



AGUA EN LA
AGRICULTURA:
Sostenibilidad y tendencias



Diseño de vertedores tipo laberinto: comparación de dos métodos

Erick Dante Mattos Villarroel; Mauro Iñiguez Covarrubias;
Waldo Ojeda Bustamante; Jorge Flores Velásquez; Carlos
Díaz Delgado

II Congreso Nacional de Riego y Drenaje COMEII 2016
08 al 10 de septiembre del 2016
Chapingo, México

- Antecedentes
- Materiales y métodos
 - Procedimiento de diseño de vertedores tipo laberinto
 - Procedimiento de diseño de vertedor tipo laberinto según Hay y Taylor.
 - Procedimiento de diseño de vertedor tipo laberinto según Tullis.
- Análisis y discusión de resultados
- Conclusiones

ANTECEDENTES



- Vertedor: obra hidráulica que permite garantizar la seguridad de la estructura hidráulica y el control de avenidas
- Varias presas comienzan a perder su vida útil, y el aumento del volumen de almacenamiento y descarga exige la necesidad de incrementar la longitud efectiva.
- Vertedores tipo laberinto: Reciente tecnología objeto de estudio.
- La particularidad de un vertedor tipo laberinto reside en su forma en zig-zag, vista en planta, incrementando la longitud de cresta.
- La necesidad de mejorar la descarga manteniendo el mismo valor de carga hidráulica ha sido causa de la modificación de los componentes de vertedores tipo laberinto.

El diseño de un vertedor está definido en términos de la altura de la cresta operando bajo una carga dada.

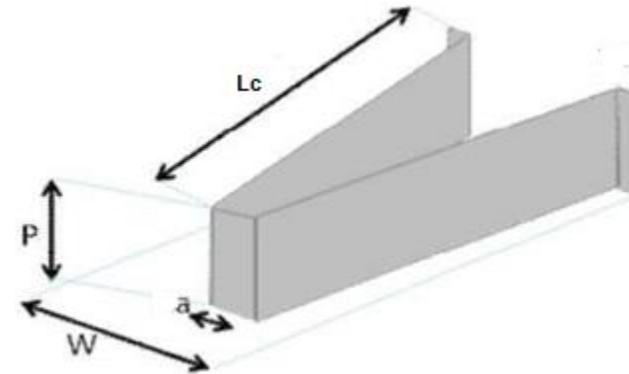
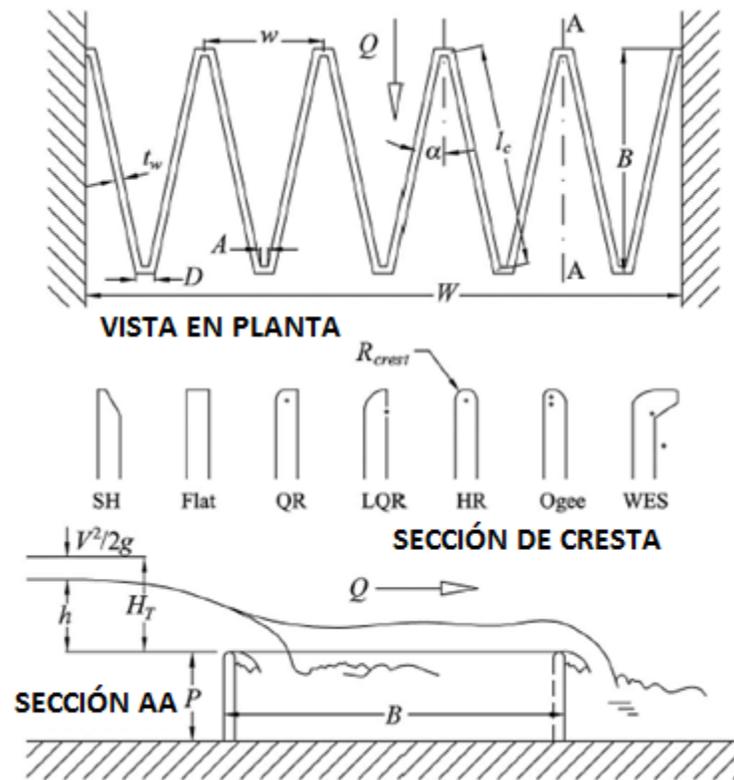


Figura 1 Parámetros geométricos de un vertedor tipo laberinto. (Crookston 2010).

