

# COMPARACIÓN DE RESULTADOS TEÓRICOS Y EXPERIMENTALES DEL FUNCIONAMIENTO DE UN AIREADOR EN UNA RÁPIDA

Javier Osnaya Romero, Víctor M. Ortíz Martínez y Jesús Gracia Sánchez

Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, México.

E-mail: jor@pumas.iingen.unam.mx , VOrtizM@iingen.unam.mx, jgs@pumas.iingen.unam.mx

## Introducción

La cavitación es la formación de cavidades de vapor en un líquido. En las rápidas de un vertedor la cavitación ocurre en el flujo a alta velocidad, donde la presión del agua se reduce localmente debido a una irregularidad en la superficie del fondo. Cuando en la rápida de los vertedores la velocidad es mayor a 22 m/s, se pueden presentar daños por cavitación. Falvey (1984) recomienda un índice de cavitación mayor de 0.25 para evitar daños, con una velocidad cercana a los 29 m/s, sin embargo se recomienda tomar medidas preventivas para prevenir daños con velocidades en el rango de 22-26 m/s.

Otro factor importante a considerar para evitar los daños por cavitación es el contenido de aire cercano a la plantilla del vertedor. Uno de los primeros en realizar mediciones en modelos físicos para determinar el contenido de aire en canales fue Viparelli (1953), el que modificó un tubo de Pitot conectándolo a un depósito donde extraía una muestra del flujo y medía la cantidad de agua y de aire tomada. Posteriormente se han realizado numerosas investigaciones para determinar el contenido de aire mínimo. Uno de los primeros en investigar fue Petarka (1953) quien realizó ensayos con velocidades de 35 m/s y observó que cuando el contenido de aire era entre 1 a 2% se reducía la cavitación pero al incrementándolo entre 6 a 8%, cercano a la plantilla, se evita completamente. Russel y Sheehan (1974) realizaron estudios con velocidades mayores a 46 m/s y determinaron que para evitar la cavitación se requiere una concentración entre 3 a 5%. Por su parte Chanson (1992) analizó varios experimentos y encontró que con un contenido de aire entre 4 a 8% cercano a la plantilla y aún con velocidades mayores de 45 m/s se evitan los daños por cavitación. Por su parte Kramer (2004), desarrolló una ecuación para determinar el contenido de aire cercano a la plantilla aguas abajo del aireador, la cual se presenta a continuación

$$C_b = C_{b0} \exp[-(7,2 * 0,006^{S_0} + 6,6)F_0^{-2,5} * X_{90u}] \text{ para } 5 \leq F_0 \leq 12, S_0 \leq 50\% \quad [1]$$

Donde se expresa el contenido de aire cercano a la plantilla  $C_b$  en función de la concentración de aire en el fondo aguas arriba  $C_{b0}$ , el número de Froude de llegada  $F_0$ , la pendiente del canal  $S_0$ , y la distancia donde se requiere conocer el aire  $X_{90u}$  la cual es adimensional representada por la distancia donde se quiere conocer el contenido de aire entre el tirante donde la concentración de aire es del 90%. Para obtener esta ecuación se utilizaron mediciones realizadas con sonda de fibra óptica.

En el Instituto de Ingeniería, UNAM se realizaron ensayos para conocer el contenido de aire aguas abajo del aireador de la rápida del modelo físico con escala 1/21 del vertedor de excedencias de la Central Hidroeléctrica Huites. Se ubicaron 8 secciones transversales una aguas arriba del aireador y 7 aguas abajo del aireador, en donde se midió el contenido de aire a 2 mm de la plantilla así como a cada centímetro en el tirante y en 5 sitios de cada sección transversal (o sea se midieron un total de aproximadamente  $8 \times 5 \times 7 = 280$  puntos), esto se realizó para con tres gastos diferentes (0.5, 1.0 y 1.5 m<sup>3</sup>/s). En este trabajo se presentan solamente los resultados de la plantilla (a 2 mm) y a 1cm del fondo. Esto para analizar el comportamiento de la concentración del aire en la capa del fondo, que es donde se necesita el conocer el contenido de aire, para evitar la cavitación.

Para la medición de la concentración de aire se utilizó una sonda de conductividad desarrollada en el Instituto de Ingeniería, UNAM, y con los resultados obtenidos se comparan con los resultados del criterio propuesto por Kramer (2004).

