

Los aliviaderos tipo laberinto. Un nuevo enfoque para su cálculo hidráulico

C. Granell Ninot

JESÚS GRANELL, Ingenieros Consultores, España

M. A. Toledo Municio

Universidad Politécnica de Madrid, España

ABSTRACT: At present, The Polythencic University of Madrid, the *CEDEX* and *JESÚS GRANELL Ingenieros Consultores* Company are carrying out an investigation project on labyrinth spillways. As a part of this project, it is proposed a new method for the hydraulic calculation of this type of spillways, which is based on the main facts occurred: the obliquity of the diagonal faces of the weir referred to the direction of the flow upstream in the approximation, and the nappe interference. The method is going to be improved and validated by physical and numerical modelling as a part of the investigation project. However, the comparison of its preliminary results with other methods, and also with some physical models available provides encouraging results.

RESUMEN: En la actualidad la Universidad Politécnica de Madrid, el Centro de Experimentación de Obras Públicas (*CEDEX*) y la empresa *JESÚS GRANELL Ingenieros Consultores*, están llevando a cabo un proyecto de investigación en materia de aliviaderos tipo laberinto. Dentro de este proyecto se propone un nuevo método para el cálculo hidráulico de estos aliviaderos de tipo teórico – experimental de formulación sencilla y basado en los principales fenómenos que condicionan la capacidad hidráulica de estas estructuras: la oblicuidad de las caras diagonales del vertedero respecto de la dirección del flujo en la alimentación y la interferencia de láminas. El procedimiento va a ser mejorado y validado, dentro del proyecto de investigación comentado, mediante modelación física y numérica. No obstante, el contraste de sus resultados con otros procedimientos existentes y con los resultados de algunas modelaciones físicas disponibles ofrece resultados esperanzadores.

1 INTRODUCCIÓN

En la actualidad la Universidad Politécnica de Madrid, el Centro de Estudios Hidrográficos del *CEDEX* y la empresa *JESÚS GRANELL Ingenieros Consultores* están llevando a cabo un proyecto de investigación subvencionado por el Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino sobre la mejora de la capacidad de desagüe en presas existentes.

Dentro del referido proyecto de investigación, se encuentran los aliviaderos tipo laberinto que, como se conoce, pueden ofrecer una elevada capacidad hidráulica para sobre-elevaciones reducidas.

Clásicamente los aliviaderos tipo laberinto se calculan hidráulicamente mediante procedimientos realizados a partir de la extrapolación de estudios experimentales, hasta obtener unos ábacos o formulaciones que se aplican de manera genérica a cualquier geometría de aliviadero tipo laberinto.

Tales procedimientos, si bien constituyen una buena aproximación, son insuficientes exigiendo en muchos de los casos la modelación física del aliviadero a escala reducida. En la actualidad se ha abierto el campo de la modelación numérica de estructuras hidráulicas sin que haya llegado a reemplazar a la modelación física.

Se ha elaborado un procedimiento de cálculo, de tipo teórico – experimental y elevada sencillez tanto a nivel conceptual como en su aplicación, que se basa en el análisis de los principales fenómenos que afectan al comportamiento de un aliviadero tipo laberinto: oblicuidad del vertedero (en las caras de dirección diagonal) respecto del flujo en la alimentación, y la interferencia de láminas vertidas por las caras contiguas del vertedero.

Este procedimiento, que está siendo validado mediante un elevado número ensayos físicos así como mediante modelación numérica por el Método de los Elementos Finitos y las Partículas (PFEM) dentro del referido proyecto de investigación, a día de hoy

ofrece buenos resultados y se considera que puede contribuir a un mejor diseño y comprobación hidráulica de este tipo de estructuras.

2 MÉTODOS ACTUALES PARA EL CÁLCULO HIDRÁULICO DE UN ALIVIADERO TIPO LABERINTO

Existen tres maneras de analizar la hidráulica de un aliviadero tipo laberinto:

1. Mediante procedimientos experimentales de cálculo cuyos resultados se extrapolan a una determinada gama de geometrías y rangos de funcionamiento.
2. Mediante ensayos hidráulicos sobre modelaciones físicas a escala reducida.
3. Mediante modelaciones numéricas por el MEF.

Actualmente, el diseño inicial de los aliviaderos tipo laberinto se realiza por el primero de los tres medios comentados, diseño este que exige, generalmente, ser comprobado por una modelación física. La modelación numérica, que a día de hoy sigue exigiendo un importante costo en tiempo y recursos, permite realizar ajustes adecuados sobre los diseños iniciales, pero no ha eliminado, actualmente, la necesidad de construir modelos físicos a escala reducida.

