

REVISIÓN DE PARÁMETROS HIDRÁULICOS EN UN VERTEDOR ESCALONADO USANDO DATOS DE MODELACIÓN FÍSICA Y NUMÉRICA

Cecia Millán Barrera¹, Gilberto Salgado Maldonado¹, Víctor Manuel Arroyo Correa y Paloma I. Contreras Cisneros¹

¹Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, México.

E-mail: cmillan@tlaloc.imta.mx, gsalgado@tlaloc.imta.mx, paloma.cisne.con@gmail.com

Antecedentes

Entre las principales ventajas de los vertedores escalonados están: el aprovechamiento de la cortina como cuerpo del vertedor y disipación de la energía del flujo a lo largo de ésta, eliminando o disminuyendo la necesidad de grandes disipadores de energía al pie del cimacio. Sin embargo, parámetros hidráulicos de este tipo de flujo, se determinan usando relaciones empíricas que dependen de las condiciones de estudio del que se obtengan. En este trabajo se evalúan y comparan de tres formas diferentes, el punto de inyección y su tirante asociado: usando relaciones empíricas, midiéndolas en un modelo físico a escala 1:50 y extrayendo información de una simulación numérica del flujo a escala de prototipo. Las variables mencionadas se comparan para tres diferentes gastos, cuando la condición es de flujo rasante.

Instalación Experimental

A partir del análisis dimensional, información geométrica, topográfica y de construcción disponible se seleccionó la escala del modelo físico. A continuación se presenta en la tabla 1, el resumen de las principales variables.

Tabla 1.- Características geométricas del modelo y su equivalencia en prototipo.

Escala	Modelo	Prototipo
Canal de descarga sobre talud escalonado, m.	4.87 a. arriba 1.50 a. abajo	243.5 a. arriba 75 a. abajo
Altura de escalón h , m.	0.024	1.20
Huella de escalón l , m.	0.030	1.50
Pendiente, v/h .	1/1.23	50/61.5
Gasto, m^3/s .	0.2984	5211.00

El modelo físico a escala 1:50 se construyó en un área aproximada de $131 m^2$, el gasto máximo circulante es de 295 l/s, tiene dos partes principales: el sistema de suministro y desagüe y la rápida escalonada. La corona del vertedor escalonado se localiza a una altura de 2.32 m, la parte central de éste consta de 47 escalones idénticos de 24 mm de altura y 30 mm de huella. Su dimensión es de 1.78 m de largo, 4.87 m de ancho en la parte aguas arriba y 1.50 m de ancho, aguas abajo, es convergente. El área que se instrumentó es una franja central en el vertedor principal, empieza en la corona y termina antes de los deflectores, como se aprecia en la figura 1, siguiente.

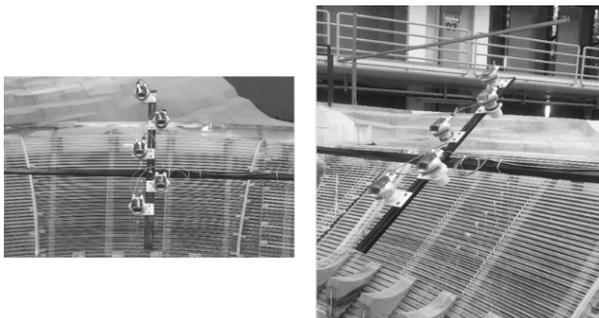


Figura 1.- Instrumentación de la zona de estudio.

Modelación numérica

Para ahorrar tiempo computacional se simuló el flujo en 2D en una franja que abarca el área instrumentada, ya que el propósito es comparar variables medidas en dicha área de estudio, véase la figura 2. El tamaño de celdas es de $0.30 \times 0.3 \times 1 m$, el total de celdas de 800 573, 168 horas de tiempo computacional. Las condiciones de frontera a la entrada corresponden a la curva elevaciones-gasto del tránsito de avenidas sobre el vertedor, mientras que se impuso una salida libre del flujo.



Figura 2.- Dominio de Simulación numérica.

