

Vertedores de laberinto

Ing. Susel Lobaina Fernández

Centro de Investigaciones Hidráulicas, Inst. Superior Politéc. José Antonio Echeverría (Cujae)

email: slobaina@cih.cujae.edu.cu

Dr. Rafael Pardo Gómez

Centro de Investigaciones Hidráulicas, Inst. Superior Politéc. José Antonio Echeverría (Cujae)

email: rpardo@cih.cujae.edu.cu

Dr. Evio Alegret Breña

Centro de Investigaciones Hidráulicas, Inst. Superior Politéc. José Antonio Echeverría (Cujae)

email: evio@cih.cujae.edu.cu

RESUMEN

Se presenta en apretada síntesis el estado del arte sobre los aliviaderos de laberinto, destacándose los principales resultados experimentales sobre el tema expresados en forma de gráficos, tablas y ecuaciones, concluyendo con dos hojas de cálculo elaboradas por los autores del presente trabajo que facilitan las labores de diseño hidráulico de estos aliviaderos. Finalmente, quedan evidenciadas las necesidades de continuar los estudios experimentales de este tipo de obra, en especial en dos aspectos que los autores consideran muy importantes: el empleo de otros tipos de vertedores diferentes a los de caída libre y las estructuras aguas abajo del laberinto.

Palabras clave: aliviaderos de laberinto, ápices de entrada y de salida, ciclos del laberinto, interferencia de láminas vertientes, sumergencia local

Labyrinth Weirs

ABSTRACT

The state of the art about labyrinth spillways is presented in a very tight synthesis. Main experimental results about the subject are introduced and expressed in the form of graphics, tables and equations. Additionally included are two work sheets that have been elaborated by the authors of this paper to facilitate the hydraulic design process of this type of spillways. Finally, the need to continue experimental studies of this type of structure is made apparent, specially regarding two aspects which the authors consider of primary importance: the use of other spillway types different from the free fall ones and the structures located downstream of the labyrinth.

Keywords: labyrinth weirs, upstream and downstream apex, cycle configuration, nappe interference, local submergence.

INTRODUCCIÓN

Por una parte, los aliviaderos de laberinto son particularmente atractivos cuando se valora la necesidad del recrecimiento de un embalse gracias a que dan la posibilidad de incrementar significativamente la longitud vertedora sin tener que aumentar el ancho de la franja de terreno que ocupa el aliviadero existente; por otro lado, aún se requiere el desarrollo de investigaciones científicas para elaborar herramientas de diseño que permitan elaborar proyectos confiables y completos de estos aliviaderos.

CARACTERÍSTICAS GENERALES

Un aliviadero de laberinto se puede describir como un vertedor frontal que es plegado en planta para tener mayor longitud vertedora para un ancho dado del aliviadero, es decir, mayor longitud vertedora sin necesidad de ampliar la franja de terreno que abarca el aliviadero. La figura 1 muestra un esquema típico. Un aliviadero de laberinto tiene ventajas en comparación a vertedores de vertimiento frontal incluidos los vertedores de cresta roma (también denominados tipo Perfil Práctico sin Vacío) (Pardo y Alegret 2012). La longitud total de un aliviadero de laberinto es generalmente de tres a cinco veces el ancho del aliviadero. Su capacidad varía con la carga y es por lo general alrededor del doble que la de un vertedor estándar para el mismo ancho.

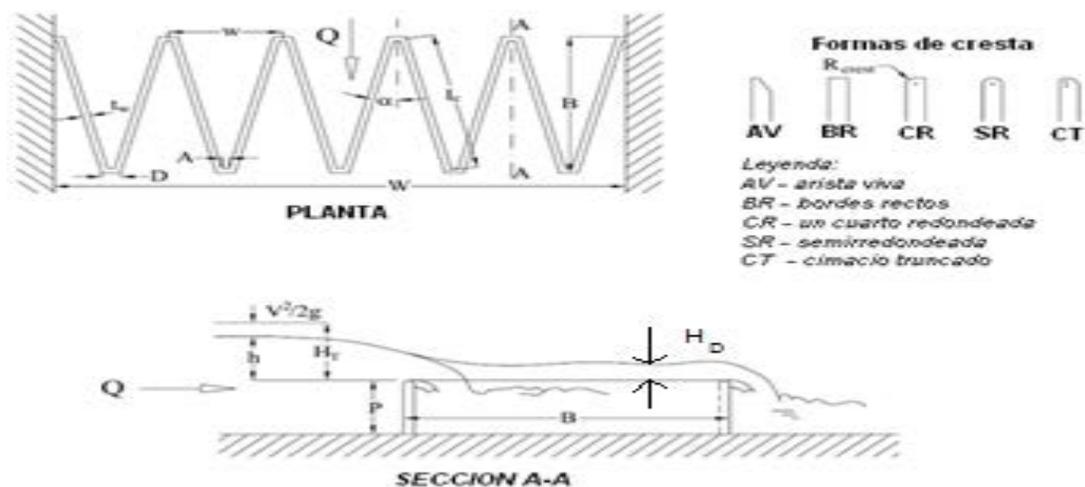


Figura 1. Esquema de un vertedor de laberinto y principales parámetros geométricos

[Fuente: Crookston and Tullis(2012a) = C & T(2012a)]

Los aliviaderos de laberinto pueden ser usados para incrementar la capacidad de descarga para una elevación (cota) y longitud dadas de la cresta o para incrementar el volumen de almacenamiento en el embalse, manteniendo la capacidad de evacuación del aliviadero. Las variables que es necesario considerar en el diseño de un laberinto incluyen la longitud y ancho del laberinto, la altura de la cresta, el ángulo del laberinto, el número de ciclos y otras variables menos importantes como el espesor, forma de la cresta y configuración del ápice.

Configuraciones de uso más frecuente

En la figura 2 se muestran las configuraciones de uso más frecuente utilizadas para aliviaderos de laberinto, teniendo en cuenta tanto las posibles aplicaciones prácticas de los mismos como la búsqueda de configuraciones de mejor eficiencia de la descarga; esto es, mayor coeficiente de gasto.

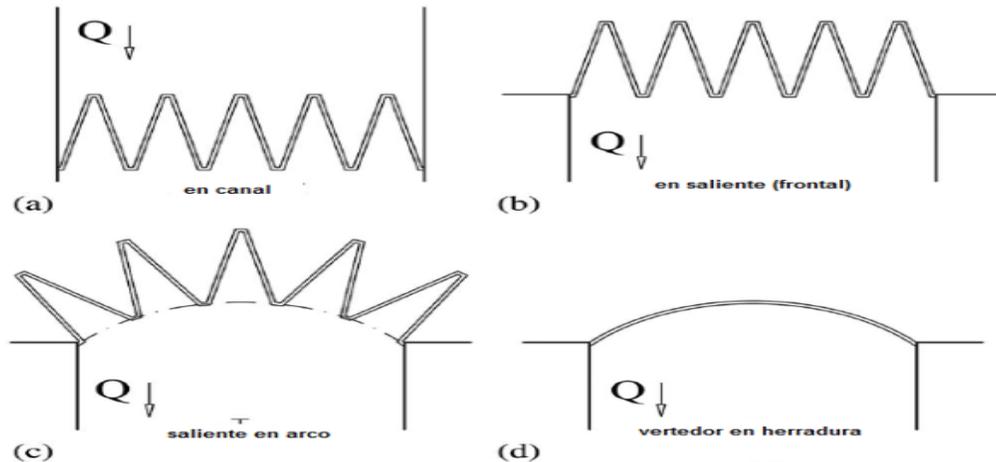


Figura 2. Configuraciones frecuentes de vertedores de laberinto: (a) en canal; (b) en saliente (frontal); (c) saliente en arco; (d) vertedor en herradura [Fuente: C & T 2012a]

Vertedores de laberinto en saliente (frontal). Ecuación fundamental

La ecuación fundamental para vertedores frontales incluye la carga total medida aguas arriba en relación a la cresta, H_T , y utiliza la longitud a lo largo de la cresta del vertedor como la longitud característica, ecuación (1).