Se consideran relaciones adimensionales para describir y cuantificar el flujo que transita a través del vertedor:

- **Relación de la carga con la altura del vertedor (H_T/P)**

Para valores pequeños de H_T/P la descarga es reducida y la carga de velocidad despreciable. Con un aumento en la carga, la interferencia del flujo aguas abajo incrementa y el funcionamiento se ve afectado.

- **Magnificación de la longitud (Le/W)**

Se define como la relación de la longitud total entre el ancho del canal. Con el incremento en la relación Le/W aumenta la magnificación del flujo Q_d/Q_n sólo marginalmente

- **Relación del aspecto vertical (w/P)**

Este parámetro define el tamaño de los ciclos del vertedor en planta, relacionado con la altura de la cresta.

Con un w/P pequeño suelen presentarse choques por la interferencia entre la lámina vertiente de las paredes laterales.

Lux (1984): el rendimiento hidráulico mejora al aumentar la altura del vertedor (P), disminuyendo la relación w/P , tal como se muestra en el Gráfico (1):

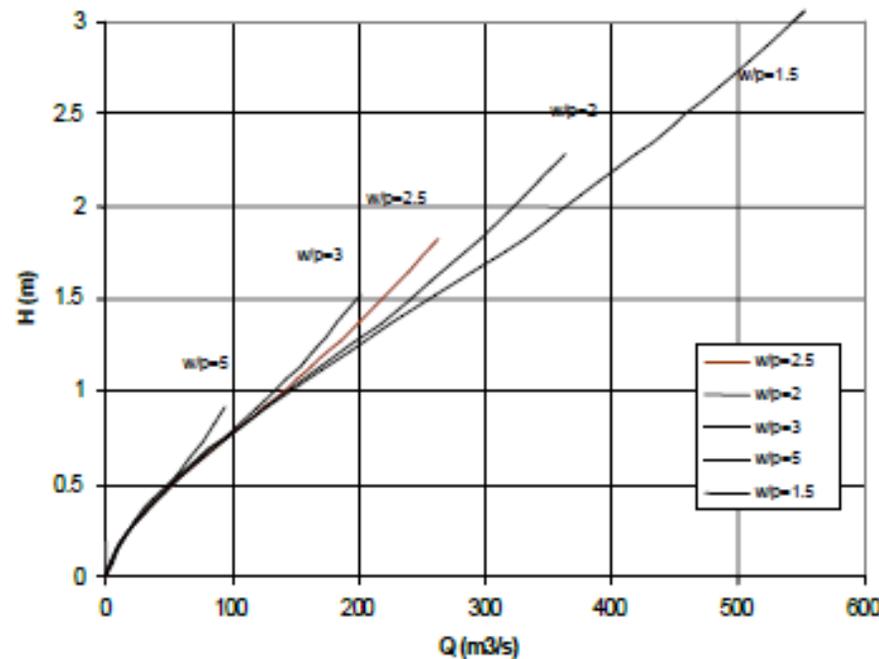


Gráfico 1. Efecto de la relación w/P (Lux, 1984).

- **Ángulo del muro lateral (α).**
- **Perfil de la cresta.** Tiene por objetivo facilitar la descarga del fluido; según el tipo de perfil implementado podría tener efectos en la lámina de la descarga
- **Efectividad.** Representa la diferencia entre las descargas ocurridas en un vertedor de laberinto (Q_d) respecto a la descarga a través de un vertedor lineal (Q_n), como consecuencia del aumento en la longitud total de la cresta (Hay y Taylor, 1970).

$$E(\%) = \frac{Q_d/Q_n}{L_e/w} * 100 \quad (1)$$

Relación	Autor	Observaciones
$1.23 \leq Le/w \leq 4.35$	Kozák y Svab (1961)	Forma trapezoidal; sólo aplicable a los límites de las pruebas experimentales definidas por Taylor (1968).
$1.15 \leq w/P \leq 4.61$		
$5.7^\circ \leq \alpha \leq 20.6^\circ$		
$Ht/P \leq 05$ $2 \leq w/P \leq 5$ $2 \leq Le/w \leq 8$ $1 \leq N \leq 3$	Hay y Taylor (1970)	Ninguno de los parámetros afecta la interferencia.
$2 \leq w/P \leq 2.5$ $W/P < 2$ $Ht > 7$ $A/w \leq 0.0765$	Lux (1989)	El vertedor es eficiente hidráulicamente
$w/P \geq 2.5$	Magalhaes y Lorena (1989)	El vertedor es eficiente hidráulicamente
$Ht/P \leq 0.9$ $3 \leq w/P \leq 4$ $t \leq A \leq 2t$ $W/P < 3$ $6^\circ \leq \alpha \leq 36^\circ$ $Le/w < 9.5$	Tullis (1995)	El vertedor es eficiente hidráulicamente
$Le/w < 9.5$ $2a/w < 0.08$	Falvey (2003)	Si Le/w es mayor a 10, disminuye la eficiencia.
$W/P < 3$	Paxson y Savage (2006)	Aumento en el rendimiento hidráulico

Cuadro 1. Relación de parámetros para el funcionamiento del vertedor de laberinto.

