

Validación de herramientas CFD para el estudio de sobrevertido de presas

José María Carrillo Sánchez, Luis Gerardo Castillo Elsitdié
 Grupo de investigación Hidr@m - Ingeniería Hidráulica, Marítima y Medioambiental
 Escuela de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos y de Ingeniería de Minas
 Paseo Alfonso XIII, N° 52, 30203 Cartagena (España)
 Teléfono: 868071289
 E-mail: jose.carrillo@upct.es, luis.castillo@upct.es

Resumen. La disipación de energía en el sobrevertido de presas se produce principalmente por la aireación, difusión y turbulencia que no pueden ser estudiados adecuadamente con las metodologías tradicionales. Con el fin de comprender mejor el fenómeno observado en laboratorio se realiza un estudio complementario con programas de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD). Estos programas permiten simular la interacción entre diferentes fluidos como el fenómeno bifásico aire-agua que se origina en los aliviaderos de vertido libre. Para su calibración y validación se emplea una infraestructura diseñada para el estudio de chorros turbulentos y cuencos de disipación, ubicada en el Laboratorio de Hidráulica de la Universidad Politécnica de Cartagena.

1. Introducción

El incremento en la magnitud de las avenidas de diseño por efecto del cambio climático ha generado la reevaluación de la capacidad de los aliviaderos y de los escenarios de operación de las grandes presas. Muchas de estos estudios han demostrado que la capacidad actual de los aliviaderos es inadecuada, surgiendo la posibilidad de que las presas puedan llegar a desbordarse durante los eventos extremos.

Como una primera aproximación, el sobrevertido de una presa se puede analizar como el paso del flujo sobre un vertedero de cresta ancha en descarga libre [8].

La disipación de energía del chorro de vertido libre se puede dividir en cuatro fases: disgregación del chorro en el vuelo (aireación más atomización), arrastre de aire cuando el chorro entra en el cuenco, difusión en el cuenco e impacto contra la solera y resalto hidráulico.

2. Infraestructura

El Laboratorio de Hidráulica de la Universidad Politécnica de Cartagena cuenta con una infraestructura diseñada para el estudio de chorros turbulentos y disipación de energía en aliviaderos de vertido libre.

El dispositivo consiste en un cajón móvil que permite variar el caudal así como la altura de vertido entre 1.70 y 4.00 metros. Aguas abajo se dispone de un cuenco fijo de disipación de energía construido en metacrilato, donde se pueden disponer diferentes profundidades de colchón de agua.

Se están realizando campañas de medición de velocidades, presiones y aireación para avanzar en el conocimiento de los fenómenos que se producen dentro del cuenco de amortiguación.

3. Instrumentación

Para este trabajo se ha empleado un equipo de fibra óptica de la casa RBI.

El principio de funcionamiento se basa en la medición de las condiciones de reflectividad en un prisma de Descartes cuando un haz de luz infrarroja pasa de un medio a otro. La luz reflejada es convertida en señal de voltaje mediante un fotodiodo, con un tiempo de respuesta inferior a 5 μ s.

La intensidad de la luz reflejada depende de la geometría de la sonda, del índice de reflectividad del fluido que rodea la parte sensible del sensor η ($\eta_{agua} = 1.33$, $\eta_{aire} = 1.00$) y del índice de reflectividad del material de la sonda, $\eta_{sonda} = 1.42$ [7], los cuales están relacionados mediante la fórmula de Fresnel:

$$reflectividad = K \left(\frac{\eta_{fluido} - \eta_{sonda}}{\eta_{fluido} + \eta_{sonda}} \right)^2$$

La Figura 1 muestra la forma característica de una señal bruta en el equipo de fibra óptica y su digitalización mediante la definición de los umbrales de corte de las fases líquida y gaseosa.