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

en la que:

Q : descarga del vertedor (m^3/s);

C_d : coeficiente de gasto (adimensional);

g : aceleración de la gravedad constante, m/s^2 ;

L_c : longitud total efectiva medida a lo largo de la cresta del vertedor, m;

H_T : carga total aguas arriba del vertedor, m, siendo $H_T = h + V^2/2g$, h es la carga estática y V la velocidad media del flujo en la sección transversal. Ver figura 1.

Para un vertedor frontal sin contracciones laterales y con flujo de aproximación perpendicular, la longitud efectiva L_c es la longitud real del vertedor. El coeficiente de gasto (de forma frecuente denominado en la literatura especializada coeficiente de cresta) es función de H_T/P , del espesor de la pared t , de la configuración de la cresta, y de la aireación de la lámina vertiente y P es la altura del paramento superior. La figura 3 muestra la variación del coeficiente de cresta con H_T/P para un vertedor frontal aireado con $t/P = 1/6$ y la cresta redondeada en el borde de aguas arriba con un radio de $P/12$.

A la curva de la figura 3 corresponde como ecuación polinómica de mejor ajuste presentada por Tullis et al. (1995) la ecuación (2) que se indica a continuación:

$$C_d = 0,49 + 1,46(H_T/P) - 2,56(H_T/P)^2 + 1,44(H_T/P)^3; \text{ para } H_T/P < 0,7 \text{ y } \alpha = 90^\circ \quad (2)$$

Coeficiente de gasto de vertedores de laberinto con configuración en saliente

Partiendo principalmente de los trabajos desarrollados por Crookston (2010), es posible sintetizar las consideraciones que se desarrollan a continuación.

El coeficiente de gasto C_d es afectado por varios factores que pueden ser agrupados en tres conjuntos:

- Geométricos (esto es, P , t_w , A , α , forma de la cresta)
- Condiciones del flujo (H_T , ángulo de aproximación del flujo, sumersión local, interferencia de las láminas vertientes)
- Condiciones de aireación de la lámina vertiente

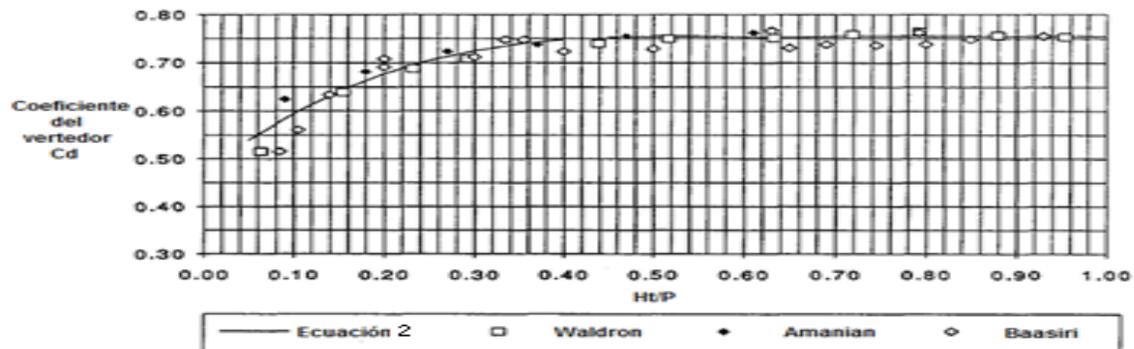


Figura 3. Coeficiente de cresta del vertedor frontal [Fuente: Tullis et al. (1995)]

Los valores de C_d están presentados en función de H_T/P para vertedores de laberinto trapezoidales no ventilados para $6^\circ \leq \alpha \leq 35^\circ$, en la figura 4 y figura 5. Los datos para $\alpha = 90^\circ$ (vertedores frontales) se incluyen para comparación.

Los valores del C_d de los vertedores de laberinto en las figuras 4 y 5 fueron ajustados por Crookston mediante la ecuación (3) y los correspondientes coeficientes de ajuste se presentan en las tablas 1 y 2. La ecuación (4) fue usada para los datos de $\alpha = 90^\circ$ y los correspondientes coeficientes de ajuste son presentados en las tablas mencionadas. Las curvas han sido validadas para $0,05 \leq H_T/P < 0,9$; dado el buen comportamiento de los resultados las curvas han sido extrapoladas.

$$\text{Para vertedores de laberinto: } C_d = A \left[\left(\frac{H_T}{P} \right)^B \left(\frac{H_T}{P} \right)^C \right] + D \quad (3)$$

$$\text{Para vertedores frontales: } C_{d(90^\circ)} = \frac{1}{A + B \frac{H_T}{P} + \frac{C}{H_T/P}} + D \quad (4)$$

En Crookston (2010) se presenta una detallada comparación entre los resultados de Tullis et al. (1995) y los del primero, demostrándose la superioridad de los obtenidos por Crookston.

En relación con el comportamiento de la aireación de la lámina y su estabilidad

El comportamiento de la lámina y de la cavidad de aire debajo de ella influyen en la eficiencia de la descarga (léase C_d). En los vertedores de laberinto se pueden presentar cuatro condiciones diferentes de aireación (mostradas en la figura 6): adherida, aireada, parcialmente aireada y ahogada.

La condición de aireación es influida por la forma de la cresta, H_T , la profundidad y turbulencia del flujo debajo de la lámina, el momentum y trayectoria del flujo pasando sobre la cresta y la presión debajo de la lámina (subatmosférica para no ventiladas y la atmosférica para láminas ventiladas).