MATERIALES Y MÉTODOS



PROCEDIMIENTO DE DISEÑO DE VERTEDORES TIPO LABERINTO

- **Procedimiento de diseño según Hay y Taylor**

Hay y Taylor (1970) definen un método que requiere la estimación de un parámetro W_r , cuyos valores se determinaron experimentalmente, Cuadro (2).

Qd/Qn	Relación de Ht/P				
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
1	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
2	2.00	2.00	2.00	2.10	2.20
3	3.00	3.05	3.15	3.33	3.50
4	4.00	4.10	4.33	4.65	5.90
5	5.05	5.26	5.77	7.99	-
6	6.09	6.71	8.20	-	-
7	7.22	8.10	-	-	-
8	8.30	-	-	-	-

Cuadro 2. Valores del parámetro W_r (Walker, 1987).

El gasto Q_n que pasa por el vertedor lineal es:

$$Q_n = C_n * L_n * H_t^{3/2} \quad (2)$$

El coeficiente de descarga C_n del vertedor lineal es:

$$C_n = 1.778 + H_t/P \quad (3)$$

La longitud efectiva del vertedor lineal resulta de:

$$L_n = W - 0.2 * H_t \quad (4)$$

Para la determinación de la longitud efectiva de la cresta vertedora de laberinto se determina con la ecuación:

$$L_e = W * \frac{C_n}{C_s} * W_r \quad (5)$$

Donde C_s es el coeficiente de descarga del vertedor de cresta larga y se considera igual a 1.5 para vertedor de sección biselado.

El ángulo α de las paredes laterales del vertedor se determina con la ecuación (6):

$$\alpha = 0.75 * \arcsen \left(\frac{W}{Le} \right) \quad (6)$$

Con las relaciones Le/W , W/P y el ángulo α es posible establecer la disposición y el número de ciclos usando los modelos de la figura (2).

