

MODELACIÓN NUMÉRICA DE LA INCORPORACIÓN DE AIRE EN EL FLUJO RASANTE SOBRE VERTEDEROS ESCALONADOS

Brenda Vath^a, Federico Zabaleta^b, Mariano de Dios^a, Fabián A. Bombardelli^c

^aFacultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata, Av. 1 y 47, La Plata, Argentina

^bCenter for Turbulence Research, Stanford University, Stanford, California 94305, USA

^cDepartment of Civil and Environmental Engineering, University of California, Davis, California 95616, USA

brenda.vath@gmail.com - fzabaleta@stanford.edu - dediosmariano@gmail.com - fabombardelli@ucdavis.edu

INTRODUCCIÓN

El flujo sobre vertederos incorpora aire de forma natural como resultado de la compleja interacción entre fuerzas de flotación, la tensión superficial y estructuras turbulentas en la superficie libre. Cuando las rápidas de los vertederos son escalonadas, la presencia de los escalones intensifica la turbulencia del flujo, trasladando hacia aguas arriba el inicio de incorporación natural de aire en el flujo respecto a las rápidas lisas. El aire incorporado modifica la hidrodinámica del flujo y tiene implicancias medioambientales relevantes, por lo que su modelación precisa es indispensable tanto en la etapa de diseño como durante la operación de estas estructuras hidráulicas. Sin embargo, la representación de flujos aireados es aún un desafío: la modelación física impone importantes limitaciones para evitar efectos de escala y los modelos numéricos de arrastre de aire se debaten entre un costo computacional razonable y la capacidad de representar la compleja naturaleza multi-escala de los flujos aireados.

En el presente trabajo se evalúa el modelo numérico *airFoam* para la simulación del flujo rasante sobre una rápida escalonada. Los resultados se comparan con las mediciones experimentales en uno de los escenarios ensayados por Terrier (2016). Se presenta una breve descripción de la formulación matemática del modelo numérico y se analiza su capacidad para reproducir el desarrollo de la superficie libre y la concentración de aire.

MATERIALES Y MÉTODOS

Dominio computacional

Las dimensiones del dominio computacional se ajustan a las del modelo físico de la rápida escalonada ensayado por Terrier (2016), en el escenario con inclinación de 50°, 4 m de altura y escalones de 0.06 m de alza (Figura 1). La malla estructurada se refina en zonas críticas, alcanzando

un tamaño mínimo de 0.005 m. Las condiciones de borde incluyen: ingreso del flujo con caudal fijo, paredes sin deslizamiento y con funciones de pared, presión atmosférica e intercambio de aire, y descarga libre del flujo.

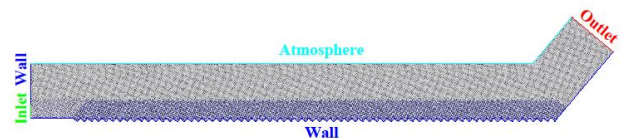


Figura 1.- Dominio computacional 2D rotado 50°, condiciones de borde y malla.

Modelo numérico

Las simulaciones se realizaron con el modelo numérico *airFoam* y el cierre de turbulencia $k - \omega$ Shear Stress Transport (SST), utilizados a través del código abierto de volúmenes finitos, OpenFOAM. *airFoam* es un modelo reciente, desarrollado por Zabaleta et al. (2023), basado en una formulación de mezcla trifásica (aire, burbujas y mezcla de agua y burbujas). Sus ecuaciones gobernantes se derivan del enfoque Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS) para un flujo incompresible, resultando en una ecuación de conservación de momento para la mezcla trifásica, una ecuación de conservación de masa para la fase de burbujas y una ecuación de conservación de masa para la fase de mezcla de agua y burbujas, que además permite resolver la superficie libre.

RESULTADOS

Las simulaciones realizadas en este trabajo se corresponden al escenario ensayado por Terrier (2016) con una descarga específica de 0.356 m²/s, y un número de Froude y tirante del flujo de aproximación de 5.5 y 0.075 m, respectivamente.

Superficie libre

La Figura 2 muestra la capacidad del modelo *airFoam* para reproducir el desarrollo de la superficie libre a lo largo de la rápida, tanto en la

región no aireada del flujo como aguas abajo del punto de inyección. El modelo predice la posición del inicio de la aireación, el esponjamiento del flujo debido a la aireación natural, y la tasa de incorporación de aire. A diferencia de Terrier (2016), que ubica el punto de inyección donde la concentración de aire en el pseudo-fondo (plano que coincide con los vértices exteriores de los escalones) alcanza el 1%, el modelo *airFoam* lo define como el punto en el que se inicia la incorporación natural de aire en el flujo.