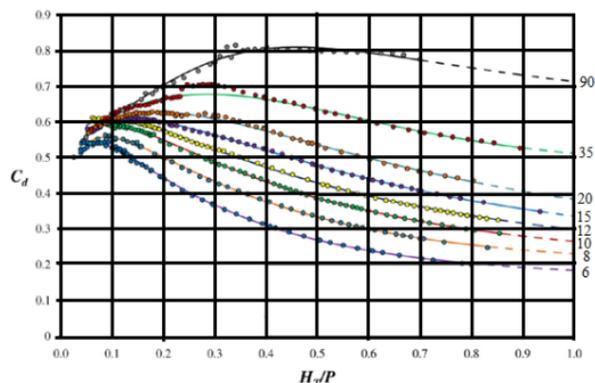


Figura 4. C_d vs H_T/P para vertedores de laberinto trapezoidales con cresta 1/4 redondeada [Fuente: Crookston(2010)]

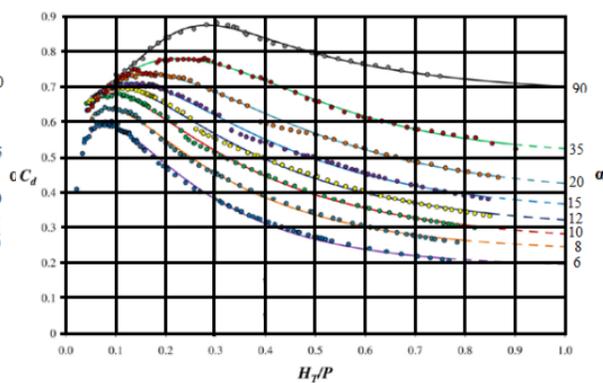


Figura 5. C_d vs H_T/P para vertedores de laberinto trapezoidales con cresta semi-redondeada [Fuente: Crookston(2010)]

Tabla 1. Coeficientes de ajuste de las curvas para vertedores de laberinto de cresta 1/4 redondeada y vertedores frontales, validados para $0,05 \leq H_T/P < 0,9$

α (grados)	A	B	C	D
6	0,02623	-2,681	0,3669	0,1572
8	0,03612	-2,576	0,4104	0,1936
10	0,06151	-2,113	0,4210	0,2030
12	0,09303	-1,711	0,4278	0,2047
15	0,10890	-1,723	0,5042	0,2257
20	0,11130	-1,889	0,5982	0,2719
35	0,03571	-3,760	0,7996	0,4579
90	-2,3800	6,476	1,3710	0,5300

[Fuente: Crookston (2010)]

La tabla 3 presenta el rango de H_T/P que fue observado en ensayos en modelos físicos llevados a cabo por Crookston and Tullis (2012a) para cada condición de aireación de la lámina en vertedores de laberinto un cuarto redondeados y semirredondeados.

Durante los referidos ensayos fue observado un fenómeno, al cual se le ha denominado inestabilidad de la lámina. El mismo es caracterizado por una lámina cuya trayectoria oscila (variaciones temporales) y en ocasiones está acompañado por cambios en las condiciones de la aireación para un caudal dado. Tales inestabilidades son fenómenos de baja frecuencia que están acompañados por un ruido perceptible causado por la presencia y desaparición de aire debajo de la lámina. Para altos caudales, la formación de la cavidad de aire y la estabilidad de la lámina disminuyen. Los rangos de H_T/P en los que la inestabilidad ocurre se indican en la tabla 4. Se recomienda que esos rangos sean evitados, al igual que las vibraciones, fluctuaciones de presión, y el ruido puede subir lo suficiente de nivel como para ser indeseable o alarmante.

En relación con la interferencia de láminas y sumersión local

En los aliviaderos de laberinto hasta ahora construidos se presentan inobjetablemente dos fenómenos propios de las características de funcionamiento de esas estructuras, son ellas la interferencia de láminas y la sumersión local. El término “interferencia de láminas” denota una reducción de la eficiencia hidráulica del aliviadero de laberinto causada por la colisión o interacción de las láminas en las cercanías del ápice de aguas arriba (ver figura 7).

Tabla 2. Coeficientes de ajuste de las curvas para vertedores de laberinto de cresta semirredondeada y vertedores frontales, validados para $0,05 \leq H_T/P < 0,9$

α (grados)	A	B	C	D
6	0,009447	-4,039	0,3955	0,1870
8	0,017090	-3,497	0,4048	0,2286
10	0,029900	-2,978	0,4107	0,2520
12	0,030390	-3,102	0,4393	0,2912
15	0,031600	-3,270	0,4849	0,3349
20	0,033610	-3,500	0,5536	0,3923
35	0,018550	-4,904	0,6697	0,5062
90	-8,60900	22,650	1,8120	0,6375

[Fuente: Crookston (2010)]

Tabla 3. Condiciones de aireación de la lámina y los correspondientes rangos de H_T/P para vertedores de laberinto

α ($^\circ$)	Un cuarto redondeada (H_T/P)				Semirredondeada (H_T/P)			
	Adhe-rida	Aireada	Parcialm. aireada	Aho-gada	Adhe-rida	Aireada	Parcialm. aireada	Ahogada
6	<0,050	0,051-0,256	0,256-0,319	>0,319	<0,165	0,165-0,298	0,298-0,405	>0,405
8	<0,050	0,057-0,288	0,288-0,364	>0,364	<0,165	0,165-0,312	0,312-0,465	>0,465
10	<0,050	0,061-0,293	0,293-0,479	>0,479	<0,219	0,219-0,283	0,283-0,505	>0,505
12	<0,050	0,061-0,275	0,275-0,510	>0,510	<0,250	-	0,250-0,530	>0,530
15	<0,050	0,052-0,256	0,256-0,508	>0,508	<0,306	-	0,306-0,560	>0,560
20	<0,050	0,053-0,240	0,240-0,515	>0,515	<0,363	-	0,363-0,599	>0,599
35	<0,050	0,059-0,232	0,232-0,515	>0,515	<0,141	0,140-0,185	0,411-0,460	>0,460

[Fuente: C & T 2012a]

Tabla 4. Condiciones de operación inestable de la lámina en vertedores de laberinto

α ($^\circ$)	Un cuarto redondeada (H_T/P)	Semirredondeada (H_T/P)
6	No	No
8	No	No
10	No	0,325-0,326
12	0,300-0,350	0,329-0,385
15	0,271-0,468	0,332-0,577
20	0,223-0,530	0,363-0,599
35	0,215-0,700	0,411-0,460

[Fuente: C & T 2012a]

La región de sumersión local (ver figura 7) se inicia cerca de los ápices de aguas arriba de los ciclos de salida y crece con H_T hasta que eventualmente el laberinto completo esté sumergido independientemente del control de tirantes aguas abajo (es decir, el comportamiento del flujo del vertedor de laberinto tiende hacia el de un vertedor de cresta ancha). En adición a la sumersión local, otros subproductos hidráulicos de la colisión de las láminas del vertedor de laberinto incluyen las olas levantadas y atrapamiento de aire en el ciclo de aguas abajo (ver figura 8).

Según se muestra en la figura 7, el tamaño de la región afectada por la sumersión local y colisión de las láminas puede variar con los factores siguientes: α , A_c , forma de la cresta, P , H_T y condiciones de aireación de la lámina; los efectos de la sumersión local y otros parámetros influyentes no son explícitamente considerados por separado en métodos estándares de diseño de aliviaderos de laberinto. En la comparación de dos aliviaderos de laberinto con α , t_w , P , forma de la cresta, y L_c comunes, pero variando el número de ciclos (esto es, $N = 4$ y $N = 8$), cada ciclo debía desarrollar regiones de sumersión de tamaño similar. Consecuentemente, el laberinto de

$N = 4$ debe tener una capacidad de descarga mayor en relación con el de $N = 8$ debido al menor porcentaje de la cresta total que es afectada por la colisión de las láminas y la sumersión local, como se muestra en la figura 9.

