

Validación de simulaciones de flujo bifásico en programas de CFD

José María Carrillo Sánchez, Luis Gerardo Castillo Elsitdié

Grupo de investigación Hidr@m - Ingeniería Hidráulica, Marítima y Medioambiental
Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos y de Ingeniería de Minas
Paseo Alfonso XIII, Nº 52, 30203 Cartagena (España)

Teléfono: 868071289

E-mail: jose.carrillo@upct.es, luis.castillo@upct.es

Resumen. Los programas de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) permiten resolver los problemas de mecánica de fluidos dentro de cualquier geometría. Muchos de estos códigos simulan la interacción entre diferentes fluidos como el flujo bifásico aire-agua que se origina en los dispositivos de disipación de energía existentes en la mayoría de las presas. El comportamiento del agua parece estar bien capturado. Sin embargo, la interacción de los dos fluidos entraña ciertas dudas. En este trabajo se simulan con el programa comercial FLOW-3D un resalto hidráulico y un aliviadero de vertido libre. Los resultados se comparan con estudios de laboratorio llevados a cabo por distintos autores. En resaltos hidráulicos se obtienen buenas simulaciones de velocidades aunque diferencias importantes en las tasas de aireación. En vertido libre no se logra simular el fenómeno de aireación.

1. Introducción

La ventaja principal de la metodología de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) es la posibilidad que ofrece para investigar los sistemas físicos de los fluidos, proporcionando una gran cantidad de datos, con una mayor rentabilidad, flexibilidad y velocidad que la que se obtiene con los procedimientos experimentales, siempre y cuando previamente se haya realizado una adecuada calibración.

El dominio fluido del área de estudio queda dividido en volúmenes de control, en los cuales se resuelven numéricamente las ecuaciones de Navier-Stokes y promediado de Reynolds que rigen el fenómeno:

- Conservación de masa:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U}) = 0$$

- Conservación de cantidad de movimiento:

$$\frac{\partial (\rho \mathbf{U})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} \otimes \mathbf{U}) = -\nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} + \mathbf{S}_M$$

- Conservación de energía:

$$\begin{aligned} \frac{\partial (\rho h_{tot})}{\partial t} - \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} h_{tot}) = \\ = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \nabla \cdot (\mathbf{U} \cdot \boldsymbol{\tau}) + \mathbf{U} \cdot \mathbf{S}_M + \mathbf{S}_E \end{aligned}$$

donde:

$$\boldsymbol{\tau} = \mu \left(\nabla \mathbf{U} + (\nabla \mathbf{U})^T - \frac{2}{3} \delta \nabla \cdot \mathbf{U} \right)$$

$$h_{tot} = h + \frac{1}{2} \mathbf{U}^2$$

siendo p la presión, ρ la densidad del fluido, \mathbf{U} el vector velocidad, $\boldsymbol{\tau}$ el tensor de tensiones turbulentas, h la energía, \mathbf{S}_M el término de las fuerzas másicas, \mathbf{S}_E

el término fuente, λ la conductividad térmica, μ la viscosidad dinámica y δ el delta de Kronecker.

Para resolver el problema de clausura (sistema con más incógnitas que ecuaciones) se han desarrollado diferentes algoritmos que tienen en cuenta modelos de turbulencia de distintos grados de complejidad, los cuales van desde los modelos algebraicos de viscosidad de remolino ($k-\epsilon$, $k-\omega$, etc.), hasta los modelos de tensión de Reynolds (RMS).

Aunque la metodología CFD constituye una herramienta muy potente que, junto a las técnicas clásicas, ayudarán a complementar el conocimiento del comportamiento del flujo en las diferentes estructuras hidráulicas, requiere la calibración y contraste con información disponible de prototipos y/o modelos reducidos.

2. Modelación numérica

Para la resolución numérica se ha escogido un programa comercial de CFD, en concreto la versión 10.0 de FLOW-3D.