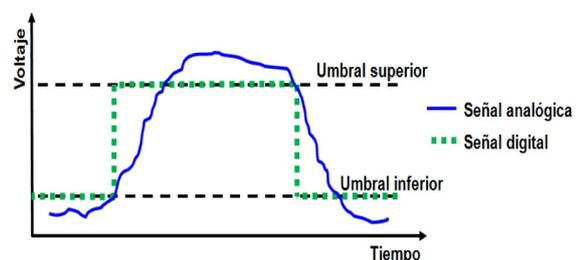


Fig. 1. Señal analógica y digital de un equipo de fibra óptica en flujo bifásico.

Para la medición de la velocidad, se emplea una sonda de dos puntas de zafiro que trabajan de modo independiente. La señal obtenida por la segunda

punta se encuentra retrasada un tiempo t . Mediante correlación cruzada se obtiene una curva de probabilidad de coincidencia de las dos señales, determinándose la diferencia de tiempo para el mayor coeficiente de correlación entre las dos series. Conocida la distancia entre las puntas, se obtiene la velocidad promedio del flujo.

3. Modelación numérica

Para la resolución numérica se han escogido dos paquetes comerciales de CFD (ANSYS CFX versión 12.1 y FLOW-3D versión 10.0).

El dominio fluido del área de estudio queda dividido en volúmenes de control, resolviéndose numéricamente las ecuaciones de Navier-Stokes y promediado de Reynolds que rigen el fenómeno. Para resolver el problema de clausura se han emplean modelos de turbulencia de dos ecuaciones.

Para la simulación del fenómeno bifásico aire-agua presente en los chorros turbulentos, se escogió el modelo homogéneo en ANSYS CFX, mientras que en FLOW-3D se escogió la opción de un fluido, junto a modelos físicos relacionados con la aireación y esponjamiento de la frontera aire-agua.

4. Resultados y discusión

La Figura 2 muestra la lámina libre obtenida con un caudal específico de $0.0233 \text{ m}^2/\text{s}$ una vez se han alcanzado las condiciones permanentes. En ANSYS CFX se ha empleado un tamaño de mallado de 0.01 m , mientras que en FLOW-3D se han considerando dos tamaños diferentes (0.005 m y 0.003 m). Se observa que FLOW-3D mejora la simulación de la lámina libre al disminuir el tamaño de los elementos de la malla. Sin embargo, esta disminución aumenta el esfuerzo computacional y el tiempo requerido. De este modo, frente a las 2.0 horas que se requieren en ANSYS CFX para resolver un transitorio de 5 segundos de la lámina vertiente, FLOW-3D requiere 5.5 horas empleando un mallado de 0.005 m y 7.3 horas considerando un mallado de 0.003 m , paralelizando el cálculo en 8 núcleos.

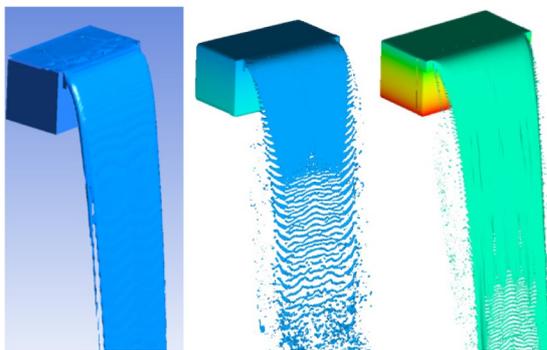


Fig. 2. Lámina libre: a) ANSYS CFX, b) FLOW 3D mallado de 0.005 m , c) FLOW 3D mallado de 0.003 m

La Figura 3 muestra las velocidades obtenidas sobre una línea de corriente. ANSYS CFX sigue la evolución de las velocidades obtenidas con el equipo de fibra óptica. Por su parte, FLOW-3D obtiene

velocidades ligeramente superiores a la velocidad teórica de caída libre, $V = \sqrt{2gz}$, siendo z la distancia de caída. Los errores de truncamiento se disparan en FLOW-3D con el mallado de 0.005 m cuando se produce la rotura del chorro, imposibilitando realizar cualquier comparación con un experimento físico.