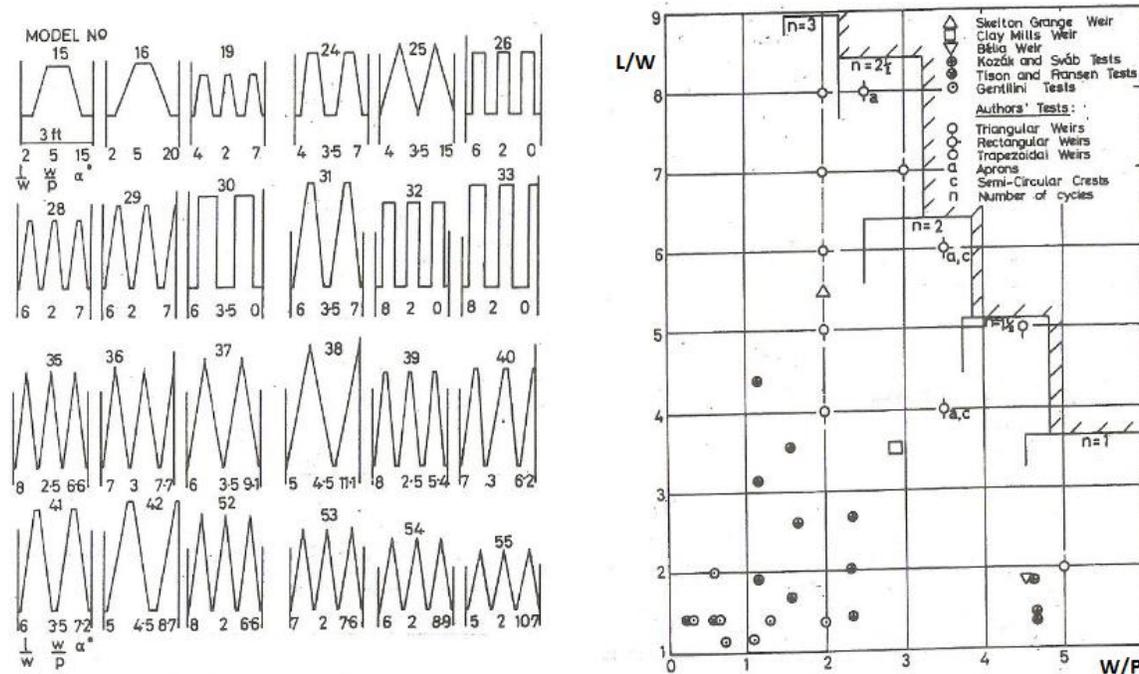


Figura 2. Disposición de ciclos y modelos de vertedores, Hay y Taylor (1970).

Concepto	símbolo	Unidad	Observaciones
Datos de entrada			
Gasto de diseño vertedor laberinto	Qd	m ³ /s	
Ancho del vertedor laberinto	W	m	
Elevación de la cresta	P	m	
Carga total aguas arriba	Ht	m	
Datos calculados			
Longitud efectiva del vertedor normal	Ln	m	$Ln = W - 0.2Ht$
Coef. De descarga vertedor lineal	Cn	-	$Cn = 1.778 + Ht/P$
Gasto vertedor lineal	Qn	m ³ /s	$Qd = Cn * Ln * Ht^{1.5}$
Magnificación del flujo	Qd/Qn	-	
Relación carga de agua	Ht/P	-	$0 \leq Ht/P \leq 0.5$
	Wr	-	Ver cuadro 7
Coef. De descarga vertedor cresta larga	Cs	-	Ver cuadro 8
Longitud efectiva del vertedor laberinto	Le	m	$Le = W * Cn / Cs * Wr$
Longitud de magnificación	Le/w	-	$2 \leq Le/w \leq 8$
Número de ciclos	N	-	$w/P \geq 2 \rightarrow w = 2 * P ; N = W/w = W/(2P)$
Ancho de ciclo	w	m	$w = W/N$
Relación de ancho del ciclo	w/P	-	$2 \leq w/P \leq 5$
Ángulo del muro lateral	α	°	$\alpha = 0.75 * \alpha_{max} = 0.75 * \arcsen(1/(Le/w))$
Longitud efectiva del muro lateral	Lc	m	$Lc = (w/2 - (Le/w) * w/2) / (\sen \alpha - 1)$
Ancho efectivo del ápice	a	m	$a = (Le/w) * w/2 - b$
Longitud del ciclo	lc	m	$lc = 2a + 2b$
Longitud de plataforma (paralelo al flujo)	B	m	$B = b * \cos(\alpha)$

Cuadro 3. Hoja de cálculo para el diseño del vertedor de laberinto según Hay y Taylor (1970).

- **Procedimiento de diseño según Tullis**

Tullis (1995) expresó sus conclusiones de manera gráfica, relacionando el coeficiente de descarga con el coeficiente H_T/P . Este investigador adoptó la ecuación convencional del vertedor:

$$Q_d = \frac{2}{3} \sqrt{2g} C_d L_e H_T^{3/2} \quad (7)$$

Variación del coeficiente de descarga:

$$C_d = f \left(\frac{H_T}{P}, \alpha \right) \quad (8)$$

C_d puede expresarse mediante la ecuación (9):

$$C_d = A_1 + A_2 \left(\frac{H_T}{P} \right) + A_3 \left(\frac{H_T}{P} \right)^2 + A_4 \left(\frac{H_T}{P} \right)^3 + A_5 \left(\frac{H_T}{P} \right)^4 \quad (9)$$

Los coeficientes de descarga pueden estimarse utilizando las curvas del gráfico (2):