Los procedimientos experimentales permiten el diseño y cálculo hidráulico de los vertederos tipo laberinto con bastante facilidad, mediante la aplicación de ábacos o ecuaciones sobre la geometría en cuestión. Los más comúnmente empleados son los siguientes:

1. El elaborado por A. Pinto de Magalhães en 1983.
2. El elaborado por Frederick Lux III and David L. Hinchliff en 1985.
3. El elaborado por J. Paul Tullis, Nosratollah Amanian and David Waldron en marzo de 1995.

3 UN NUEVO PROCEDIMIENTO PARA EL CÁLCULO HIDRÁULICO DE ALIVIADEROS TIPO LABERINTO

3.1 Generalidades

La particularidad de los aliviaderos tipo laberinto frente a los aliviaderos convencionales reside en la forma del vertedero, que es asimilable a un “zig-zag”. Esta especial morfología incrementa la longitud de vertedero “a encajar” en un determinado “espacio disponible”, con el fin de aumentar la capacidad de evacuación respecto a la de un vertedero

recto convencional ubicado en el mismo espacio y para igual carga hidráulica.

Esta supuesta ventaja —mayor capacidad hidráulica para iguales condiciones de espacio disponible y carga hidráulica— se hace incierta cuando la carga hidráulica sobre el umbral del vertedero crece por encima de determinados valores.



Figura N° 1. Aliviadero tipo laberinto en el embalse de Puentes (Murcia)

Un vertedero tipo laberinto se construye a partir de la disposición de manera repetida, de módulos iguales a lo largo de una directriz geométrica. De esta manera se define a partir del número de módulos que se adosan y la definición genérica del módulo.

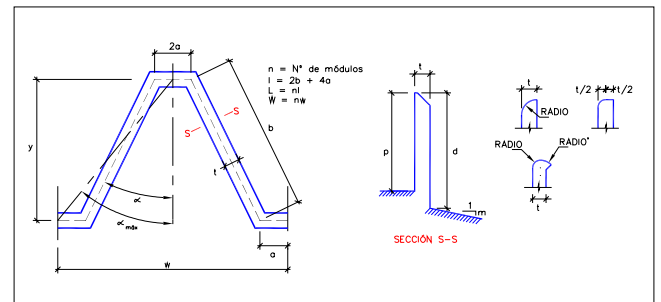


Figura N° 2. Aliviadero tipo laberinto. Definición geométrica

Se definen, por tanto, los siguientes parámetros geométricos:

a: Semilongitud de muros longitudinales (m)

b: Longitud de muros diagonales (m)

m: Pendiente del canal aguas abajo del vertedero

$l = 4a + 2b$: Longitud desarrollada del módulo (m)

w: Longitud recta o proyectada del módulo (m)

y: Distancia entre vértices del módulo media en la dirección ortogonal a la directriz (m)

α : Ángulo de los muros diagonales con el eje del módulo

$\alpha_{m\acute{a}x}$: Ángulo correspondiente al módulo triangular de misma “*w*” y mismo “*y*”

n: Número de módulos

p : Altura del vertedero en su parte de aguas arriba (m)

d : Altura del vertedero en su parte de aguas abajo (m)

t : Espesor de los muros (m)

$W = nw$. Longitud total recta o proyectada del vertedero en laberinto (m)

$L = nl$. Longitud total desarrollada del laberinto (m)

Hay además una serie de parámetros adimensionales que permiten caracterizar la geometría:

$\frac{l}{w}$: Amplificación de longitud

$\frac{w}{p}$: Relación de aspecto vertical

$\frac{h}{p}$: Relación carga-altura o carga hidráulica relativa. Siendo h la carga hidráulica, por aguas arriba, medida desde el umbral.

Si se analiza con detenimiento la forma de los aliviaderos tipo laberinto y se relaciona con lo que se conoce de su comportamiento hidráulico, es posible establecer que existen dos tipos de fenómenos que condicionan su funcionamiento¹, y que lo distinguen de los aliviaderos convencionales:

- La oblicuidad de las caras diagonales del vertedero respecto de la dirección del flujo en la alimentación
- La interferencia de láminas vertientes por las caras adyacentes de cada módulo del vertedero

El nuevo procedimiento para el cálculo de aliviaderos tipo laberinto que se propone, parte del análisis de estos dos fenómenos: el primero se analiza, de una forma teórica, mediante la aplicación del teorema de la cantidad de movimiento, mientras que el segundo se analiza a partir de investigaciones experimentales pretéritas.