Ecuaciones

El software CFD para la modelación de flujo, resuelve las ecuaciones medias de Navier-Stokes:

Ecuación de continuidad

$$\frac{\partial \bar{U}_j}{\partial x_j} = 0 \quad [1]$$

Ecuación de velocidades

$$\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial t} + \bar{U}_j \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho_N} \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + g_i + \nu_N \frac{\partial^2 \bar{U}_i}{\partial x_j^2} - \frac{\partial (\bar{u}_i \bar{u}_j)}{\partial x_j} \quad [2]$$

Modelo de cerradura RNG

El enfoque del modelo RNG es similar al modelo $k-\epsilon$ pero incluye un término adicional en la ecuación de ϵ que modela la disipación de la turbulencia y el cortante medio, incorpora el efecto de remolinos en la turbulencia, una formula analítica para el número de turbulencia de Prandtl y una formula diferencial para calcular la viscosidad efectiva. En este modelo el tensor de Reynolds se esquematiza de manera análoga a la expresión de esfuerzos moleculares de tal forma que:

$$-\bar{u}_i \bar{u}_j = \nu_T \left(\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{U}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} \kappa \quad ; \quad [3]$$

$$\nu_T = C_\mu \frac{\kappa^2}{\epsilon} \quad [4]$$

En las ecuaciones anteriores \bar{U}_j , es la velocidad media del flujo; ν_N es la viscosidad cinemática, ρ_N densidad del fluido, ν_T es el coeficiente de viscosidad turbulenta; κ es la energía cinética de la turbulencia y ϵ , su disipación, C_μ es igual a 0.0845.

Metodología

Se probaron y simularon los gastos siguientes:

Tabla 2.- Gastos en prototipo, modelo numérico y modelo físico probados.

No. Gasto	Q_{prot} m ³ /s	q_{num} m ² /s	Q_{fis} l/s	Elevación, m
1	1780.25046	5.56328268	100.706	82.40
2	2320.76381	7.25238691	131.282	82.90
3	2850.3877	8.90746157	161.242	83.45
4	3353.99002	10.4812188	189.73	84.00
5	3853.24362	12.0413863	217.972	84.15
6	4235.62995	13.2363436	239.603	84.50
7	4449.90135	13.9059417	251.724	84.90
8	4668.15024	14.5879695	264.07	85.03
9	4853.0413	15.1657541	274.529	85.10
10	4965.27702	15.5164907	280.878	85.20
11	5018.31012	15.6822191	283.878	85.25

Durante los ensayos experimentales se observó que a partir del gasto número 7, se presentan tres zonas de flujo más o menos claras: en la zona 1, flujo sin airear, en la zona 2 empieza un régimen de flujo gradualmente variado, mientras que en la zona 3, ocurre una auto-aireación muy rápida (aguas blancas) y flujo relativamente uniforme, esta distribución muestra pocos cambios al aumentar los gastos mostrados en la tabla 2. Las zonas mencionadas se muestran en la figura 3.



Figura 3.- Cambio de flujo saltante a flujo rasante, gasto 7.

Dado que del gasto número 7 en adelante la distribución del flujo cambia poco, se reportan en este trabajo los resultados de los gastos 7, 9 y 11, referidos a la tabla 2. Para efectos de este resumen se presentan algunos resultados, correspondientes al gasto 7, véase la tabla 3 siguiente.

Tabla 3.- Tirantes hidráulicos medidos a escala de prototipo (1:50) y obtenidos numéricamente, para el gasto 7.

Gasto	Datos	Sensor 1 (m)	Sensor 2 (m)	Sensor 3 (m)	Sensor 4 (m)	Sensor 5 (m)
7	Mod. Físico	2.325	2.07	2.07	2.25	2.7
	Mod. Num.	2.48	2.33	2.17	2.17	2.31
	Error %	-6.7	-12.6	-4.8	3.6	14.4

El punto de inyección se obtuvo de varias maneras: mediante relaciones experimentales, a través de simulación numérica (Figura 4) y mediante la medición con sensores de nivel (Figura 5). Se evaluaron las relaciones experimentales de varios autores cuyos experimentos se llevaron a cabo en condiciones similares a este estudio: Chanson (1994), Iguacel y García (1999), Chamani (2000), Sánchez-Juny (2001), Boes y Hager (2003), Meireles *et al.* (2012). En la simulación numérica se utilizó la

variable de fracción de arrastre de aire al flujo como indicador. De esta forma se grafica dicha variable y en cuanto se observa un cambio en la concentración, se infiere que ese es el punto de inyección por lo que se procede a leer los datos y hacer los cálculos correspondientes para conocer la distancia y el tirante en ese punto.