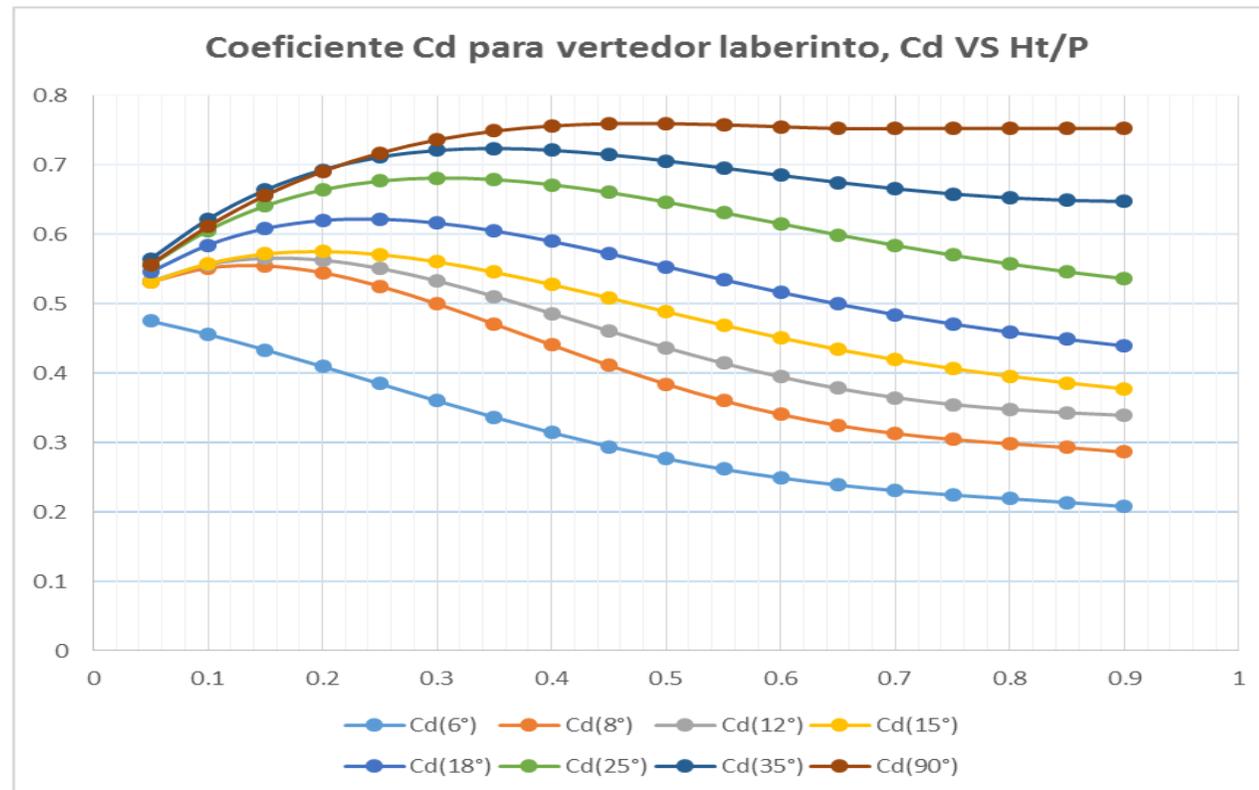


Gráfico 2. Coeficientes de descarga para diferentes ángulos de pared lateral, perfil tipo Cuarto de redondeo, Tullis (1995).

Concepto	símbolo	Unidad	Observaciones
Condiciones Hidráulicas			
Gasto de diseño	Qd	m ³ /s	
Ancho del vertedor laberinto	W	m	Dato de entrada ó W=N*w
Elevación de la cresta	P	m	
Carga total aguas arriba sin ahogamiento	Ht	m	carga hidráulica+velocidad aguas arriba- pérdidas
Datos asumidos			
Pérdidas estimadas	hf	m	estimado
Número de ciclos	N	-	Seleccionar para mantenr w/P ≈ 3 a 4
Ángulo del muro lateral	α	°	6° ≤ α ≤ 35°
Geometría del vertedor de laberinto			
Espesor de la pared de la cresta	t	m	t = P/6
Ancho interior del ápice	A	m	t ≤ A ≤ 2t
Ancho externo del ápice	D	m	D = A+2t*tan(45-α/2)
Relación carga de agua	Ht/P	-	Ht/P < 9
Coef. de descarga del vertedor laberinto	Cd (α)	-	Interpolar curvas del gráfico 10
Longitud efectiva de la cresta	Le	m	Le = 1.5*Qd/(Cd(α)*Ht ^{1.5} *(2g) ^{0.5})
Longitud de plataforma (paralelo al flujo)	B	m	B = (Le/2N + t*tan(45-α/2)) cos α + t
Longitud actual del muro lateral	L1	m	L1 = (B-t)/cos (α)
Longitud efectiva del muro lateral	L2	m	L2=L1-t*tan(45-α/2)
Longitud total de la cresta	L3	m	L3=N(2L1+D+A)
Ancho del ciclo	w	m	w = 2*L1 *sen (α) +A +D ó W/N
Relación de ancho del ciclo	w/P	-	3 ≤ w/P ≤ 4
Longitud del vertedor lineal para el mismo flujo	Lc (90°)	m	Lc (90°) = 1.5*Q/(Cd(90°)*Ht ^{1.5} *(2g) ^{0.5})
Volumen de concreto			
Volumen pared de concreto		m ³	Vol. = L3*P*t
Volumen de plataforma de concreto		m ³	Vol.=W*B*t
Voumen total de concreto		m ³	