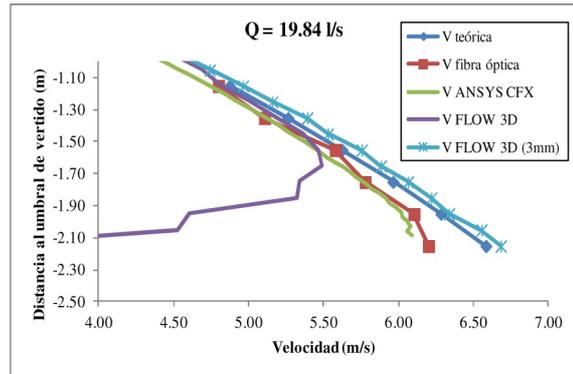


Fig. 3. Velocidad del flujo bifásico sobre una línea de corriente.

La Figura 4 muestra la fracción volumétrica de agua obtenida sobre una línea de corriente. ANSYS CFX sigue la forma observada con la fibra óptica, aunque considera que se produce una mayor entrada de aire en el chorro. Si bien, los resultados cualitativos son esperanzadores, las diferencias cuantitativas son significativas.

Por su parte, los modelos de entrada de aire que emplea FLOW-3D no reproducen la aireación. En las últimas versiones se han realizado cambios en los modelos de turbulencia de modo que los modelos de entrada de aire han dejado de ser independientes de la malla. Una de las prioridades de Flow Science Inc. es remodelar el código para evitar que este efecto indeseable ocurra.

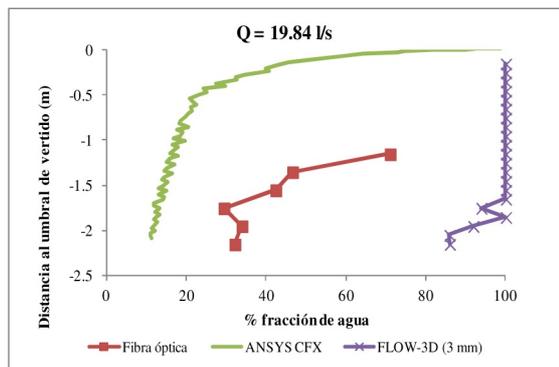


Fig. 4. Fracción volumétrica de agua en el flujo bifásico sobre una línea de corriente.

En el sobrevertido de presas se generan chorros que parten de una componente prácticamente horizontal en el punto de vertido y alcanzan el colchón de agua con una componente predominantemente vertical, por lo que el chorro en la fase de vuelo pasa por situaciones en que no está alineado con el mallado.

Debido a la problemática observada en FLOW-3D, se consideró conveniente valorar hasta qué punto influye la no alineación del chorro con el mallado en el esquema de diferencias finitas.

El chorro queda bien definido por los nodos situados en la línea horizontal o vertical cuando se encuentra orientado con la malla (Fig. 5). Sin embargo, en un chorro oblicuo se emplean elementos fuera de la diagonal, por lo que requiere un mayor espesor para obtener unos resultados similares en el eje del chorro.

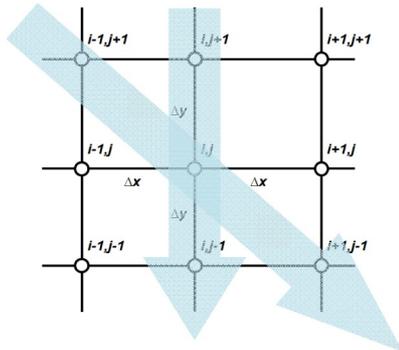


Fig. 5. Esquema de diferencias finitas empleado en FLOW-3D

La Figura 6 muestra los resultados obtenidos en FLOW-3D considerando un mismo chorro con dos orientaciones distintas de la velocidad inicial y del vector gravedad (una orientada con la malla y otra con incidencia oblicua).