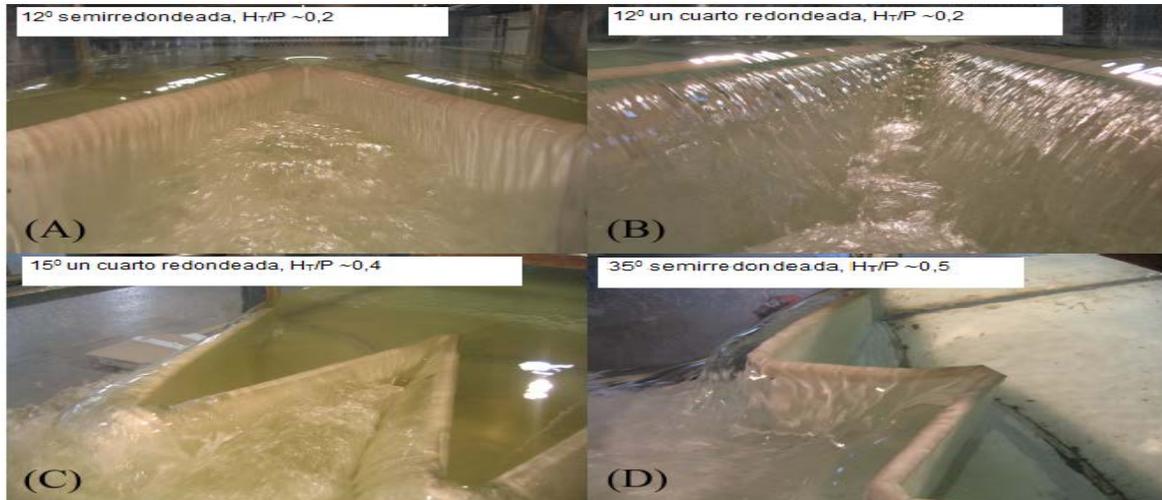


Figura 6. Condiciones de aireación de la lámina: adherida (A), aireada (B), parcialmente aireada (C) y ahogada (D). [Fuente: Crookston (2010)]

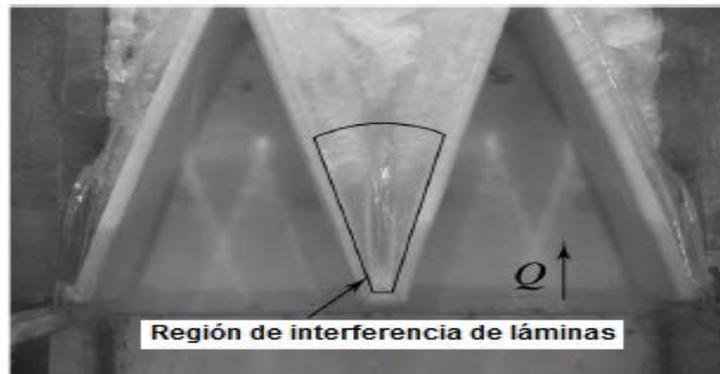


Figura 7. Colisión de las láminas vertientes sobre paredes adyacentes y el ápice [Fuente: C & T 2012a]

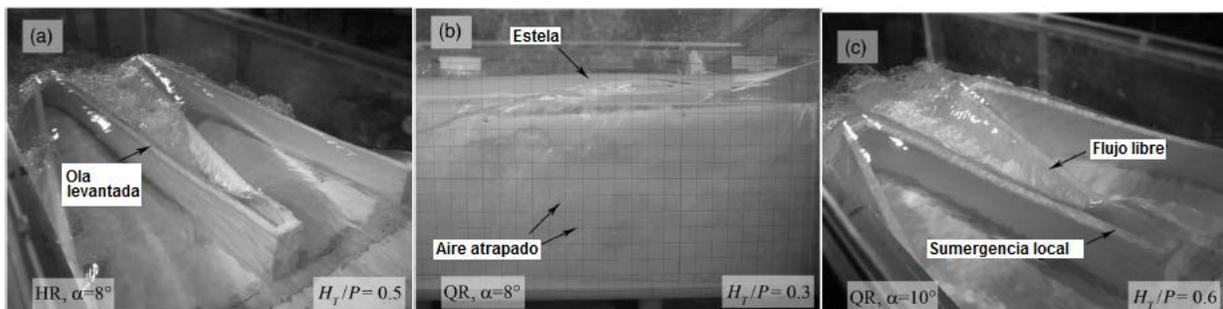


Figura 8. Efectos de la interferencia de láminas: a) olas levantadas, b) estela y aire atrapado, c) sumersión local. [Fuente: C & T 2012a]

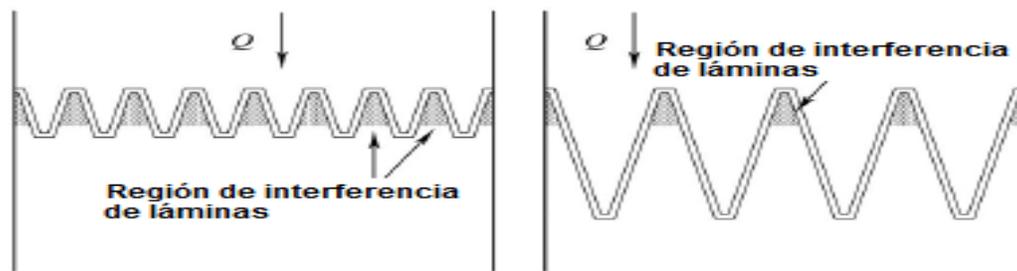


Figura 9. Ejemplo de región de interferencia de lámina para lámina aireada a baja H_T/P . [Fuente: C & T 2012a]

Diseño y análisis de vertedores de laberinto con configuración en saliente

El procedimiento recomendado por Crookston para el diseño de vertedores de laberinto es presentado en la tabla 5. La sección inicial de la tabla incluye las condiciones hidráulicas definidas por el usuario o requerimientos del vertedor de laberinto.

Para influir en la selección de α , se considera la eficiencia del ciclo, ε' ($\varepsilon' = C_d L_{c-cycle}/w$), la cual es representativa de la descarga por ciclo, la misma es presentada en las figuras 10 y 11 como una función de H_T/P .

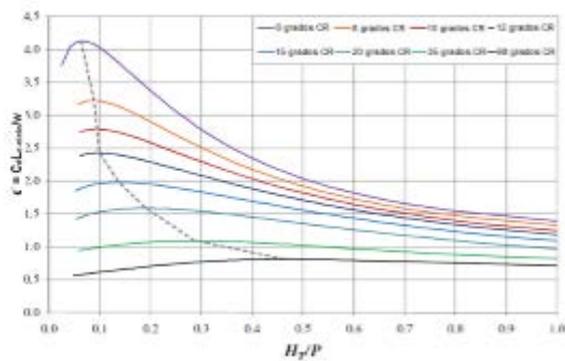


Figura 10. Eficiencia del ciclo vs H_T/P vertedores de laberinto $\frac{1}{4}$ redondeado [Fuente: Crookston (2010)]

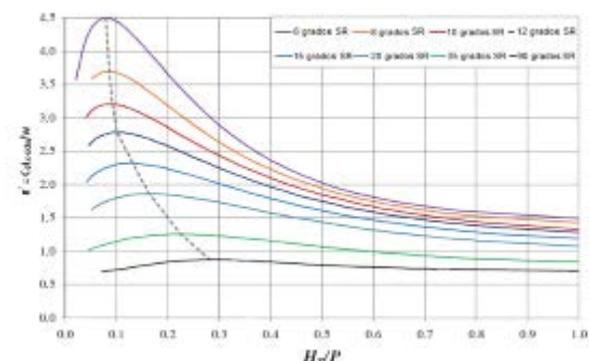


Figura 11 – Eficiencia del ciclo vs H_T/P vertedores de laberinto semirredondeado [Fuente: Crookston (2010)]

Estas figuras muestran que el máximo valor de ε' ocurre en valores relativamente bajos de H_T/P (como es destacado por la curva discontinua); la descarga por ciclo o ε' crece cuando α decrece; y los beneficios de los ángulos α más pequeños decrecen con el incremento de H_T/P .