Cuadro 4. Hoja de cálculo para el diseño del vertedor de laberinto según Tullis (1995)

Ejemplo de aplicación:

$Q_d = 400 \text{ m}^3/\text{s}$, $H_t = 1.41 \text{ m}$, $P = 4.30 \text{ m}$, ancho de canal $W = 30 \text{ m}$

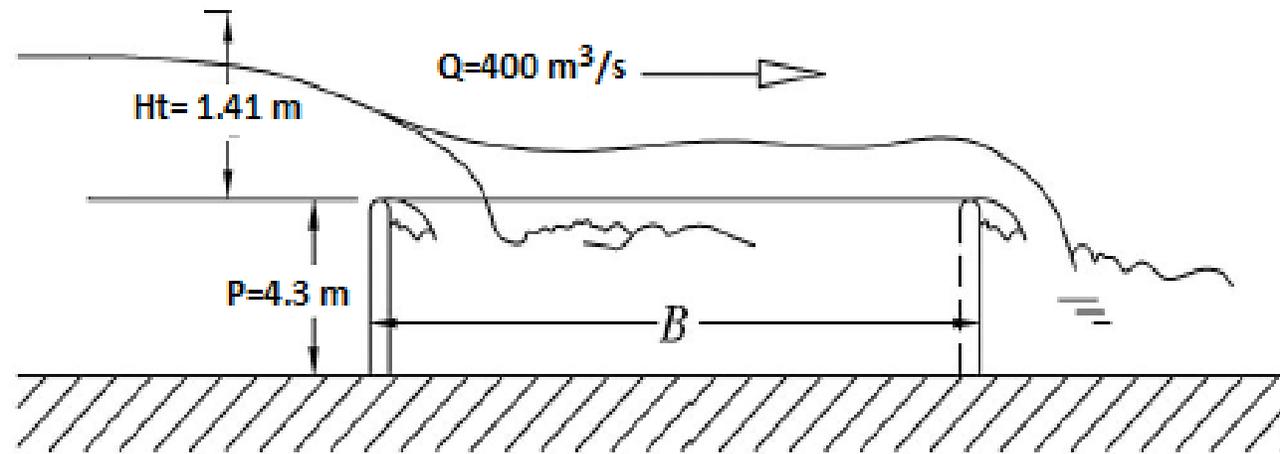


Figura 3. Esquema de parámetros geométricos del vertedor laberinto.



La longitud efectiva del vertedor lineal es:

$$W-0.2*H_t = 30 - 0.2*1.41 = 29.72 \text{ m,}$$

Y su coeficiente de descarga del vertedor lineal:

$$1.778 + H_t/P = 1.778 + 1.41/4.3 = 2.11,$$

Por lo que el gasto que transita a través del vertedor lineal será:

$$C_n * L_n * H_t^{1.5} = 2.11 * 29.72 * 1.41^{1.5} = 104.78 \text{ m}^3/\text{s}.$$

La magnificación del flujo y la relación H_t/P serán igual a:

$$Q_d/Q_n = 400/104.78 = 3.82; H_t/P = 1.41/4.3 = 0.328, (0 \leq H_t/P \leq 0.5).$$

Con los valores de Q_d/Q_n y H_t/P se determina el valor de $W_r = 4.33$ del cuadro (2).



La longitud efectiva del vertedor de laberinto resulta de la aplicación de la ecuación (5):

$$L_e = 30 * 2.11 / 1.50 * 4.33 = 182.37 \text{ m.}$$

El ángulo α de la pared lateral del vertedor resulta:

$$\alpha = 0.75 \arcsen (30/103.63) = 7.10^\circ.$$

Con las relaciones: $Le/W= 6.079$, $w/P= 2.33$, $\alpha= 7.10^\circ$ se obtiene el modelo 28 de la figura (2) de tres ciclos.