3.2 La oblicuidad del vertedero

El análisis del comportamiento hidráulico de un vertedero, situado en un canal, y oblicuo a la dirección del flujo aguas arriba a partir de la aplicación del teorema de la cantidad de movimiento, es analizado con detenimiento por A. Osuna. Su desarrollo matemático se ha adaptado para ser aplicado al caso de aliviaderos tipo laberinto y se adjunta a continua-

ción (A. Osuna, 2000. "Determinación teórica del desagüe en un vertedero oblicuo")

El teorema de la cantidad de movimiento establece que la fuerza que se ejerce sobre una porción de fluido en movimiento permanente es igual al flujo de la cantidad de movimiento en su contorno. Se ha procedido a aplicar el teorema sobre un fluido perfecto que discurre por una canal y en el que se ubica un vertedero oblicuo.

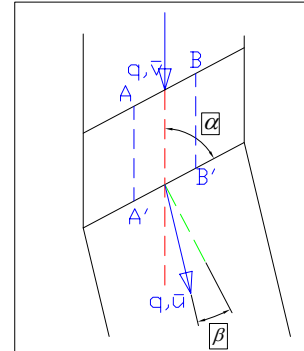


Figura N° 3. Vertedero oblicuo en un canal

Si se selecciona la porción de fluido AA' y B'B, siendo la distancia AB la unidad (para hablar en términos de caudales unitarios), se obtiene que la cantidad de movimiento pasa de $\rho q \bar{v}$ en AB a $\rho q \bar{u}$ en A'B', siendo:

ρ : peso específico del agua (t/m^3)

q : caudal unitario ($m^3/s/m$)

\bar{v} : vector velocidad en AB (m/s).

\bar{u} : vector velocidad en A'B' (m/s)

β : ángulo que forman las líneas de corriente a la salida del vertedero con la perpendicular al mismo.

Por ser el flujo de la cantidad de movimiento igual a la resultante de las fuerzas exteriores actuantes sobre la porción, la proyección de este flujo sobre el plano del vertedero debe ser nula:

$$\rho q \bar{v} \cos \alpha - \rho q \bar{u} \sin \beta = 0 \quad (1)$$

que es equivalente a:

$$v = \frac{u \sin \beta}{\cos \alpha} \quad (2)$$

El caudal vertido por unidad de longitud de vertedero:

$$q_a = \bar{u} h_c \cos \beta \quad (3)$$

En donde h_c es el espesor de lámina contraída sobre el vertedero y que puede tomarse $0,667h$.

El caudal por unidad de anchura de canal:

$$q = v(p + h) = \frac{q_a}{\cos(90 - \alpha)} = \frac{\bar{u} h_c \cos \beta}{\cos(90 - \alpha)} \quad (4)$$

Sustituyendo el valor de v de (1) en (3):

¹ Dejando al margen el posible anegamiento por aguas abajo del vertedero y que es un fenómeno común al conjunto de los aliviaderos.

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{h_c}{p+h} \operatorname{tg}(90 - \alpha) \quad (5)$$

Que permite calcular el caudal por unidad de longitud de vertedero:

$$q_a = \frac{2}{3} C_d \sqrt{2g} h^{3/2} \cos \beta \quad (6)$$

El resultado que se obtiene es que la dirección del flujo a la salida del vertedero es una intermedia entre la perpendicular al paramento del vertedero y la del flujo en el canal aguas arriba del mismo. Esta dirección depende de la relación entre el espesor de lámina contraída sobre el vertedero h_c y el calado total aguas arriba del vertedero $p+h$ en un punto suficientemente alejado. De esta manera:

- Cuando esta relación $h_c/(p+h)$ es muy pequeña, el flujo a la salida del vertedero adopta una dirección cercana a la perpendicular al paramento del mismo. El caudal total desaguado se maximiza con relación al que desaguaría un vertedero normal al canal.
- Para valores crecientes de la relación $h_c/(p+h)$ el flujo a la salida del vertedero adopta una dirección que se acerca, cada vez más, a la del canal y el caudal total desaguado se va acercando al que desaguaría un vertedero normal a la dirección del flujo aguas arriba del mismo.

Las expresiones obtenidas se pueden aplicar a un aliviadero en laberinto, sin más que integrar las ecuaciones a lo largo de la directriz de uno de los módulos y variando el ángulo β .