La eficiencia del ciclo mantiene un ancho del ciclo constante, w , y no considera factores adicionales que influyen en la geometría del ciclo, tales como la longitud de la solera ni el costo de la construcción asociados con un aumento en la longitud del vertedor.

En la tabla 5 se muestra una hoja de cálculo Excel elaborada por los autores a partir de los resultados de Tullis(2007) y Crookston (2010) para vertedores de laberinto con configuraciones en saliente.

Vertedores de laberinto en arco

Los ciclos del vertedor de laberinto son tradicionalmente ubicados con configuración frontal, sin embargo, la misma puede ser en arco (curvadas y radiales son las que suelen aparecer en la literatura para describir configuraciones no frontales) para mejorar las condiciones de entrada del flujo a cada ciclo y de paso incrementar la longitud de cresta del vertedor (ver figura 12).

Tabla 5. Diseño hidráulico de vertedor de laberinto, configuración en saliente

DISEÑO HIDRÁULICO DE VERTEDOR DE LABERINTO, CONFIGURACIÓN EN SALIENTE				
Confeccionado por: Dr. Rafael Pardo Gómez Ing. Susel Lobaina Fernández (a partir de datos de Crookston and Tullis 2012a)				
Parámetro	Símbolo	Valor	Unidades	Observaciones
Condiciones hidráulicas - datos de entrada (ver figuras arriba en este artículo)				
Caudal de diseño	Q_{DIS}		m ³ /s	entrada
Cota diseño sup. agua embalse	NAM		m	Entrada
Cota de fondo canal de aprox.	C_{CA}		m	Entrada
Cota de la cresta	NAN		m	Entrada
Carga total aguas arriba (no sumergida)	H_T		m	entrada ($H_{h_v} - \Sigma h_f$)
Carga total aguas abajo	H_D		m	Entrada
Geometría del vertedor de laberinto de configuración en saliente - datos de entrada				
Áng. pared lateral ciclo salida	α	12	grados	$\alpha \sim 6^0 - 35^0$
Ancho del laberinto	W		m	entrada o {W = Nw; de celda F15}
Longitud de la solera (paralela al flujo)	B		m	entrada o {B = [L _c /(2N) - (A + D)/2]cosα + t _w ; de celda F16}
Altura de la cresta	P		m	P ~ 1,0H _T
Espesor de pared vertedora	t _w		m	t _w ~ P/8
Ancho del ápice de entrada	A		m	A ~ t _w
Forma de la cresta	SR-semirrec		-	un cuarto o semirredondeada
Dispositivo de aireación	Sí/no		-	rompedores, ventiladores. o ninguno
Resultados calculados				
Carga relativa	H_T/P		-	
Coef. de gasto del vertedor	$C_{d(\alpha)}$		-	$C_d = f(H_T/P, \alpha, \theta)$
Longitud total del vertedor	L_c		m	$L_c = (3/2)Q_{DIS}/[(C_{d(\alpha)}H_T^{3/2})(2g)^{1/2}]$
Longitud de la pared lateral	l_c			$l_c = (B - t_w)/\cos \alpha$
Número de ciclos	N		-	{W/w de celda F27} o entrada
Ancho de un ciclo	w		m	w = 2 l _c sen α + A + D
Ancho del ápice de salida	D		m	D = A + 2t _w tan(45 - α/2)
Relación de amplificación	M		-	M = L _c /(wN)
Relación de ancho de ciclo	w/P		-	normalmente 2 ≤ w/P ≤ 4
Relación de espesor	P/t _w		-	~ 8
Relación de ápice	A/w		-	< 0,08
Eficiencia del ciclo	ε'		-	ε' = C _{d(α)} M
Eficacia	ε		-	ε = C _{d(α)} M/C _{d(90)}
# de rompedores de lámina o vents.	-		-	Romp.en ápice ag. abajo; 1 vent/lateral
Coef.de descarga del vertedor	$C_{d(90)}$		-	$C_{d(90)} = f(H_T/P, \alpha, \text{forma de cresta})$
Long. de vert. frontal para igual caudal	$L_{c(90)}$		m	$L_{c(90)} = (3/2)Q_{DIS}/[(C_{d(90)}H_T^{3/2})(2g)^{1/2}]$
Sumersión (Tullis et al. 2007)				
Carga total aguas abajo/Carga total aguas arriba no sumergida	H_d/H_T		-	
Relación de carga sumergida	H^*/H_T		-	Función de Tullis et al., por tramos
Carga total sumergida	H^*		m	
Nivel de sumersión	S		-	
Coef.de descarga de vert. sumergido	C_{d-sum}		-	$C_{d-sum} = C_{d(\alpha)}/[(H^*/H_T)^{3/2}]$
El diseño es limitado a la extensión de los datos experimentales; aquel diseño que exceda esos límites puede ser garantizado mediante un estudio en modelo físico.				

Los beneficios de un vertedor de laberinto en arco son inicialmente limitados a aplicaciones en embalses donde el flujo de aproximación es bidimensional (2D) y donde existe suficiente espacio para el vertedor a proyectar dentro del embalse; para otras aplicaciones como en canales, los vertedores de laberinto en arco no son prácticas.

Un gran número de casos y estudios de investigación han sido conducidos sobre vertedores de laberinto que presentan una configuración frontal de los ciclos. Una selección de las investigaciones más notables acerca de vertedores de laberinto frontales que tienen guías de diseño es presentada en la tabla 6.

Tabla 6. Resumen de métodos de diseño de vertedores de laberinto [Fuente: C& T 2012b]

Autores	Tipo de cresta ^a	Forma de cresta ^b
Taylor (1968)	Tri, Trap, Rect	AV, SR
Hay y Taylor (1970)	Tri, Trap	AV, SR
Darvas (1971)	Trap	LCR
Hinchliff y Hoyston (1984)	Tri, Trap	AV, CR
Lux y Hinchliff (1984)	Tri, Trap	CR
Magalhaes y Lorena (1989)	Trap	WES
Tullis et al. (1995)	Trap	CR
Melo et al. (2002)	Trap	LCR
Tullis et al. (2007)	Trap	SR
Lopes et al. (2006, 2008)	Trap	LCR
Crookston (2010)	Trap	CR, SR

^aTri – triangular, Trap – trapezoidal, Rect – rectangular
^bAV – arista viva, CR – un cuarto redondeada ($R_{crest} = t_w/2$),
 SR – semirredondeada
 LCR – un cuarto redondeada ($R_{crest} = t_w$), WES – cimacio WES truncado

A continuación se demostrarán las ventajas que se logran al diseñar un vertedor de laberinto con configuración en arco; sin embargo, es oportuno recalcar que esta configuración requiere de un proceso de análisis cuidadoso simultáneo con el proceso de diseño hidráulico de los mismos, ya que según expresaran Crookston and Tullis (2012b) en estas estructuras la semejanza geométrica requiere más que ciclos geoméricamente similares.

