

SIMULACIÓN NUMÉRICA DE LA EFICIENCIA DE UN AIREADOR EN UN TÚNEL DE DESCARGA Y COMPARACIÓN CON DATOS EXPERIMENTALES

Gian Reyes Mendoza¹; Mariano de Dios¹, Sergio Liscia¹

¹UIDET Hidromecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata, Argentina

giansal723@gmail.com – dediosmariano@gmail.com – soliscia1@gmail.com

INTRODUCCIÓN

La seguridad de las presas de embalse en un punto crítico requiere su atención en la etapa de construcción, llenado, operación y mantenimiento. Es por este motivo que se instala descargadores de fondo (DF) diseñados para poder realizar el vaciado del embalse sin importar el nivel en el mismo, con el objetivo de realizar tareas de mantenimiento, limpieza de sedimentos, control de crecidas entre otros.

Una descarga de aire insuficiente podría ocasionar problemas de erosión por cavitación que afecten la operación segura de los descargadores de fondo (Falvey 1980; Volkart y Rutschmann 1991). Además, un desafío adicional podría ser el excesivo ruido del viento en las operaciones de descarga de inundaciones. Si bien la seguridad de la operación del túnel se cumplía incluso con una baja eficiencia de suministro de aire, la alta velocidad del aire, con un ruido del viento superior a 85 dB, amenazaba las condiciones de trabajo del personal (Davies y Williams, 1968; Falvey, 1980).

Los estudios experimentales, como el realizado por Wei et al. (2023), proveen datos valiosos para entender cómo el tamaño y la ubicación de los aireadores afectan la eficiencia del suministro de aire. Sin embargo, la experimentación a escala real o en modelos físicos puede ser costosa y compleja. La Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) se presenta como una herramienta complementaria para explorar estos fenómenos de manera más eficiente.

Este estudio se centra en evaluar la capacidad del solver interFoam de OpenFOAM, basado en el método de Volumen de Fluido (VoF), para simular y predecir la eficiencia del suministro de aire en túneles de descarga. Utilizando los datos experimentales de Wei et al. (2023) como parámetro de comparación, se busca cuantificar la precisión de este enfoque numérico ampliamente utilizado y establecer una línea base para el desarrollo de modelos más avanzados en el futuro.

MATERIALES Y MÉTODOS

El dominio computacional replica la geometría del túnel de descarga del experimento de Wei et al. (2023), con un ancho $W_t=0.25$ m, una longitud $L_t=16$ m y una pendiente $\alpha=2^\circ$. Se simuló un total de ocho escenarios, todos con un tirante de agua $h_w=0.13$ m. Los cuatro primeros escenarios para una velocidad del flujo de $V_w=3.1$ m/s y los cuatro restantes para un escenario con $V_w=4.7$ m/s. Para cada velocidad, se varió la altura total del túnel h_t para lograr cuatro relaciones de área residual de aire Sat/St (0.25, 0.30, 0.40 y 0.50). Para este estudio, el número de Froude de flujo osciló entre 2,07 y 5,30, lo que indicó que se alcanzó el flujo supercrítico en cada prueba. Se adiciona un conducto a presión aguas arriba de la sección donde se ubica la compuerta de control del túnel de descarga con el objetivo de tener un perfil de velocidades totalmente desarrollado en la sección de control.

Todas las simulaciones se realizaron utilizando el solver interFoam de OpenFOAM 2312 en 2D, que utiliza el método VoF para capturar la interfaz aire-agua. Se empleó una malla estructurada de aproximadamente 240k elementos, con un fuerte refinamiento en la zona de la interfaz y cerca del aireador para resolver adecuadamente los gradientes de velocidad y la capa límite. Para el escenario de mayor velocidad ($V_w=4.7$ m/s), el valor de Y^+ en las paredes se mantuvo por debajo de 140. Para el modelado de la turbulencia se utilizó el modelo RANS k- ϵ estándar junto con funciones de pared para el tratamiento de las capas límite, lo que resulta apropiado para el rango de Y^+ obtenido. Las condiciones de contorno incluyeron una entrada de velocidad para el agua, una salida de presión para el extremo del túnel y una condición de presión atmosférica para el aireador. El caudal de aire Q_a se calculó integrando el flujo de aire a través de la sección transversal del aireador una vez alcanzado el estado estacionario.