La aplicación de esta formulación en vertederos en laberinto con importantes desarrollos, como es usual en este tipo de estructuras, establece que el funcionamiento hidráulico se ve fuertemente condicionado por la oblicuidad de los mismos con relación a la dirección del flujo.

3.3 La interferencia de láminas

Este fenómeno se produce por el impacto de las láminas vertientes en la zona próxima a los vértices de aguas arriba del vertedero. Estos impactos generan pérdidas de carga que reducen la capacidad hidráulica del vertedero.

Indlekofer y Rouvé, analizan el fenómeno de interferencia de láminas en vertederos poligonales y el efecto que esta interferencia tiene en la capacidad hidráulica del vertedero (Horst Indlekofer and Gerhard Rouvé, 1975. "Discharge over polygonal weirs").

Se presenta una figura de la investigación referida.

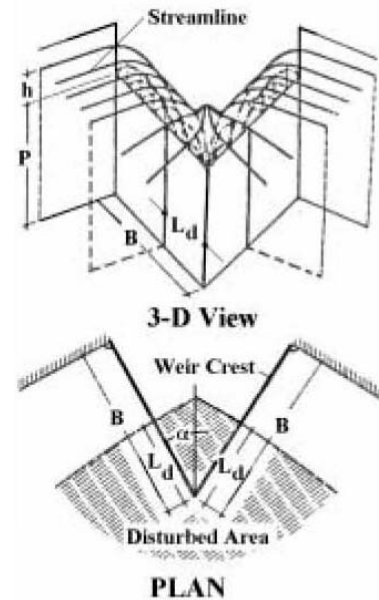


Figura N° 4. Indlekofer y Rouve, 1975. Interferencia de láminas

Ellos definen una serie de parámetros:

- l_d : longitud de interferencia de láminas o zona de cada pared del vertedero que se ve afectada por la interferencia de láminas.
- h : carga hidráulica sobre el vertedero

En la figura mostrada C_m es un coeficiente que mide la pérdida de capacidad en la zona de interferencia de láminas l_d que se denomina coeficiente de interferencia de láminas y μ es el coeficiente de desagüe, equivalente a C_d .

De este modo, el caudal evacuado por cada una de las caras del vertedero será:

$$Q = \frac{2}{3} \mu \sqrt{2g} h^{1.5} (b - (1 - C_m) l_d) \quad (7)$$

$$l_{de} = (1 - C_m) l_d \quad (8)$$

$$Q = \frac{2}{3} \mu \sqrt{2g} h^{1.5} (b - l_{de}) \quad (9)$$

En donde $b-l_{de}$ representa la longitud efectiva del vertedero².

De la referida investigación se obtiene una relación lineal, a escala logarítmica, como la que se muestra:

² Se ha cambiado la nomenclatura del parámetro L_{de} de Indlekofer y Rouvé, 1975, por l_{de} para que toda la notación sea coherente.

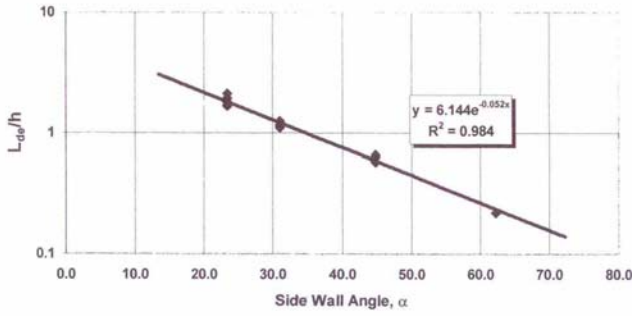


Figura N° 5. Indlekofer y Rouve, 1975. Relación L_{de} - α

De tal modo que

$$\frac{l_{de}}{h} = 6.1e^{-0.052\alpha} \quad (10)$$

Expresión que es de aplicación siempre que:

$$\frac{l_{de}}{b} \leq 0,3 \quad (11)$$

Y de la que resulta:

$$Q = \frac{2}{3} \mu \sqrt{2gh^{1.5}} (2b - 12,2he^{-0.052\alpha}) \quad (12)$$

4 FORMULACIÓN DEL PROCEDIMIENTO

La ecuación (12) permite la obtención de la capacidad hidráulica en un vertedero poligonal con la alimentación ortogonal a las paredes del vertedero. No obstante la alimentación en vertederos tipo laberinto tiene la dirección del canal, por lo que para aplicarla a estas estructuras hidráulicas exige una corrección.