Al ser un programa de diferencias finitas, FLOW-3D requiere la resolución de mallas estructuradas. El programa emplea el método Fractional Area/Volume Obstacle Representation (FAVOR), desarrollado por Hirt y Sicilian (1985). Este método permite resolver mallados completamente estructurados, mucho más fáciles de generar que los mallados no estructurados.

El método Volume of Fluid (VOF) permite considerar únicamente la parte correspondiente al agua en el flujo (Hirt y Nichols, 1981). No se resuelve la dinámica de la fase gaseosa, sino que se trata como regiones de presión uniforme, utilizándose la presión como condición de contorno en la interfaz líquido-gas. Esto origina una teórica reducción del tiempo de simulación al no tener en cuenta la fase del aire. La localización de la superficie libre dentro de

cada elemento se obtiene en cada paso del proceso de cálculo.

De los posibles sistemas de VOF disponibles en FLOW-3D, se ha optado por el método Split Lagrangian, también conocido como TruVOF. Este método obtiene buenos resultados en el rastreo de la interfaz aire-agua en movimientos tridimensionales complejos, y produce errores acumulados de volumen inferiores al resto de los métodos disponibles en el programa (FLOW Science Inc., 2011).

Para resolver el problema de clausura se ha empleado el modelo de turbulencia de dos ecuaciones RNG $k-\varepsilon$.

3. Resultados y discusión

Se han analizado dos dispositivos de disipación de energía: resalto hidráulico y aliviadero de vertido libre.

El resalto hidráulico se ha simulado de acuerdo a las condiciones ensayadas en laboratorio por Chanson y Brattberg (2000). Las condiciones de contorno se corresponden con el calado al inicio del resalto $y_1 = 0.014$ m, la velocidad de entrada $V_1 = 2.58$ m/s, y el calado conjugado del resalto $y_2 = 0.119$ m. El número de Froude que caracteriza el resalto es $F_r = 6.33$.

La Figura 1 muestra la entrada de aire que el programa resuelve al emplear los módulos de entrada de aire en el fluido, obtenida con un mallado de 0.01 m. La concentración de aire C simulada alcanza el 50% en la parte superior del resalto, mientras que la parte inferior del resalto está poco aireado.

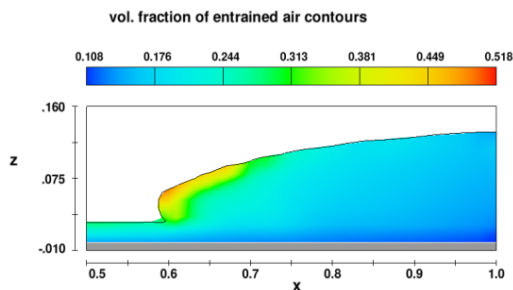


Figura 1. Facción de aire introducida el resalto hidráulico (abscisas y ordenadas en metros)

Las Figuras 2 y 3 representan los perfiles de velocidad y concentración de aire obtenidos en las secciones transversales localizadas a 0.05 y 0.20 m del inicio del resalto, respectivamente. En ambos casos las velocidades adimensionalizadas (V/V_1) de la simulación numérica son muy similares a los resultados de laboratorio obtenidos por Chanson y Brattberg (2000). El perfil teórico empleado por los autores fue inicialmente propuesto por Ohtsu et al. (1990).

En lo referente a la aireación, no se han obtenido en general buenos resultados, produciéndose las mayores diferencias en la mitad superior del resalto, donde la variación de la lámina libre es muy acusada.

El aliviadero de vertido libre se ha simulado de acuerdo a las mediciones realizadas en el Laboratorio

de Hidráulica de la Universidad Politécnica de Cartagena (Castillo et al., 2014).

