

# SOCAVACIÓN AGUAS ABAJO DE CUBETAS DEFLECTORAS

Benjamín Gutiérrez Torres<sup>1</sup>, José Alfredo González Verdugo<sup>2</sup>  
y María Joselina Espinoza Ayala<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Maestría en Ingeniería Civil Hidráulica, Universidad Nacional Autónoma de México, Mexico.

<sup>2,3</sup>Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, México.

E-mail: benjamin.gtz.torres@live.com, jagonzal@tlaloc.imta.mx, jespinoz@tlaloc.imta.mx

## Introducción

De manera general, la socavación se define como un proceso en el cual existe arrastre y deposición de sedimentos en el fondo de un cauce a consecuencia de una avenida. Existen diferentes tipos de socavación, socavación en ríos, socavación en pilas de puentes, socavación al pie de un vertedor, socavación bajo tuberías o socavación aguas abajo de grandes embalses.

Para calcular la socavación aguas abajo de un vertedor se usan ecuaciones obtenidas de forma empírica o semi-empírica, dichas ecuaciones son aplicables únicamente para las condiciones en las que fueron desarrolladas. (Camargo, Franco & Guido, 1999).

Las primeras investigaciones sobre el proceso erosivo al pie de un vertedor iniciaron en el año de 1920 con el desarrollo de estructuras disipadoras de energía, posterior a estos años, Schoklitsch (1928) estudió la socavación usando diferentes tipos de arena para representar el lecho móvil de un río; Veronese (1937) usó un canal rectangular y cuatro tamaños de arena entre 9 y 36.2 mm; Jaeger (1939) continuó los trabajos de Veronese utilizando coeficientes de acuerdo al tipo de geometría del salto de esquí, y Eggenberger (1994) estableció la importancia de la ley de similitud de Froude para modelar la socavación.

Las expresiones matemáticas para calcular la profundidad de socavación usan las variables propias de salto de esquí ( $H$ ,  $\theta_p$ ,  $h$ ), del flujo ( $q$ ,  $g$ ), de las condiciones aguas abajo ( $Y_0$ ) y del tipo de material de fondo ( $d_m$ ,  $d_{50}$ ,  $d_{90}$ ).

## Planteamiento del problema

Las fuerzas hidrodinámicas presentes en la zona de descarga de los vertedores no pueden ser estudiadas mediante métodos analíticos, por tal razón, es necesario usar modelos físicos que permitan visualizar los efectos de estas fuerzas sobre el pozo de socavación.

Las fuerzas mencionadas anteriormente son de presión, de corte y de sustentación, y son las causantes del movimiento de fondo que experimenta la zona de descarga del vertedor.

La modelación física debe representar todas las fuerzas que intervienen en una obra hidráulica, cumpliendo las leyes de semejanza geométrica, cinemática y dinámica, en el caso de los vertedores es necesario simular los aspectos geotécnicos, mecánicos e hidráulicos.

## Objetivo

Con la ayuda de un modelo físico cuyo material de fondo móvil es una grava de  $\frac{3}{4}$ " y  $\frac{1}{4}$ " de diámetro, determinar la profundidad de socavación generada por la descarga de los vertedores y comparar los resultados calculados mediante las ecuaciones empíricas con lo observado en el modelo.

## Ecuaciones para el cálculo de la socavación

Mason & Arumugam (1985) clasificaron las ecuaciones en

cuatro grupos de acuerdo a las variables que intervienen en el cálculo, considerando la dispersión del chorro en el medio líquido, el tipo de suelo y el ángulo de entrada del chorro.

Castillo & Carrillo (2016) recopilaron 36 formulas empíricas para el cálculo de la socavación, basándose en las investigaciones de Mason & Arumugam. La tabla 1 muestra las ecuaciones para calcular la socavación en vertedores de caída libre y en deflectores con salto de esquí.