## Modelo físico

Lograr una correcta reproducción en modelos físicos de fenómenos hidráulicos donde intervengan flujos aire - agua es complicada e imposible, si se utiliza el mismo fluido en prototipo y modelo ya que el comportamiento de las burbujas de aire se ve afectado directamente por las fuerzas expresadas con los números adimensionales de: Froude  $F_b$ , Reynolds  $R_b$  y Weber  $W_b$  de las burbujas. Los efectos de escala se reducen considerablemente si se respetan ciertos límites. Pfister y Hager (2010) recomiendan trabajar con números de  $W^{0.5} > 140$  o  $R_e > 2.2 \times 10^5$ .

En las instalaciones del Instituto de Ingeniería de la UNAM se utilizó el modelo físico del vertedor correspondiente a la hidroeléctrica Huites, Fig 1. El modelo tuvo el objetivo de conocer el comportamiento del aire a lo largo del vertedor y así conocer la posición donde deberían de colocarse los aireadores para disminuir los riesgos por cavitación- Se decidieron probar tres gastos que fueron de 0.5, 1.0 y 1.5 m<sup>3</sup>/s, cabe señalar que el gasto de diseño en el prototipo del vertedor es de 9500 m<sup>3</sup>/s. La rápida del vertedor cuenta con dos aireadores uno a 4.7 m y otro a 8.6 m medidos a partir de la cresta. En las pruebas realizadas para este trabajo sólo se empleó el primer aireador.



Figura 1.- Modelo físico del vertedor de la hidroeléctrica Huites.

## Instrumentación

Para realizar las pruebas se decidió fabricar una sonda de conductividad de fácil manufactura, cuyo principio ha sido utilizado desde hace tiempo por diferentes autores Cain (1981), Chanson (1988), Kathleen et al (1994). La sonda se conforma de dos sensores contruidos de agujas de 0.8 mm de diámetro instalados dentro de un cuerpo cilíndrico de acero inoxidable que facilita la realización de las mediciones ya que proporciona rigidez al instrumento. Por los sensores circula una corriente eléctrica la cual muestra variaciones dependiendo de la conductividad eléctrica del medio en que se encuentre inmerso, por lo que en las mediciones detectan bien la presencia de agua o de aire lo cual se asocia al paso de una burbuja de aire a través del sensor.

Las sondas de conductividad se han empleado desde los años sesenta con diferentes propósitos de medición como la detección de la fracción de aire, frecuencia de las burbujas y su tamaño obteniendo resultados confiables para un sistema mercurio-nitrógeno Neal y Bankoff, (1963). Posteriormente se han perfeccionado y utilizado en gran número de investigaciones. La sonda empleada en este trabajo y el equipo adicional, fue fabricada en el II, UNAM. La señal que se obtiene de la sondas en este trabajo permite capturar hasta 40 000 muestras por Segundo.

En el método de procesamiento de señales se empleó la técnica de umbrales adaptables, comúnmente utilizados para detectar fallas en los procesos de análisis de señales Höfling y Isermann, (1996).

## Ensayos

El objetivo de estas mediciones es determinar el contenido de aire que se encuentra en el flujo, con principal interés en la concentración cercana a la plantilla que es la que se requiere proteger para evitar los problemas de cavitación. En el modelo físico se decidió medir el contenido de aire sobre el vertedor realizando mediciones en 8 diferentes secciones transversales las cuales fueron 13.0 cm antes del aireador y 0.15, 0.45, 1.20, 1.60, 2.00 y 2.40 cm después del aireador, estas 8 secciones se dividieron en 5 puntos equidistantes a lo ancho de la sección transversal, para medir, a 2 mm de la plantilla, y posteriormente a cada centímetro hasta alcanzar la superficie libre que se calcula desde el fondo hasta donde la concentración de aire es menor a 0.9 Pfister, (2010). Se realizaron pruebas en el modelo físico con tres gastos 0.5, 1.0 y 1.5 m<sup>3</sup>/s. Las mediciones se realizaron con una frecuencia de 20 000 Hz, en cada uno de los dos canales de lectura durante una duración promedio de 35s, para posteriormente realizar el análisis de las señales con la técnica de umbrales adaptables, y finalmente con el promedio de ambos registros determinar el contenido de aire promedio en cada sección transversal, en la Figs. 2 se presentan los resultados para Q = 1.5 m<sup>3</sup>/s. Los resultados se compararon con la ec. 1 propuesta por Kramer (2006).