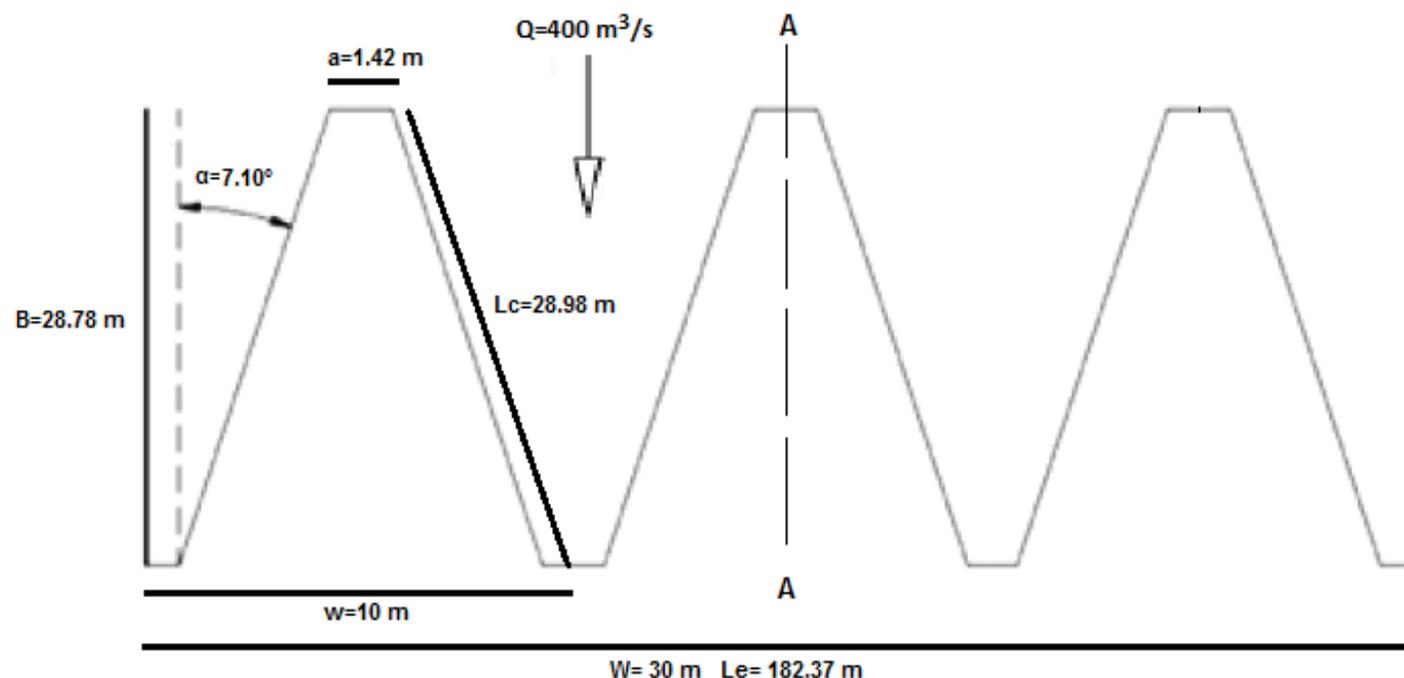


Figura 4. Dimensiones del vertedor tipo laberinto vista en planta, resultado de Hay y Taylor (1970).

En la metodología realizada por Tullis (1995) la relación H_t/P , al igual que Hay y Taylor, es 0.328.

Se propone un ángulo de la pared lateral de 7.3° .

Del Gráfico (2) se obtiene el valor de $C_{d(\alpha)}$ siendo igual a 0.446.

Utilizando la ecuación básica para vertedores, se obtiene la longitud efectiva del vertedor de laberinto, resultando:

$$L_e = 1.5 * Q_d / (C_{d(\alpha)} * H_t^{1.5} * (2g)^{0.5}) = 181.40 \text{ m.}$$

El número de ciclos que conforma el vertedor debe satisfacer los límites que tiene la relación w/P ($3 \leq w/P \leq 4$), siendo un total de 2 ciclos.

