. Metodología

### 2.1. Estudio experimental

Los datos experimentales se han obtenido de Crookston (2010) y de Crookston y Tullis (2013). Los ensayos se realizaron en un canal de 1 m de ancho y 14.6 m de longitud (Fig. 1), donde se dispusieron dos módulos de laberinto con paredes y fondo acrílicos ( $n = 0.01$ ). La altura del agua del vertedero tipo laberinto fue  $P = 0.3048$  m. La altura sobre vertedero se midió en todos los casos a una distancia  $3P$  aguas arriba de la estructura.



Figura 1. Aliviadero en laberinto. “Half-Round”, con ángulo  $\alpha=12^\circ$   
(Fuente: Crookston, 2010).

### 2.2 Modelo Iber

Iber es un modelo bidimensional para la simulación hidráulica compuesta por diferentes módulos, entre ellos, el hidrodinámico que resuelve las ecuaciones de Saint Venant 2D o de aguas poco profundas utilizando el método de volúmenes finitos (Iber, 2012).

El rango de aplicación de Iber abarca la hidrodinámica fluvial, la simulación de rotura de presas, la evaluación de zonas inundables, el cálculo de transporte de sedimentos, y el flujo de marea en estuarios.

Como condiciones de contorno se han empleado la elevación de la lámina de agua tanto a la entrada como a la salida. La forma de introducir el aliviadero varía para cada hipótesis presentada más adelante.

Para resolver la turbulencia se ha empleado el modelo  $k-\epsilon$ , siendo éste el único modelo de dos ecuaciones que tiene implementado el código del programa.

Las simulaciones se realizan para vertederos tipo laberinto con perfil redondeado aguas arriba y aguas abajo (Half Round).

### 2.3. Coeficiente de descarga

La ecuación general de descarga en vertederos propuesta por Crookston y Tullis (2013) es

$$Q = \frac{2}{3} C_{d(\infty)} L_c \sqrt{2g} H_T^{3/2} \quad (1)$$

donde  $Q$  es el caudal total,  $C_{d(\infty)}$  un coeficiente experimental que depende del ángulo del laberinto y de la relación carga total/altura del vertedero ( $H/P$ ),  $L_c$  la longitud de la línea central de la cresta del laberinto, y  $g$  la aceleración de la gravedad.

Esta ecuación no se corresponde con la expresión de descarga en vertedero utilizada por Iber.

$$Q = C_d B h^{1.5} \quad (2)$$

donde  $Q$  es el caudal total,  $C_d$  el coeficiente de descarga,  $B$  la longitud del vertedero (o ancho del canal), y  $h$  la carga sobre vertedero.

Para analizar correctamente el funcionamiento de vertederos tipo laberinto en Iber se plantea el uso del coeficiente de descarga modificado respecto al considerado por Crookston y Tullis (2013):

$$C_{d,Iber} = \frac{2}{3} C_{d(\infty)} \sqrt{2g} \quad (3)$$

### 2.4. Hipótesis de simulación

Se han considerado 3 tipos de simulaciones:

- Hipótesis 1.

Se introduce la geometría del aliviadero en laberinto como condición interna tipo vertedero (Fig. 2). Los datos de entrada son el coeficiente de descarga modificado (Ec. 3), el porcentaje de longitud de vertedero (100%) y la cota del vertedero,  $P$ .

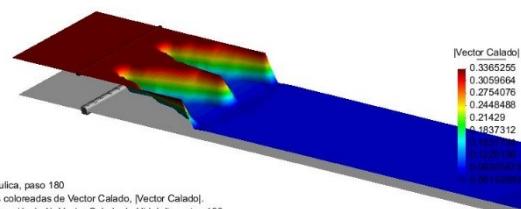


Figura 2. Calados obtenidos en Iber tras la simulación para un aliviadero de  $10^\circ$  y perfil “half-round” para  $H/P=0.01$ .

- Hipótesis 2.

Se considera la geometría del aliviadero lineal y se le asigna la condición interna tipo vertedero (Fig. 3). Esta hipótesis considera el caso límite de un vertedero tipo laberinto con ángulo de  $90^\circ$ . Para ello, la longitud del vertedero se magnifica sobre la longitud del vertedero lineal con:

$$\%Longitud del vertedero = \frac{L_c}{B} \times 100 \quad (4)$$

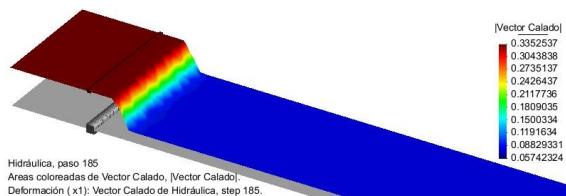


Figura 3. Calados obtenidos en Iber tras la simulación para un aliviadero de  $10^\circ$  para  $H/P = 0.1$ .