Funcionamiento hidráulico

La relación carga capacidad de un vertedor de laberinto en arco fue determinada usando la forma general de la ecuación para un vertedor, ecuación (5), como sigue.

$$Q = \frac{2}{3} C_d L_c \sqrt{2g} H_T^{3/2} \quad (5)$$

Los términos de la ecuación (5) tienen los mismos significados que los de la ecuación (1), ver figura 12.

C_d es afectado por la geometría del vertedor (esto es, forma de la cresta, α , R , y θ), por las condiciones de aproximación del flujo, por las condiciones de aireación de la lámina, y por la sumersión local. La sumersión local se refiere a la locación donde la elevación de la superficie del agua inmediatamente aguas abajo de la pared del vertedor es más alta que la de la cresta del vertedor, es decir, los ápices de aguas arriba del vertedor de laberinto a altas descargas, como se ilustra en la figura 13.

Coeficiente de gasto de vertedores de laberinto con configuración en arco.

El coeficiente de gasto C_d representa la eficiencia de la descarga por unidad de longitud del vertedor y se presenta en función de la carga hidráulica relativa H_T/P , para $\alpha = 6^\circ$ (figura 14) y

$\alpha=12^\circ$ (figura 15) para vertedores de laberinto en arco ($\theta = 10, 20, 30^\circ$) y saliente (configuración frontal del ciclo). Los datos para vertedores de laberinto geoméricamente semejantes ubicados en un canal (en canal) reportados por Crookston (2010) son también incluidos para comparación. Como se muestra en la figuras 14 y 15, la configuración en arco incrementa la capacidad de descarga en relación con una configuración frontal en canal; ello se atribuye a la adecuada orientación de los ciclos al flujo de aproximación en relación a la configuración frontal del ciclo.

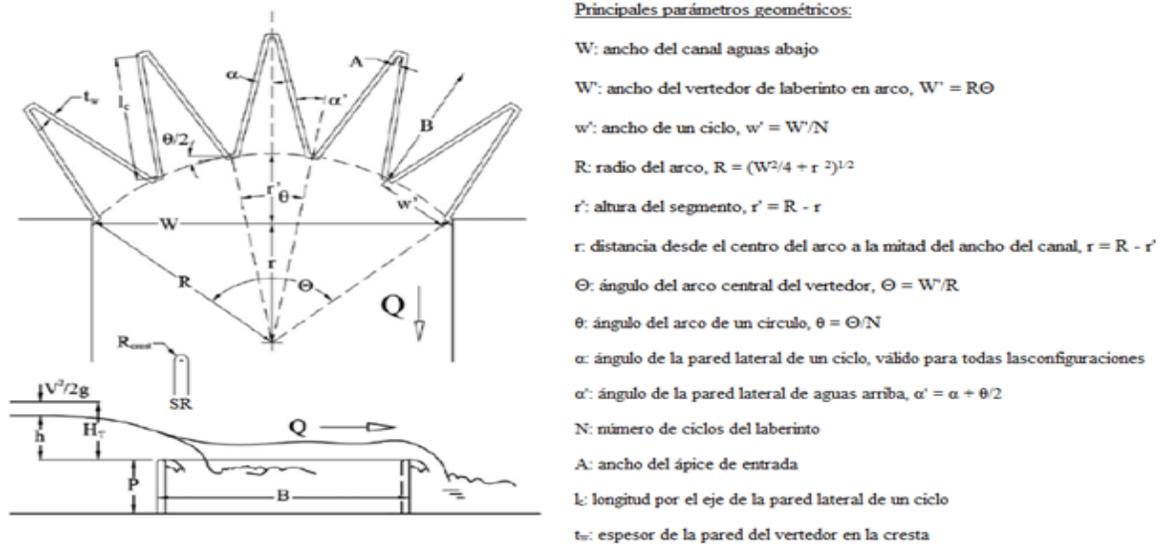


Figura 12. Aliviadero con vertedor de laberinto en arco [Fuente: C& T 2012b]

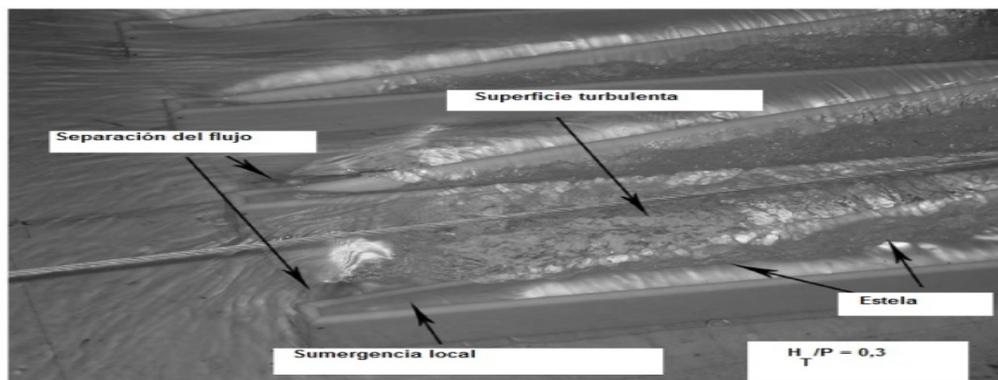


Figura 13. Ejemplos de turbulencia superficial de vertedores de laberinto y sumersión local en vertedores de laberinto en arco, frontal, con $\alpha = 6^\circ$ y $H_T/P = 0,3$ [Fuente: C& T 2012b]

Líneas de tendencia fueron trazadas para los datos de C_d en las figuras 14 y 15 a partir de la ecuación (6). Los correspondientes coeficientes para $0,05 \leq H_T/P \leq 0,2$ son presentados en la tabla 7 y coeficientes para $0,2 \leq H_T/P \leq 0,7$ son presentados en la tabla 8.

$$C_d = a \left(\frac{H_T}{P}\right)^3 + b \left(\frac{H_T}{P}\right)^2 + c \left(\frac{H_T}{P}\right) + d \quad (6)$$

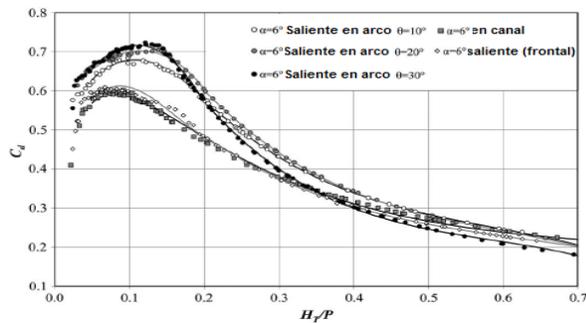


Figura 14. C_d vs H_T/P para $\alpha = 6^\circ$ vertedor de laberinto trapecoidal de cresta redondeada [Fuente: C & T 2012b]