Cuando el chorro está alineado con la malla, se produce una distribución adecuada de caída libre sin que se produzca su rotura pese alcanzarse espesores similares a dos veces el tamaño de la malla en la parte inferior del gráfico. Cuando la incidencia es oblicua, se observan perturbaciones que comienzan aproximadamente a 1 m de iniciarse la caída, produciéndose la rotura del chorro a una distancia de 1.35 m.

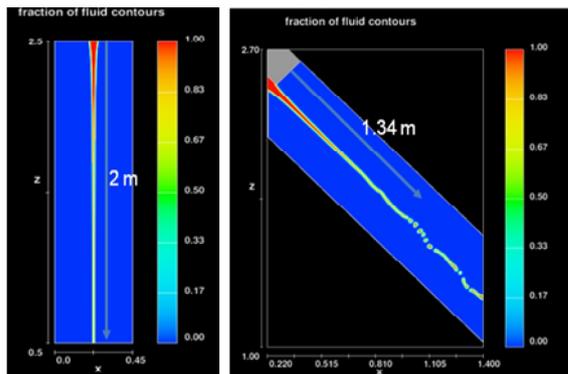


Fig. 6. Solución del chorro con diferentes orientaciones en FLOW-3D

5. Conclusiones

ANSYS CFX sigue la evolución de velocidades observada en el laboratorio. Sin embargo, considera que se produce una excesiva entrada de aire en el modelo. Esto puede ser debido al empleo de un tamaño de mallado excesivamente grueso para capturar la entrada de aire.

Por su parte, FLOW-3D resuelve el chorro sin considerar entrada de aire. Esto genera que no exista disipación de energía por aireación y que los espesores calculados sean inferiores al no reproducir la zona emulsionada.

La reducción del tamaño del mallado retrasa la rotura del chorro, Sin embargo no resuelve el problema de la aireación.

Para que no se produzca la rotura de chorros oblicuos por fenómenos numéricos puede ser necesario emplear tamaños de mallado 5-6 veces menores que el espesor del chorro, lo que incrementa el coste computacional de las simulaciones.

Los programas de CFD son herramientas útiles que pueden contribuir al diseño de estructuras más seguras sin recurrir a costes prohibitivos. Sin embargo, el juicio ingenieril debe prevalecer y los resultados deben ser contrastados con modelos físicos y/o formulaciones empíricas.

En esta línea, es necesario realizar más estudios experimentales, tanto en modelos como en prototipos, caracterizando simultáneamente el fenómeno de aireación del chorro junto a medidas de presión, velocidades y tasas de aireación.

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] ANSYS CFX (2010). ANSYS CFX. Reference Guide. Release 13.0.
- [2] Boes, R., & Hager, W. H. (1998). Fiber-optical experimentation in two-phase cascade flow. Proc. Int. RCC Dams Seminar, K. HANSEN Editor, Denver, USA.
- [3] Carrillo, J.M., Castillo, L.G. (2011) Calibración de dos programas CFD. Aplicación a aliviaderos de vertido libre. V Jornada de Introducción a la Investigación de la UPCT, Cartagena, España.
- [4] Castillo, L.G. (2006) Aerated jets and pressure fluctuation in plunge pools. The 7th International Conference on Hydroscience and Engineering. September, Philadelphia, USA.
- [5] Castillo, L.G. & Carrillo, J.M. (2012) Caracterización del fenómeno de vertido libre frente a variación del índice de turbulencia inicial con metodología CFD. XXV Congreso Latinoamericano de Hidráulica. San José, Costa Rica.
- [6] FLOW-3D (2011). FLOW Science, Inc. FLOW 3D. Theory v10.0.
- [7] Stutz, B., Reboud, J.-L. (1997) Two-phase flow structure of sheet cavitation. Physics of Fluids, Vol. 9, No. 12.
- [8] Wahl, T. L., Frizell, K. H., & Cohen, E. A. (2008) Computing the Trajectory of Free Jets. Journal of Hydraulic Engineering, 134 (2), 256-260.