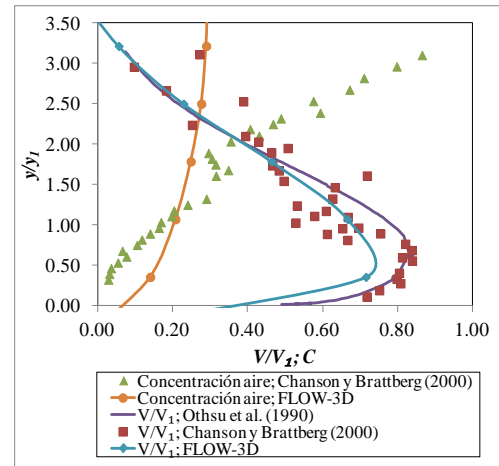


Figura 2. Perfiles de velocidad y aireación obtenidos a 5 cm del inicio del resalto

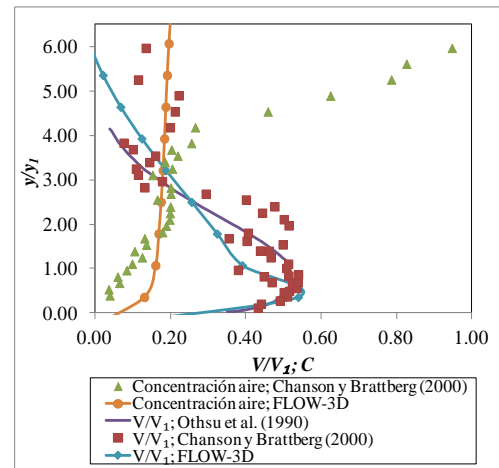


Figura 3. Perfiles de velocidad y aireación obtenidos a 20 cm del inicio del resalto

La Figura 4 muestra los resultados de la fracción volumétrica de aire resuelta con el programa de CFD, obtenidos con un mallado de 0.002 m y los mismos módulos de entrada de aire empleados en el resalto.

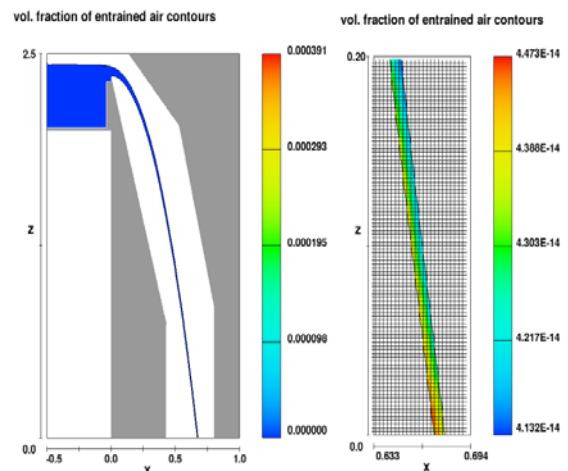


Figura 4. Facción de aire introducida en chorro de vertido libre y detalle del mallado empleado (abscisas y ordenadas en metros)

Según Castillo et al., 2014, en estas condiciones la aireación en laboratorio alcanza valores del 40% para

una altura de caída de 2.45 m. Estos resultados fueron obtenidos con un equipo de fibra óptica en laboratorio. Sin embargo, el aire introducido en la simulación numérica es prácticamente nulo.

Las diferencias en la resolución del aire introducido entre el resalto hidráulico y el chorro de vertido libre parecen estar relacionadas con la energía cinética turbulenta calculada.

La Figura 5 muestra la energía cinética turbulenta k simulada en el resalto hidráulico, mientras que la Figura 6 muestra los valores obtenidos en el aliviadero de vertido libre.

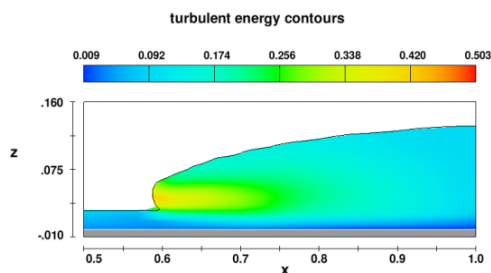


Figura 5. Energía cinética turbulenta en resalto hidráulico (abscisas y ordenadas en metros)