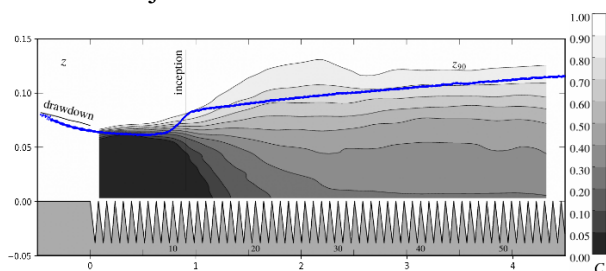


Figura 2.- Desarrollo de la superficie libre. Los resultados experimentales se presentan en forma de curvas de isoconcentración de aire; los numéricos, con línea azul. La superficie libre coincide con la concentración de aire del 90%. Fuente: modificado de Terrier (2016).

Concentración de aire

La evolución de la concentración media de aire (C_a) también es fielmente capturada por el modelo *airFoam* (Figura 3), lo que indica una predicción adecuada del volumen de aire incorporado en el flujo. Sin embargo, el modelo subestima la difusión de las burbujas en el tirante, evidenciado por la menor concentración de aire en el pseudo-fondo (C_b), un comportamiento que también se observa en los perfiles de concentración de aire (Figura 4). A pesar de esto, los perfiles de concentración obtenidos en la simulación muestran una buena correspondencia en los dos tercios superiores del tirante con los datos experimentales y, especialmente, con los perfiles propuestos en la literatura.

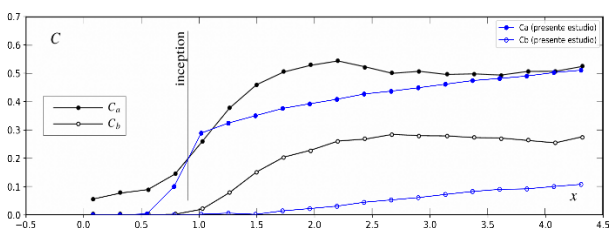


Figura 3.- Resultados experimentales (negro) y numéricos (azul) de la evolución de la concentración de aire media (C_a) y en el pseudo-fondo (C_b). Fuente: modificado de Terrier (2016).

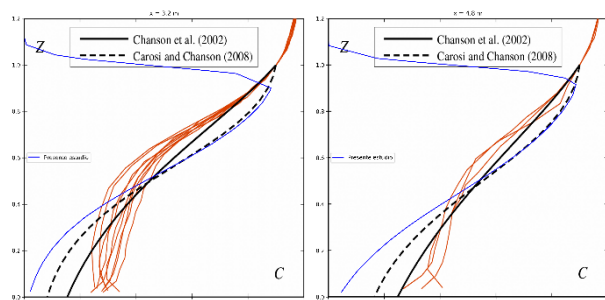


Figura 4.- Perfiles de concentración de aire experimentales (naranja), numéricos (azul) y teóricos (negro) en las progresivas 3.2 m (izq.) y 4.8 m (der.). Fuente: modificado de Terrier (2016).

Recurso computacional

Se simularon 10 segundos físicos en 6 horas con 7 núcleos del procesador Intel Xeon E5-2680 v4.

CONCLUSIONES

El modelo *airFoam* demostró su capacidad para simular el flujo rasante sobre una rápida escalonada, en base al acuerdo entre los resultados numéricos y las mediciones experimentales de la superficie libre y la concentración de aire. La eficiencia computacional en la simulación de flujos aireados convierte al *airFoam* en un modelo con gran potencial para simular problemas de ingeniería hidráulica, caracterizados por dominios grandes y números de Reynolds altos.

Sin embargo, los resultados indican que aún se requieren ajustes en las simulaciones para representar con precisión y de forma simultánea la superficie libre y la difusión de las burbujas hacia el fondo de la rápida. En este sentido, cabe señalar que en este trabajo se utilizó un cierre turbulento monofásico para representar las tensiones de Reynolds, que no considera el efecto de las burbujas en la cantidad de aire arrastrado y su distribución. Este aspecto constituye una línea relevante para trabajos futuros.

REFERENCIAS

- Terrier, S. (2016) Hydraulic Performance of Stepped Spillway Aerators and Related Downstream Flow Features. Ph.D. Thesis. EPFL, Lausanne, Switzerland.
- Zabaleta, F.; Márquez Damián, S. and Bombardelli, F. A. (2023). A novel three-phase mixture approach for the numerical modeling of self-aerated flows. CMAME 408, p. 115958.