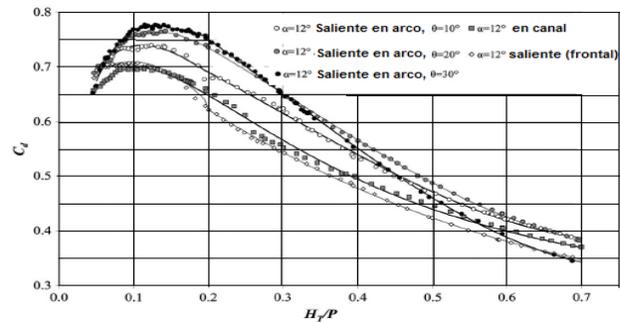


Figura 15. C_d vs H_T/P para $\alpha = 12^\circ$ vertedor semi-de laberinto trapecoidal de cresta semirredondeada [Fuente: C& T 2012b]

Adicionalmente al decrecimiento en la eficiencia de la descarga de la configuración saliente, se notó mediante la observación que los ciclos distantes del vertedor de laberinto fue sujeto a sumersión local para menores valores de H_T/P que los ciclos adyacentes debido a que las paredes laterales de los ciclos distantes de los ciclos más externos son hidráulicamente más eficientes (esto es, el flujo de aproximación es perpendicular, lo cual incrementa la descarga por unidad de longitud para esos ciclos y por tanto C_d).

La más alta tasa de descarga entrante O1 y O5 (ver figura 16), acoplado con la limitada capacidad de descarga de los ciclos de salida, resultó en un alto nivel de la sumersión local. Algunos de los flujos de aproximación laterales de los vertedores (ver figura 17) se observó que pasaron sobre los ciclos de salida y de entrada (O1 e I1, O5 e I4) y entra en los ciclos de salida adyacentes (O2 y O4). Ese fenómeno produjo una notable estela en I1 e I4 (ver figura 16) e igualmente contribuyó a la reducida eficiencia de la descarga de los laberintos salientes. El relativo efecto de ese fenómeno sobre la eficiencia general disminuye en la medida que N crece.

Tabla 7. Coeficientes de la curva ajustada para vertedores de laberinto trapecoidales, válidos para $0,05 \leq H_T/P \leq 0,2$ [Fuente: C& T 2012b]

α ($^\circ$)	Configuración	θ ($^\circ$)	Coeficientes			
			a	b	C	d
6	Saliente en arco	-	98,599	-47,272	6,0173	0,3819
	Saliente en arco	10	25,031	-22,061	3,8631	0,488
	Saliente en arco	20	-15,86	-6,7336	2,1836	0,5647
	Saliente en arco	30	-10,072	-13,85	3,4033	0,5238
12	Saliente en arco	-	8,8398	-10,593	1,8034	0,6258
	Saliente en arco	10	35,244	-21,308	3,4392	0,5719
	Saliente en arco	20	31,087	-20,732	3,8441	0,5460
	Saliente en arco	30	89,891	-44,348	6,9154	0,4284

Finalmente, se desarrolló una hoja de cálculo para el diseño de vertedores de laberinto con configuración en arco similar a la desarrollada para los vertedores de laberinto en saliente, que se presenta en la tabla 9.

Observaciones del efecto escala en los coeficientes de descarga trabajados

Sorprendente resulta que todas las publicaciones consultadas y cuyos resultados se presentan en el presente trabajo, han ignorado el fenómeno conocido como efecto de escala, el cual según Pardo(1985) tiene su origen en lo que se explica a continuación.

Tabla 8. Coeficientes de la curva ajustada para vertedores de laberinto trapezoidales, válidos para $0,2 \leq H_T/P \leq 0,7$ [Fuente: C& T 2012b]

α ($^\circ$)	Configuración	θ ($^\circ$)	Coeficientes			
			a	b	C	d
6	Saliente en arco	-	-1,8936	3,5802	-2,5204	0,8605
	Saliente en arco	10	-3,2392	5,709	-3,7124	1,1178
	Saliente en arco	20	-3,3019	5,9622	-3,9526	1,1798
	Saliente en arco	30	-4,1930	7,3673	-4,6092	1,2327
12	Saliente en arco	-	-0,1153	0,7162	-1,1144	0,8163
	Saliente en arco	10	1,2107	-1,0806	-0,4449	0,8128
	Saliente en arco	20	1,4404	-1,3929	-0,4088	0,8606
	Saliente en arco	30	1,5198	-1,3712	-0,5984	0,9124

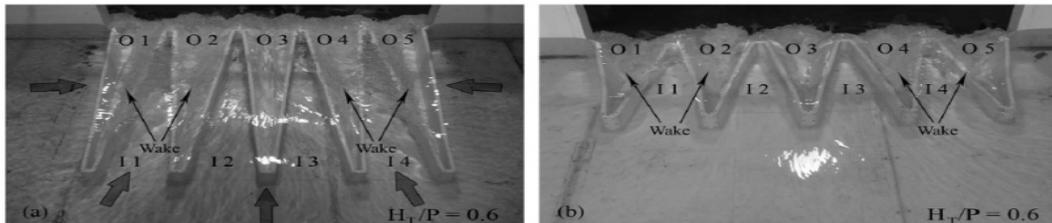


Figura 16. Vertedor de laberinto de 5 ciclos, saliente con: (a) $\alpha = 6^\circ$ y $H_T/P = 0,6$; (b) $\alpha = 12^\circ$ y $H_T/P = 0,6$ [Fuente: C& T 2012b]

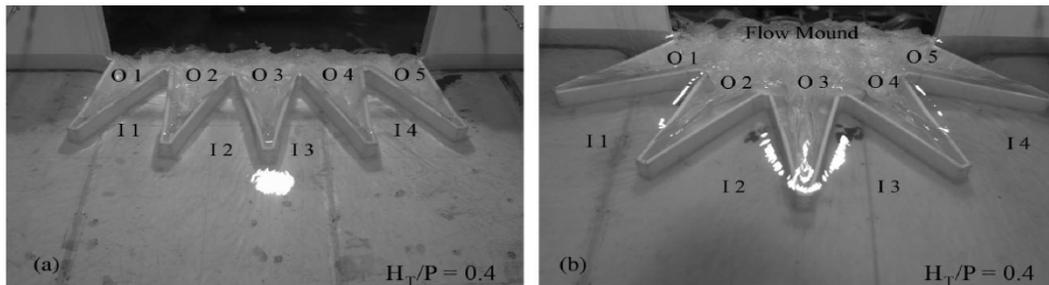


Figura 17. Vertedor de laberinto de 5 ciclos, saliente con: (a) $\alpha = 12^\circ$, $\theta = 10^\circ$ y $H_T/P = 0,4$; (b) $\alpha = 12^\circ$, $\theta = 30^\circ$ y $H_T/P = 0,4$ [Fuente: C& T 2012b]

Cuando se hacen modelos físicos de obras hidráulicas de conducciones libres o simplemente se hacen investigaciones sistemáticas a escala de laboratorio, los modelos físicos son de Froude, nombrados así debido a que las fuerzas predominantes son las gravitacionales y por tanto se hacen de manera tal que modelo y prototipo tengan igual número de Froude para cada condición de circulación, esto es:

$$F_{r_m} = F_{r_p} \quad (7)$$

Siendo: F_{r_m} y F_{r_p} el número de Froude en el modelo y el prototipo, respectivamente.