#### • Hipótesis 3.

En esta hipótesis no se considera el vertedero como una condición interna del programa, si no que se introduce la geometría del aliviadero en laberinto como una elevación sobre el terreno, trabajando en tres dimensiones (ancho y largo del canal y cota del aliviadero). Para ello se ha considerado que Iber no es capaz de procesar datos con paredes completamente verticales, ya que al ser un programa de volúmenes finitos bidimensional, una pared vertical no tendrá asociada un área en el plano XY, imposibilitando el cálculo del esquema de volúmenes finitos. Por este motivo se introduce el vertedero con las paredes ligeramente inclinadas tomando como longitud característica la línea central del vertedero (Fig. 4).

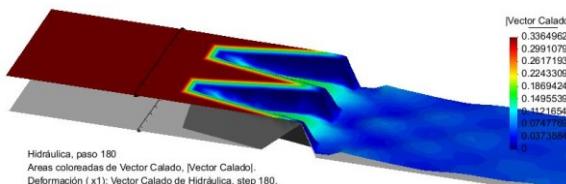


Figura 4. Calados obtenidos en Iber tras la simulación para un aliviadero de  $10^\circ$  y perfil "half-round" para  $H_r/P = 0.1$ .

## 2.5. Análisis de sensibilidad

El tamaño de malla se obtuvo a base de pruebas hasta obtener una combinación en la que reducir el tamaño no influyera sobre los resultados de la simulación.

Reducir más el tamaño del mallado implicaba aumentar el tiempo de cálculo sin obtener mejores resultados del coeficiente de descarga.

Tras realizar los respectivos análisis de sensibilidad en las 3 hipótesis, se ha considerado un tamaño de mallado de 7 cm en las hipótesis 1 y 2, y de 10 cm en la hipótesis 3, como valores representativos de cada hipótesis considerada.

## 3. Resultados

Los coeficientes de descarga se obtienen en función de la carga sobre vertedero, la longitud del labio del

vertedero y el caudal descargado (Ros-Casajús, 2019).

La Figura 5 muestra los resultados del coeficiente de descarga obtenidos con las distintas hipótesis consideradas.

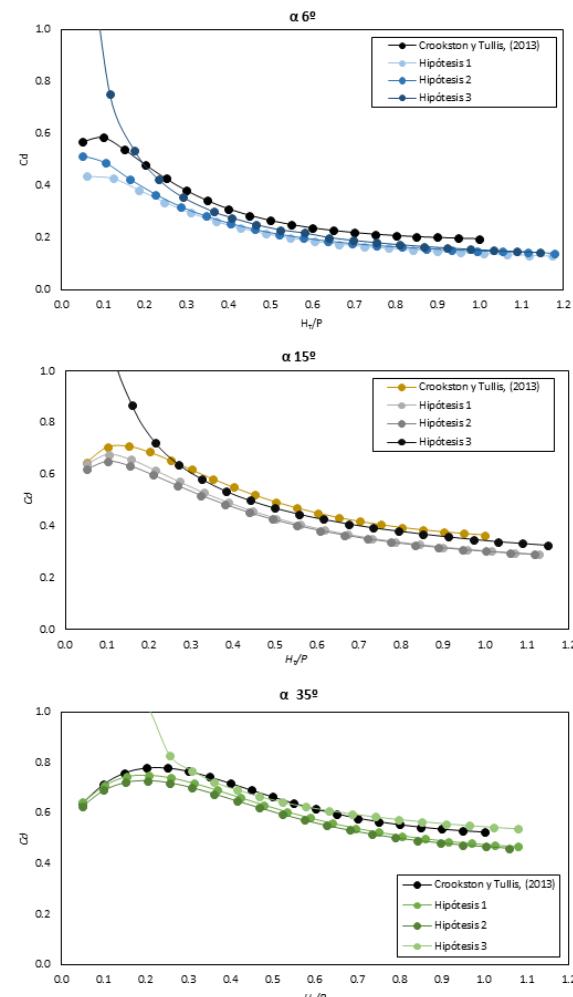


Figura 5. Comparación de resultados para vertederos tipo laberinto de distintos ángulos con cresta "half-round".

Los resultados se han comparado en términos de errores relativos con respecto a los datos experimentales (Figura 6). En general, se obtiene un buen ajuste (errores relativos inferiores al 10-20% del coeficiente de descarga) con todas las hipótesis consideradas cuando la relación  $H_r/P > 0.2-0.3$ .

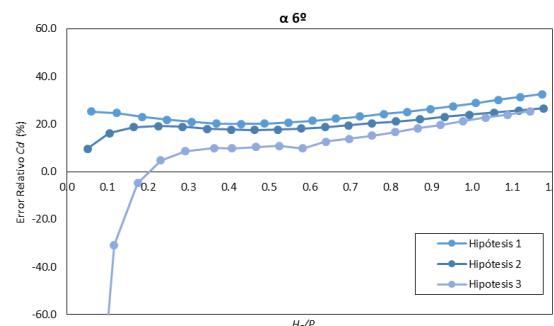


Figura 6. Errores relativos de los resultados para vertederos tipo laberinto de distintos ángulos con cresta "half-round".