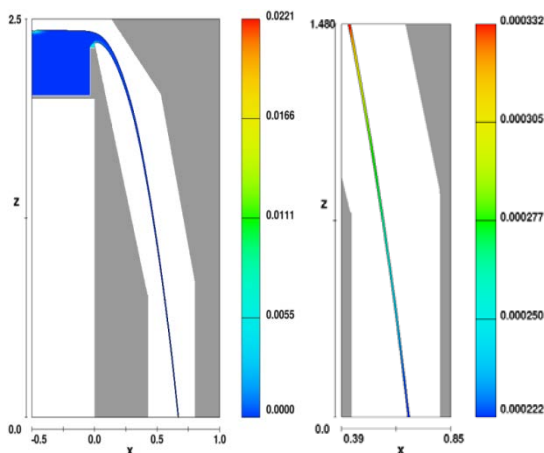


Figura 6. Energía cinética turbulenta en chorro de vertido libre (abscisas y ordenadas en metros)

La energía cinética turbulenta en el resalto hidráulico se concentra en la parte central de la columna de agua, donde se produce la zona de recirculación del flujo. En la parte inicial del resalto se obtienen valores de k hasta $0.50 \text{ m}^2/\text{s}^2$.

En el vertido libre se alcanzan valores de k en torno a $0.002 \text{ m}^2/\text{s}^2$ cuando se ha producido una caída de 2.35 m. El programa no resuelve la fase gaseosa, sino que la analiza como condiciones de contorno. Al no existir interacción con contornos sólidos y no reproducirse la interacción aire-agua, la simulación tiende a disipar la energía durante la fase de caída, en vez de generarla. Estos reducidos valores de energía cinética turbulenta no permiten la entrada de aire en el chorro vertiente, por lo que falla la predicción de la entrada de aire en la simulación.

4. Conclusiones

En este trabajo se han simulado dos mecanismos de disipación de energía habituales en ingeniería de presas, en los cuales la interacción aire-agua juega un papel fundamental.

En resalto hidráulico se han obtenido buenos ajustes de los perfiles de velocidad. Sin embargo, existen diferencias importantes en las tasas de aireación.

En el aliviadero de vertido libre, FLOW-3D resuelve el chorro sin considerar la entrada de aire. Esto parece estar relacionado con un fallo en la simulación de su energía cinética turbulenta al no existir contornos sólidos. De este modo, no se reproduce la disipación de energía por aireación.

En las últimas versiones se han realizado cambios en los modelos de turbulencia que han afectado a los modelos de entrada de aire. Una de las prioridades de Flow Science Inc. es remodelar el código para evitar que ocurra este efecto indeseable.

Los programas de CFD son herramientas que pueden contribuir al diseño de las estructuras hidráulicas. Sin embargo, los resultados deben ser contrastados con modelos físicos y/o formulaciones empíricas.

Agradecimientos

Esta investigación se financia con los fondos del Ministerio de Ciencia e Innovación de España y los fondos Europeos de Desarrollo Regional (FEDER), Proyecto BIA2011-28756-C03-02.

Referencias

- [1] Castillo, L.G., Carrillo, J.M., Sordo-Ward, A. (2014). "Simulation of overflow nappe impingement jets". *Journal of Hydroinformatics*, (in press).
- [2] Chanson, H., Brattberg, T. (2000). "Experimental study of the air-water shear flow in a hydraulic jump". *International Journal of Multiphase Flow*, 26(4), 583-607.
- [3] FLOW-3D (2011). Flow Science, Inc. FLOW 3D. Theory v10.0.
- [4] Hirt, C. W., Nichols, B. D. (1981). "Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries". *Journal of Computational Physics*, 39, 201-225.
- [5] Hirt, C. H., Sicilian, J. M. (1985). "A porosity technique for the definition of obstacles in rectangular cell meshes". *Proceedings 4th International Conference on Numerical Ship Hydrodynamics*. Washington, D.C.: National Academy of Science.
- [6] Ohtsu, I.O., Yasuda, Y., Awazu, S. (1990). "Free and submerged hydraulic jumps in rectangular channels". *Nihon University, Japan. Report of Research Inst. of Science and Technology*, No. 35.