- $A = 0.72 \text{ m}$
- $D = 1.98 \text{ m}$
- $L1 = 45.98 \text{ m}$
- $L2 = 45.35 \text{ m}$

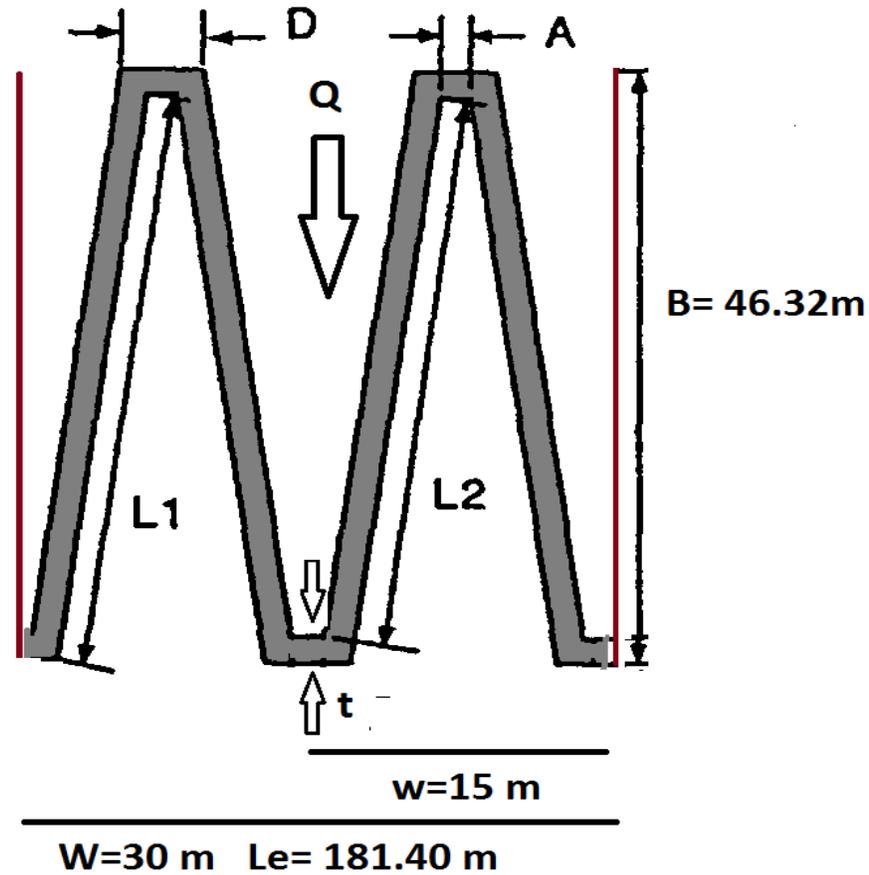


Figura 5. Dimensiones y disposición de ciclos, resultado de Tullis (1995).

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS



- Al obtener la longitud efectiva de la cresta vertedora no existe diferencia significativa entre los métodos de Hay-Taylor y Tullis.
- Con el método de Hay-Taylor se tiene una cresta vertedora de tres ciclos, mientras que con el método de Tullis la cresta vertedora está compuesta por dos ciclos; esto se debe a que los límites de la relación del aspecto vertical (w/P) propuesta por Hay-Taylor es $2 \leq w/P \leq 5$ a contraparte del criterio de Tullis que es más conservador que propone que relación debe variar entre 3 y 4.
- Lux y Tullis mencionan la mejora del rendimiento hidráulico con la disminución de la relación w/P , sin embargo tal reducción provoca el aumento de ciclos existiendo la posibilidad de interferencia entre las láminas vertientes entre paredes laterales de cada ciclo.

CONCLUSIONES



Los vertedores tipo laberinto permite establecer que:

- Son estructuras de elevada capacidad de descarga.
- Pueden precisar de menor espacio.
- Dudosa idoneidad cuando se prevé su funcionamiento para elevadas cargas hidráulicas.

El método de diseño de Hay y Taylor es válido sólo para pequeñas cargas, $H_t/P \leq 0.5$, mientras que Tullis admite cargas más elevadas $H_t/P \leq 0.9$, pero la eficiencia de un vertedor incrementa para valores $H_t/P \leq 0.5$. Es importante mencionar que ambos métodos de diseño son aplicables, siempre y cuando se respete las condiciones que fueron investigados.

Existen tres maneras de analizar la eficiencia hidráulica de un vertedor tipo laberinto:

- Mediante procedimientos experimentales de cálculo cuyos resultados se extrapolan a una determinada gama de geometrías y rangos de funcionamiento.
- Mediante ensayos hidráulicos sobre modelaciones físicas a escala reducida.
- Mediante modelaciones numéricas.

Aunque es recomendable los métodos para el análisis y diseño los vertedores de laberinto, es aconsejable el estudio de un modelo físico y/o numérico para verificar el rendimiento hidráulico. Tal estudio del modelo puede proporcionar información valiosa sobre funcionamiento del vertedor de laberinto.



AGUA EN LA
AGRICULTURA:
Sostenibilidad y rentabilidad



GRACIAS