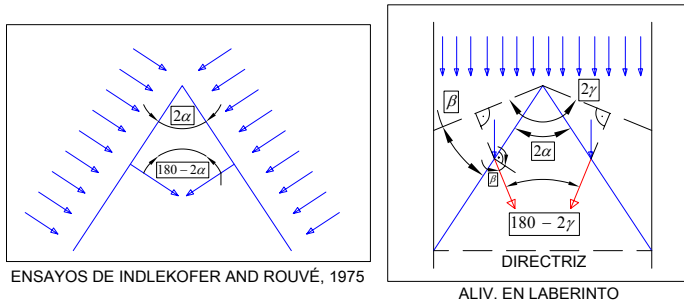


Figura N° 6. Interferencia de láminas en vertederos en laberinto

En efecto, tal y como se muestra en la figura, la interferencia de láminas en el caso de los ensayos de Indlekofer y Rouvé se produce con las líneas de corriente perpendiculares a las paredes del mismo, mientras que en el caso que nos ocupa al ser la alimentación ortogonal a la directriz del laberinto, es preciso sustituir el ángulo 2α por el equivalente 2γ que resulta de aplicar el teorema del flujo de la cantidad de movimiento.

$$\gamma = \alpha + \beta(h, \alpha, p) \quad (13)$$

β se calcula mediante la expresión (5):

La expresión final que permitirá obtener la capacidad hidráulica es:

$$Q = \frac{2}{3} \mu \sqrt{2gh^{1.5}} [2b \cos \beta - 2l_{de}'] \quad (14)$$

$$\frac{l_{de}'}{h} = 12,2e^{-0.052(\alpha+\beta)} \quad (15)$$

De tal modo que si se sustituyen los diversos parámetros se obtiene:

$$Q = \frac{4}{3} \mu \sqrt{2gh^{1.5}} [b \cos \beta - 6,1he^{-0.052(\alpha+\beta)}] \quad (16)$$

Esta ecuación se puede aplicar para el cálculo de la capacidad hidráulica de un vertedero tipo laberinto con módulos triangulares ($\alpha=0$).

No obstante, los aliviaderos tipo laberinto suelen tener formas trapeziales, por lo que se ha realizado una simplificación que consiste en calcular la pérdida de capacidad derivada de la interferencia de láminas para un vertedero triangular equivalente, esto es, aquel con la misma w , pero con $\alpha = \alpha_{m\acute{a}x}$:

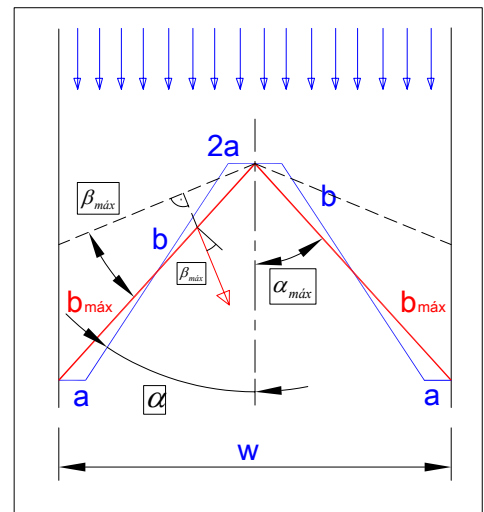


Figura N° 7. Interferencia de láminas. Simplificación para vertederos trapeziales

La longitud de interferencia de láminas efectiva será:

$$l_{de} = 6.1he^{-0.052(\alpha_{m\acute{a}x} + \beta_{m\acute{a}x})} \quad (17)$$

De manera que (16) se convierte en:

$$Q = \frac{4}{3} \mu \sqrt{2gh^{1.5}} [b \cos \beta - 6,1he^{-0.052(\alpha_{m\acute{a}x} + \beta_{m\acute{a}x})}] \quad (18)$$

$$\beta_{m\acute{a}x} = \text{atg} \left(\frac{0,667h}{p+h} \text{tg}(90 - \alpha_{m\acute{a}x}) \right) \quad (19)$$

$$\alpha_{m\acute{a}x} = \operatorname{atg}\left(\frac{0,5w\operatorname{tg}\alpha}{0,5w - 2a}\right) \quad (20)$$

$$\beta = \operatorname{atg}\left(\frac{0,667h}{p+h}\operatorname{tg}(90 - \alpha)\right) \quad (5)$$

El factor μ es el coeficiente de desagüe de un vertedero en pared delgada que puede tomarse de la conocida expresión experimental:

$$\mu = 0,611 + 0,075 \frac{h}{p} \quad (21)$$

La ecuación (18) es aplicable a cualquier geometría de vertedero tipo laberinto.