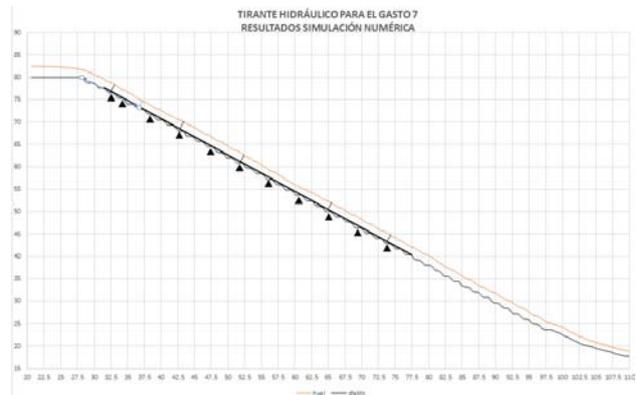


Figura 4.- Perfil de la superficie libre en el vertedor para el gasto 7. Datos numéricos.

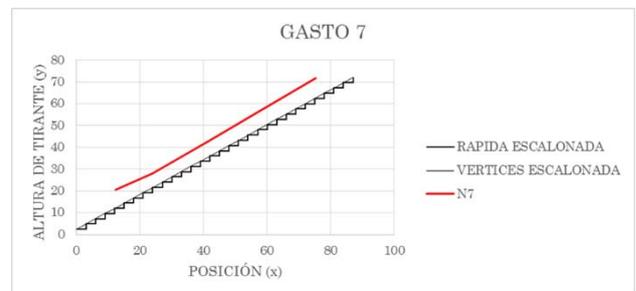


Figura 5.- Perfil de la superficie libre en el vertedor para el gasto 7. Datos medidos en el modelo físico.

El flujo en vertedores escalonados es complejo, aun cuando se han estudiado exhaustivamente se siguen usando metodologías empíricas para determinar el punto de inyección. En la tabla 5, se presentan algunos resultados de la evaluación con relaciones empíricas, medición y simulación para este gasto.

Tabla 5.- Características del punto de inyección evaluados con diferentes criterios en este trabajo.

Gasto	Chanson (1994)		Iguacel & García (1999)	Chamani (2000)	Sánchez-Juny (2001)	Boes & Hager (2003)	Meireles et al. (2012)	
	L_1 (m)	d_1 (m)	L_1 (m)	L_1 (m)	L_1 (m)	L_1 (m)	L_1 (m)	d_1 (m)
7	0.726	0.0251	0.4105	0.8504	0.7745	0.607	0.5781	0.0213
	Modelo físico		Modelo físico escalado		Modelo numérico		L_1 (m)	d_1 (m)
	0.205-0.415		0.045		10.25-20.75		2.25	

Referencias

- Arreguín Cortés, F., Alcocer Yamanaka, V. (2011). *Diseño hidráulico de vertedores*. Jiutepec, Morelos: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Chanson, H. (1993). *Stepped Spillway Flows and Air Entrainment*. Canadian Journal of Civil Engineering , 20 (3), 422-435.
- Chanson, H. (2002a). *The hydraulic of stepped chutes and spillways*. Balkema Publishers.
- Cisneros Contreras, Paloma I. (2018). *Estudio en modelo físico de las características del punto de inyección del vertedor escalonado de la presa de almacenamiento Zapotillo*. Universidad Nacional Autónoma de México. México.
- Millan, C. et al. (2016). *Estudio del flujo en un vertedor escalonado mediante dos modelos de turbulencia*. Memorias del Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Lima, Perú.