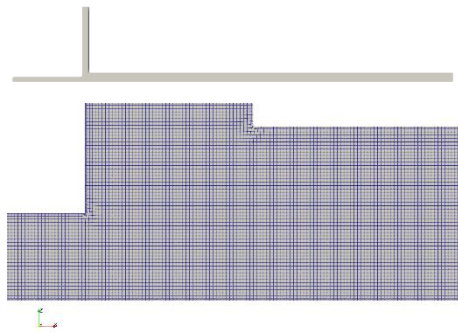


Figura 1.- Dominio computacional y detalle de la malla (Fuente: propia).

RESULTADOS

Los resultados de las simulaciones 2D con interFoam demostraron su capacidad para capturar las tendencias físicas fundamentales del fenómeno en régimen supercrítico. Como se muestra en la Fig. 1, el caudal de aire Q_a aumenta con la relación Sat/St para ambas velocidades, y los valores son consistentemente más altos para la mayor velocidad ($V_w=4.7$ m/s), lo que coincide con los principios de arrastre por corte en la interfaz y con las tendencias observadas en los datos experimentales.

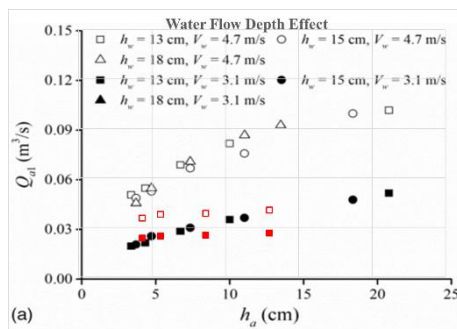


Figura 2.- Caudal de aire (Q_a) en función del tirante de aire (h_a). Comparación entre los resultados experimentales de Wei et al. (2023) y las simulaciones numéricas

Sin embargo, el análisis cuantitativo revela una subestimación sistemática del caudal de aire por parte del modelo 2D con interFoam. Las predicciones numéricas se sitúan aproximadamente entre un 30% y 50% por debajo de los valores medidos experimentalmente. Esta discrepancia es atribuible a dos factores principales: primero, una limitación fundamental del método VoF, que si bien es excelente para rastrear una interfaz aire-agua definida, no puede modelar el mecanismo de arrastre y la presencia de burbujas de aire dentro de la masa de agua, un componente crucial del caudal

de aire total en estos escenarios. Segundo, la naturaleza 2D de la simulación impide capturar efectos tridimensionales y variaciones transversales que podrían influir en los patrones de flujo y en la eficiencia del arrastre de aire.

CONCLUSIONES

El modelo 2D con el solver interFoam y el modelo de turbulencia k-epsilon con funciones de pared demostró ser una herramienta efectiva para reproducir las tendencias cualitativas del suministro de aire en túneles de descarga en régimen supercrítico. Logra capturar correctamente la dependencia del caudal de aire con el espacio disponible en el túnel (Sat/St) y con la velocidad del flujo de agua (V_w).

No obstante, se identificaron limitaciones cuantitativas críticas. La naturaleza del método VoF, al no modelar el aire arrastrado, sumado a las simplificaciones inherentes a un modelo 2D y al uso de funciones de pared, resulta en una subestimación sistemática del caudal de aire, lo que lo convierte en una herramienta insuficiente para predicciones de diseño que requieren alta precisión.

Los resultados y la metodología sirven como referencia fundamental para evaluar el desempeño de modelos numéricos más avanzados que sí puedan abordar la física faltante, tanto en 2D como en 3D.

REFERENCIAS

- Davies, H. G., and J. E. F. Williams. 1968. "Aerodynamic sound generation in a pipe." *J. Fluid Mech.* 32 (4): 765–778. <https://doi.org/10.1017/S0022112068001011>.
- Falvey, H. T. 1980. *Air-water hydraulic flow in structures*. Engineering Monograph No. 41. Denver: US Department of the Interior, Water and Power Resources Service.
- Volkart, P., and P. Rutschmann. 1991. "Aerators on spillways." In *Air entrainment in free-surface flows: IAHR hydraulic structures design manual 4.1*, edited by I. R. Wood. Rotterdam, Netherlands: A.A. Balkema.
- Wei, W., Gong J., Deng, J., and Xu, w. 2023. "Effects of Air Vent Size and Location Design on Air Supply Efficiency in Flood Discharge Tunnel Operations" *Journal of Hydraulic Engineering* Volume 149, Issue 12 <https://doi.org/10.1061/JHEND8.HYENG-13305>.