**Tabla 1.-** Ecuaciones para el cálculo de socavación.

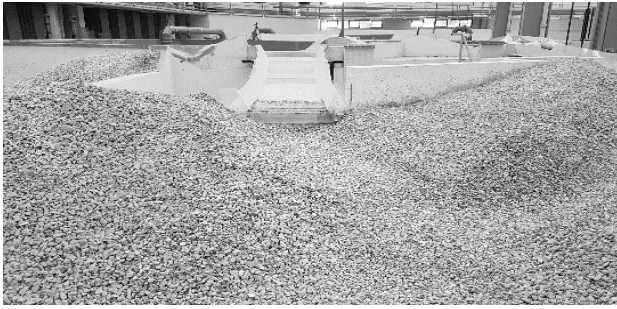
Autor	Formula
Castillo y Carrillo (2016)	$Y_s + Y_0 = k \frac{q^a H^b Y_0^c}{g^d d_m^e d_{90}^f}$ [1]
Jaeger (1939)	$Y_s + Y_0 = 0.6q^{0.5} H^{0.25} \left( Y_0 / d_m \right)^{0.333}$ [2]
Mikhalev (1960)	$Y_s + Y_0 = \frac{1.804 q \sin \theta_j}{1 - 0.215 \cot \theta_j} \left( \frac{1}{d_{90}^{0.33} Y_0^{0.50}} - \frac{1.126}{H} \right)$ [3]
Rubinstein (1963)	$Y_s + Y_0 = Y_0 + 0.19 \left( \frac{H + Y_0}{d_{90}} \right)^{0.75} \left( \frac{q^{1.20}}{H^{0.47} Y_0^{0.33}} \right)$ [4]
Mirtskhulava (1967)	$Y_s + Y_0 = \left( \frac{0.97}{\sqrt{d_{90}}} - \frac{1.35}{\sqrt{H}} \right) \frac{q \sin \theta_j}{1 - 0.175 \cot \theta_j} + 0.25 Y_0$ [5]
Martins - A (1973)	$Y_s + Y_0 = 0.14N - 0.73 \frac{Y_0^2}{N} + 1.7Y_0$ $N = (Q^3 H^{1.5} / d_m^2)^{1/7}$ [6]
Veronese modificado (1994)	$Y_s + Y_0 \dots \dots \dots$ [7]
Mason & Arumugam (1985)	$Y_s + Y_0 = (6.42 - 3.10H^{0.10}) \frac{g^{0.60 - (H/300)} H^{0.15 + (H/200)} Y_0^{0.15}}{g^{0.30} d_{50}^{0.1}}$ [8]

## Metodología

Se utilizó el modelo de una presa de escala 1:96 construido en el Laboratorio de Hidráulica "Enzo Levi" del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). El modelo cuenta con dos vertedores diseñados para un Tr= 10,000 años, el vertedor 1 ( $V_1$ ) posee un gasto de diseño de 10,078.33 m<sup>3</sup>/s y el vertedor 2 ( $V_2$ ) un gasto de 6,882.76 m<sup>3</sup>/s; sobre el lecho aguas abajo se colocó una grava suelta de  $\frac{3}{4}$ " y  $\frac{1}{4}$ " de diámetro (Ver figura 1).

Los ensayos se realizaron para un gasto total de 4,460.31 m<sup>3</sup>/s cuyo Tr= 10 años, en el  $V_1$  el gasto fue de 3,099.40 m<sup>3</sup>/s y en el  $V_2$  de 1,360.91 m<sup>3</sup>/s, este gasto se propuso de acuerdo a lo reportado en IMTA (2014), donde señalan un comportamiento representativo del fenómeno de socavación a partir de 3,000 m<sup>3</sup>/s.

La duración de las pruebas fue de 2 horas, hasta alcanzar el estado de equilibrio, es decir, cuando el material no experimentó movimiento de arrastre hacia afuera o dentro del pozo de socavación.



a) Vertedor 1



b) Vertedor 2

**Figura 1.-** Conformación de topografía aguas abajo de los vertedores.

## Resultados

La profundidad de socavación medida en el modelo es aproximada a la calculada por las ecuaciones de la tabla 1. Se obtuvo una profundidad de 27.24 m en el vertedor 1 y 20.66 m en el vertedor 2.