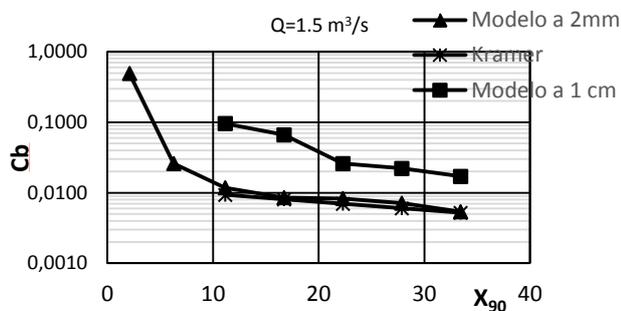


Figura 2.- Concentraciones de aire con 0.5 m<sup>3</sup>/s.

De las mediciones realizadas se obtuvieron los números de Reynolds y Weber para cada ensayo, con la finalidad de corroborar que los efectos de escala, los valores se presentan en la Tabla 1, y se observa que están en el rango de los criterios establecidos anteriormente.

En las Fig 2 se muestra el contenido de aire cercano a la plantilla (2 mm) y a 1cm de la misma, para ello se utilizaron los promedios de las mediciones. Además se compararon los resultados con los obtenidos con la ecuación de Kramer (2006), De las mediciones de contenido de aire se observa que para los tres gastos (aquí solo se presenta la gráfica para Q = 1.5 m<sup>3</sup>/s) y a 2mm se presenta una concentración de aire menores al 1 % que se encuentran por debajo de los valores que recomiendan para que se pueda prevenir el daño por cavitación, sin embargo para los valores de contenido de aire a 1 cm estos se encuentran entre el 2 y 10% valores recomendados para prevenir la cavitación en el fondo.

Tabla 1.- Valores de Reynolds y Weber.

Q [m <sup>3</sup> /s]	Re x 105	W <sup>0.5</sup>
0.5	2.89	159.73
1.0	5.77	247.46
1.5	8.66	313.71

Además de acuerdo a las mediciones y a la comparación con lo calculado utilizando la expresión de Kramer (2006), se observa que ambos valores son similares por lo que utilizar dicha expresión para conocer la concentración de aire en la plantilla es confiable.

## Conclusiones

Es confiable medir el contenido de aire en modelos físicos de gran tamaño, mediante la implementación de sondas de conductividad y un correspondiente postprocesamiento con la técnica de umbrales adaptables. Adicionalmente, una ventaja que tiene el equipo empleado es que puede implementarse en cualquier tipo de sección transversal, como por ejemplo en túneles de sección circular.

Al comparar las mediciones realizadas en laboratorio y comprar con los calculados utilizando la ecuación propuesta por Kramer (2006) se observa que la correlación es confiable para obtener la concentración en el fondo, por lo que utilizar dicha ecuación para estimar la concentración de aire también en prototipos es recomendable.

Las mediciones realizadas muestran que existe una diferencia entre los valores del fondo (2 mm) y los obtenidos a 1 cm, por lo que hay que tomar consideración en cada caso a que distancia de la plantilla se considera adecuado considerar una determinada concentración de aire para evitar los daños por cavitación.

## Referencias

- Chanson, H. (1988). *Study of air entrainment and aeration devices on spillway model*. Ph.D. thesis, Univ. of Canterbury, Christchurch.
- Chanson H. (1992), *Air entrainment in chute and spillways*, Department of Civil Engineering, Research report series, The University of Queensland.
- Falvey H. T. (1984), *Cavitation studies in tunnel spillways*, Symposium on scale effects in modelling hydraulic structure, Esslingen Germany.
- Kramer, K. (2004). *Development of aerated chute flow*. VAW Mitteilung 183, H.-E. Minor, ed., Laboratory of Hydraulics, Hydrology and Glaciology, ETH Zurich, Zürich, Switzerland.
- Kramer K., Hager W H. and Minor H-E (2006) *Development of Air Concentration on Chute Spillways*. Journal of Hydraulic Engineering, 132(9), 908–915.
- Neal L. G. and Bankoff S. G(1963), *A High Resolution Resistivity Probe for Determination of Local Void Properties in Gas-Liquid Flow*, A.I.Ch.E Journal.
- Petarka A. J.(1953), *The effect of entrained air on cavitation pitting*, Joint Meeting Paper, Minnesota.
- Pfister M. and W. H. Hager (2010), *Chute aerators I: Air transport characteristics*, J. Hydraulic Eng., 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000189, 352–359.
- Russel S.O. and G.J. Sheehan (1974), *Effect of entrained air cavitation damage*, Can. J. Civ. Engr. Canada Vol. 1.
- Viparelli M. (1953), *The flow in a flume with 1:1 slope*, University of Napoli Italy
- Wood, R.I. (1991). *Air Entrainment in free-surface flows*. University of Canterbury, Christchurch, New Zealand. A.A. Balkema/Rotterdam/Brookfield, 142p.