Hasta el momento, el procedimiento propuesto se ha aplicado a tres geometrías distintas de vertederos tipo laberinto y que han sido ensayadas hidráulicamente en modelos a escala reducida. Las desviaciones obtenidas han sido de menos del 10%.

Además, se han contrastado los resultados con los de otros dos procedimientos de cálculo existentes (Pinto de Magalhães, 1983 y Tullis, Amanian y Waldron, 1995) obteniéndose diferencias, en general, inferiores al 10%.

5 CONCLUSIÓN

En la actualidad se está llevando a cabo una investigación sobre aliviaderos tipo laberinto dentro del proyecto de investigación "Mejora de la capacidad de desagüe de presas existentes mediante aliviaderos en sifón y aliviaderos en laberinto" que se desarrolla con las ayudas relativas a los proyectos I+D+i correspondientes al subprograma de medioambiente y de ecoinnovación del Ministerio de Medio Ambiente y que está desarrollando, de manera conjunta la U.P.M., el CEDEX y la empresa JESÚS GRANELL Ingenieros Consultores.

Como parte de esta investigación se ha elaborado un procedimiento para el cálculo hidráulico de aliviaderos tipo laberinto, que se basa en los dos principales fenómenos que condicionan el funcionamiento de este tipo de aliviaderos: la oblicuidad de las caras diagonales respecto de la dirección de la alimentación hidráulica y la interferencia de láminas existente en la zona de los vértices de aguas arriba.

La aproximación al primero de los fenómenos se ha realizado, de manera teórica, mediante la aplicación del teorema de la cantidad de movimiento, mientras que la aproximación al segundo se ha realizado a partir de la formulación obtenida de un estudio experimental sobre vertederos poligonales y mediante una simplificación del vertedero en laberinto trapecial a uno triangular equivalente.

Con ello se ha obtenido una formulación consistente en una única ecuación, que permite el cálculo hidráulico de cualquier vertedero tipo laberinto.

El procedimiento se ha comprobado contrastándolo con los resultados de tres modelos físicos relativos a tres vertederos tipo laberintos existentes. Se han obtenido desviaciones inferiores al 10%.

Asimismo, se han contrastado los resultados del procedimiento propuesto con los de otros dos procedimientos (Pinto de Magalhães, 1983 y Tullis, Amanian y Waldron, 1995). Se han obtenido diferencias, en general, inferiores al 10%.

Se considera que es posible mejorar el procedimiento propuesto especialmente en lo relativo al fenómeno de interferencia de láminas. Para ello y para poder validar el procedimiento se va a realizar una campaña de ensayos físicos sobre modelos a escala reducida, en los que además se van a analizar otros fenómenos tales como las condiciones de alimentación al vertedero.

6 AGRADECIMIENTOS

Hay que agradecer al Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino las ayudas para la realización del proyecto "Mejora de la capacidad de desagüe de presas existentes mediante aliviaderos en sifón y aliviaderos en laberinto" desarrollado de manera conjunta por la U.P.M., el CEDEX y la empresa JESÚS GRANELL Ingenieros Consultores, y relativas a los proyectos I+D+i correspondientes al subprograma de medioambiente y de ecoinnovación y sin las que la presente investigación no habría sido posible.

7 REFERENCIAS

- H. T. Falvey, 2003. "Hydraulic design of labyrinth weirs". ASCE PRESS.
- H. Indlekofer and G. Rouvé, 1975. "Discharge over polygonal weirs". Journal of the hydraulics division, Proceedings ASCE.
- F. Lux III and D.L. Hinchliff, 1985 "Design and construction of labyrinth spillways". Quinzième Congrès des Grands Barrages, Lausanne
- A.P. Magalhães, 1983. "Descarregadores em labirinto". Laboratorio Nacional de Engenharia Civil (Portugal)
- A. Osuna, 2000. "Determinación del desagüe en un vertedero oblicuo". Revista de Obras Públicas (oct, 2000). Año 147 (3.402).
- J.P. Tullis, N. Amanian, D. Waldron, 1995. "Design of labyrinth spillways". Journal of Hydraulic Engineering, Vol 121, No 3.