La tabla 2 muestra los resultados calculados que mejor se aproximan a los medidos en el modelo.

**Tabla 2.-** Resultados obtenidos usando las ecuaciones empíricas

Vertedor 1		Vertedor 2	
Jaeger (1939)	19.52 m	Jaeger (1939)	15.21 m
Mikhalev (1960)	25.72 m	Mikhalev (1960)	18.60 m
Mirtskhulava (1967)	25.18 m	Mirtskhulava (1967)	23.64 m
Martins-A (1973)	20.09 m	Martins-A (1973)	17.15 m
Mason & Arumugan (1985)	16.98 m	Mason & Arumugan (1985)	13.90 m



**Figura 2.-** Vertedor 1, con un gasto de 3,099.4 m<sup>3</sup>/s.



**Figura 3.-** Vertedor 2, con un gasto de 1,360.91 m<sup>3</sup>/s

## Conclusiones

Las ecuaciones de Mikhalev (1960) y Mirtskhulava (1967) calculan una profundidad de socavación aproximada a la observada en el modelo, esto debido a que estas fórmulas usan el ángulo de entrada del chorro y el diámetro característico  $d_{90}$ , es decir, contemplan la zona del impacto y las características del material de fondo, mientras las ecuaciones que solo contemplan el gasto unitario, la carga de energía y el tirante aguas abajo del vertedor tienen un mayor sesgo de medición.

Se están desarrollando ensayos en el Laboratorio de Hidráulica del IMTA, utilizando como material de fondo una mezcla de agregado grueso con cementante para comprobar si las ecuaciones empleadas en este trabajo son aplicables bajo esas condiciones.

## Simbología

- $dm$  = Tamaño promedio de las partículas, en mm.
- $d_{50}$  = Tamaño en el cual el 50% en peso de las partículas es menor, en mm.
- $d_{85}$  = Tamaño en el cual el 85% en peso de las partículas es menor, en mm.
- $d_{90}$  = Tamaño en el cual el 90% en peso de las partículas es menor, en mm.
- $g$  = Aceleración de la gravedad, m/s<sup>2</sup>.
- $H$  = Diferencia entre el nivel del vaso y el nivel del colchón de agua al pie del vertedor, en m.
- $h$  = Diferencia entre el nivel del vaso y la cresta del vertedor, en m.
- $k$  = Coeficiente adimensional
- $q$  = Gasto unitario, m<sup>2</sup>/s.
- $Tr$  = Periodo de retorno, en años.
- $Y_0$  = Tirante aguas abajo, en m.
- $\theta_j$  = Ángulo de entrada del chorro

## Referencias

- Camargo, J., Franco, V. & Guido, S.** (1999). *Socavación al pie de las cubetas de lanzamiento. Formulación Teórica*. México: UNAM, Instituto de Ingeniería.
- Castillo, L. & Carrillo, J.** (2017). "Comparison of methods to estimate the scour downstream of a ski jump", *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 92, March 2017, pp. 171-180.
- Hager, W.** (1998). "Plunge pool scour: Early history and Hydraulicians", *Journal of Hydraulic Engineering*. ASCE, December 1998, pp. 1185-1187.
- Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, IMTA** (2014). *Estudio en modelo físico del vertedor de la presa de almacenamiento Santa María, Mpio. de El Rosario, en el estado de Sinaloa*. México: CONAGUA.
- Mason, P. & Arumugam, K.** (1985). "Free jet scour below dams and flip buckets", *Journal of Hydraulic Engineering*. ASCE. Vol. 111, No.2, February 1985, pp. 220-235.
- Suárez, J.** (2001). *Control de erosión en zonas tropicales*. Bucaramanga, Colombia. Instituto de Investigaciones sobre erosión y deslizamientos.