El cumplimiento de la relación (7) conlleva a que otros parámetros adimensionales no son iguales en modelo y prototipo y ello introduce diferencias entre los términos adimensionales entre modelo y prototipo, tal es el caso del coeficiente de gasto. La situación ya ha sido objeto de estudio. Por ejemplo, N. P. Rozanov en 1981 ya había realizado publicaciones de resultados obtenidos por él a escala de laboratorio, mediante los cuales demostró que para resolver lo que

Tabla 9. Diseño hidráulico de vertedor de laberinto, configuración en arco

DISEÑO HIDRÁULICO DE VERTEDEDOR DE LABERINTO, CONFIGURACIÓN EN ARCO				
Confeccionado por: Dr. Rafael Pardo Gómez Ing. Susel Lobaina Fernández (a partir de datos de Crookston 2010)				
Parámetro	Símbolo	Valor	Unidades	Observaciones
Condiciones hidráulicas - datos de entrada (ver figuras a la derecha en esta misma hoja)				
Caudal de diseño	Q_{DIS}		m ³ /s	Entrada
Cota diseño de sup. del agua embalse	NAM		m	Entrada
Cota de fondo canal de aproximación	C_{CA}		m	Entrada
Cota de la cresta	NAN		m	Entrada
Carga total aguas arriba (no sumergida)	H_T		m	entrada ($H_{h_v} - \Sigma h_f$)
Carga total aguas abajo	H_D		m	Entrada
Geometría del vertedor de laberinto de configuración en arco - datos de entrada				
Ángulo de pared lateral del ciclo salida	α	12	grados	$\alpha \sim 6^0 - 35^0$
Ángulo del arco de un ciclo	θ	10	grados	$\theta = 10; 20; 30$
Ángulo pared lateral ciclo de entrada	α'		grados	$\alpha' = \alpha + \theta/2$
Altura de la cresta	P		m	$P \sim 1,0H_T$
Espesor de pared vertedora en la cresta	t_w		m	$t_w \sim P/8$
Ancho del ápice de entrada	A		m	$A \sim t_w$
Ancho terreno disponible para aliviad.	W''		m	Entrada
Geometría del vertedor de laberinto de configuración en arco - datos calculados				
Ancho del ápice de salida	D		m	$D = A + 2t_w \tan(45 - \alpha/2)$
Número de ciclos	N		-	Entrada
Longitud de la solera (paralela al flujo)	B		m	primero: entrada, luego: $\{B = [L_c/(2N) - (A + D)/2] \cos \alpha + t_w$ de celda F24}
Ángulo del arco central del vertedor	Θ		grados	$\Theta = N\theta$, debe ser menor o igual que 180 grados, para ello ajuste N o θ .
Radio del arco central	R		m	$R = W''/[2\text{sen}(\Theta/2)] - B$
Ancho del laberinto (normal al flujo)	W		m	primero: entrada, luego $\{W = 2R\text{sen}(\Theta/2)\}$ de celda F27
Dist.centro-arco – centro-inicio canal	r		m	$r = 0.5(4R^2 - W^2)^{0.5}$
Altura del segmento	r'		m	$r' = R - r$
Ancho de un ciclo	w'		m	$w' = 2R\text{sen}(\theta/2)$
Longitud del arco de un ciclo	w_a^1		m	$w_a^1 = R\theta$
Ancho del vertedor de laberinto	W'		m	$W' = R\Theta$
Longitud de la pared lateral	l_c		m	$l_c = (B - t_w)/\cos \alpha$
Dispositivo de aireación	Sí/no		-	rompedores, ventiladores. o ninguno
Condiciones hidráulicas - Resultados calculados				
Carga relativa	H_T/P		-	debe lograrse que $0,05 \leq H_T/P \leq 0,7$
Coef. de gasto del vertedor de laberinto	$C_{d(\alpha)}$		-	$C_d = f(H_T/P, \alpha, \theta)$
Longitud total del vertedor por la cresta	L_c		m	$L_c = (3/2)Q_{DIS}/[(C_{d(\alpha)}H_T^{3/2})(2g)^{1/2}]$

denominó problemas de efecto de escala para el caso específico de coeficientes de gasto de vertedores obtenidos a escala de modelos deben ser afectados por un factor de corrección η_m , con el cual se eliminan o minimizan las diferencias que se tienen cuando un mismo vertedor es estudiado a escala de laboratorio con dos tamaños diferentes, resultando las ecuaciones (8) y (9).

$$m_p = m_m \eta_m \quad (8)$$

$$\eta_m = 1 + \frac{7,3}{R_{e_m}^{0,58}} \quad (9)$$

en las que: m_p : coeficiente de gasto del prototipo
 m_m : coeficiente de gasto del modelo
 η_m : factor de escala
 $R_e = q/v$, número de Reynolds del modelo, siendo q el gasto específico y v la viscosidad cinemática del agua en el modelo.

Partiendo de las ecuaciones $Q = \frac{2}{3} C_d L_c \sqrt{2gH_T}^{3/2}$ y $Q = mL\sqrt{2gH_o}^{3/2}$ empleadas por diferentes autores para expresar la ecuación fundamental de cualquier vertedor, de las que resulta $m = 2/3 C_d$, queda establecida la validez de aplicar la corrección η_m a C_d .

La aplicación de estas correcciones deberá disminuir las diferencias entre los resultados obtenidos por diferentes investigadores que a su vez hicieron los ensayos en modelos con tamaños diferentes entre ellos.

CONCLUSIONES

- Los aliviaderos de laberinto son una variante atractiva para aplicar en embalses, en particular para el recrecimiento de los mismos.
- Aún faltan estudios experimentales para optimizar el diseño hidráulico de estos aliviaderos, por ejemplo todo lo relativo a las condiciones aguas abajo.
- Debe introducirse la aplicación de las correcciones debidas al efecto de escala.

REFERENCIAS

- Crookston, B. M.** (2010). "Vertedores de laberinto", presentación parcial de la tesis de doctorado, Universidad de Utah, EEUU.
- Crookston B. M. and Tullis B. P.**(2012a). "Labyrinth weirs: nappe interference and local submergence." Journal of Irrigation & Drainage Engineering, Vol. 138, No. 8, pp.757-765, ISSN: 0733-9437, ASCE, USA.
- Crookston, B. M. and Tullis B. P.** (2012b). "Arched labyrinth weirs." Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 138, No.6, pp. 555–562, ISSN: 0733-9429, ASCE, USA.
- Pardo R.** (1985).“Cimacios elípticos de poca altura y con vacío. Su aplicación en las condiciones de la República de Cuba”, Tesis de doctorado. Instituto Superior Politécnico José A. Echeverría (Cujae). Habana.
- Pardo R. y Alegret E.** (2012). “Diseño hidráulico de aliviaderos y obras de toma para presas”. Editorial Félix Varela, ISBN: 978-959-07-1692-8, La Habana, Cuba.
- Tullis J. P., Amanian N. 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.