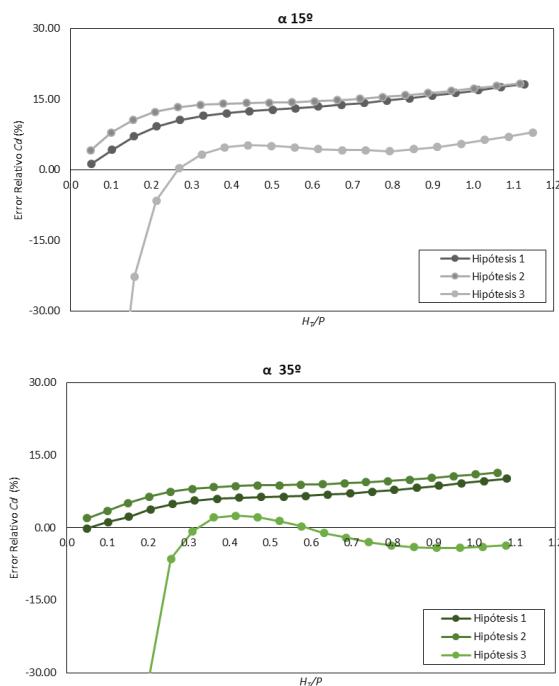


Figura 6-cont. Errores relativos de los resultados para vertederos tipo laberinto de distintos ángulos con cresta "half-round".

## 4. Conclusiones

Aunque el análisis de los aliviaderos no lineales es un problema tridimensional, en este estudio en el que se emplea una metodología de simulación bidimensional, se ha encontrado un ajuste del coeficiente de descarga sobre vertederos obteniendo un error relativo en torno al 10-20% en todos los ángulos medidos para una relación  $Ht/P$  con valores entre 0.3- 1.0.

Siempre que la relación  $Ht/P$  no esté por debajo de 0.2-0.3, la hipótesis 3 obtiene coeficientes de descarga más próximos a los datos experimentales de Crookston y Tullis (2013).

Las hipótesis 1 y 2, aunque muestran un error mayor que la hipótesis 3, en rangos altos de  $Ht/P$  obtienen resultados válidos. Además, estos dos métodos permiten obtener el coeficiente de descarga para valores pequeños de  $Ht/P$  con mayor precisión.

En cuanto a la agilidad a la hora de introducir la geometría y los parámetros necesarios en el programa, la hipótesis 2 es la más sencilla y por consiguiente rápida. Para las hipótesis 1 y 3 es necesario conocer las coordenadas o vértices del vertedero tipo laberinto a simular en Iber. Desde este punto de vista, la hipótesis 3 es la más compleja al requerir introducir tridimensionalmente toda la geometría.

## Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo brindado por la Fundación Séneca - Agencia de Ciencia y Tecnología de la Región de Murcia, en el proyecto denominado “Análisis de la capacidad de descarga de vertederos tipo laberinto y de la disipación de energía aguas abajo de los mismos”, referencia 20879/PI/18.

Los autores también agradecen las recomendaciones y sugerencias realizadas por el Dr. José M. Carrillo durante la realización del mencionado proyecto.

## Referencias

- Carrillo, J.M., Matos, J., and Lopes, R. (2019). “Numerical modeling of free and submerged labyrinth weir flow for a large sidewall angle.” *Environmental Fluid Mechanics*. DOI: 10.1007/s10652-019-09701-0.
- Crookston, B.M. (2010) “Labyrinth weirs.” *Ph.D. Thesis*, Utah State University, Logan, UT, USA
- Crookston, B.M., and Tullis, B.P. (2013). “Hydraulic design and analysis of labyrinth weirs II: nappe aeration, instability, and vibration.” *J. Irrig. Drain Eng.*, 139(5):371-377.
- Lopes, R., Matos, J., and Melo, J.F. (2009) “Discharge capacity for free-flow and submerged labyrinth weirs.” Proceeding 33rd IAHR congress: water engineering for a sustainable environment, Vancouver, Canada.
- Ministerio de Fomento Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino (2012). Manual básico del usuario IBER.
- Ros-Casajús, M. (2019). “Evaluación de la capacidad de un programa bidimensional para analizar el funcionamiento de vertederos no lineales tipo laberinto.” *Master Thesis*. E.T.S. de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos y de Ingeniería de Minas, Universidad Politécnica de Cartagena, Spain.
- Salazar, F., Mauro, J.S., Oñate, E., and Toledo, M. (2015). “CFD analysis of flow pattern in labyrinth weirs.” *Dam Protections against Overtopping and Accidental Leakage - Proceedings of the 1st International Seminar on Dam Protections Against Overtopping and Accidental Leakage*, Madrid, Spain.
- Savage, B.M., Crookston, B. M., and Paxson, G. S. (2016). “Physical and numerical modeling of large headwater ratios for a 15° labyrinth spillway.” *J. Hydraul. Eng.*, 142(11):04016046.
- Schleiss, A.J. (2011). “From Labyrinth to Piano Key weirs—a historical review.” *Proceedings of the International conference on Labyrinth and Piano Key Weirs*, Liege, Belgium.
- Tullis, B., Young, J., and Chandler, M. (2007) “Head-discharge relationships for submerged labyrinth weirs.” *J. Hydraul Eng* 133(3):248–254.