

Análisis del flujo turbulento y bifásico en un aliviadero de presa mediante simulación numérica tridimensional

José María Carrillo Sánchez, Luis G. Castillo Elsitdié
 Grupo I+D+i Hidr@m – www.upct.es/hidrom
 Ingeniería Hidráulica, Marítima y Medio ambiental, UPCT
 Paseo Alfonso XIII, 52, 50203 Cartagena (Murcia)
 E-mail: jose.carrillo@upct.es, luis.castillo@upct.es

Resumen. *Estudio del tránsito de flujos turbulentos sobre un aliviadero aplicando un modelo numérico tridimensional de dinámica de fluidos computacional (CFD) tipo Euleriano. Las simulaciones realizadas se validan con los datos experimentales obtenidos por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de EE.UU. (USACE).*

1 Introducción

Las leyes físicas que rigen el comportamiento de un problema de Mecánica de Fluidos están representadas por las ecuaciones de Navier-Stokes y de Reynolds (conservación de masa y momentum e intercambio turbulento del fluido) y constituyen un sistema de ecuaciones en derivadas parciales cuya solución se aborda con diversas técnicas numéricas.

Desde hace algún tiempo se vienen realizando diversos programas para resolver algunos tipos específicos de problemas de Mecánica de Fluidos. A mediados de los años setenta, la complejidad matemática requerida para generalizar los algoritmos comenzaron a ser abordados de forma eficiente y se desarrollaron herramientas de solución generales denominados genéricamente *Computational Fluid Dynamics* (CFD).

Los primeros paquetes de solución comenzaron a aparecer en los años 80, pero requerían gran potencia computacional, profundo conocimiento de dinámica de fluidos y elevados valores de intervalo de paso temporal y espacial en las simulaciones, por lo que CFD era una herramienta usada casi exclusivamente en la investigación. En la actualidad, la mayoría de códigos CFD tienen la posibilidad de realizar los cálculos en paralelo con el fin de resolver los problemas en menor tiempo, dividiendo así los cálculos y la memoria necesaria entre varios equipos. Los recientes avances en la potencia de los ordenadores, junto con la manipulación de modelos con gráficos 3D interactivos, han hecho que el proceso de crear un modelo en CFD y analizar sus resultados, sea mucho menos laborioso y a un menor coste. Así, los diversos programas de solución avanzados contienen algoritmos que permiten obtener soluciones robustas del campo del flujo en un tiempo razonable.

Teniendo en cuenta que la relación coste-rendimiento de los ordenadores ha aumentado espectacularmente en la última década, y parece que la tendencia se mantendrá, la solución de los problemas de Mecánica de Fluidos mediante CFD será cada vez más usual y por tanto, constituye una herramienta clave en el futuro inmediato.

Así, la metodología CFD ofrece la posibilidad 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 al uso. Si la metodología se aplica adecuadamente, será capaz de superar muchas de las tradicionales dificultades que encuentran los modelos físicos, registrando fenómenos del flujo en regiones inaccesibles a los aparatos de medición, debido a las perturbaciones ocasionadas por el aparato y/o a las condiciones experimentales.

En todo caso la metodología CFD siempre requerirá la calibración y contraste con información disponible de prototipos y/o modelos reducidos, aunque como es obvio, constituye una herramienta muy potente que junto a las técnicas clásicas de modelación física, ayudarán a complementar el conocimiento del comportamiento del flujo en las diferentes estructuras hidráulicas (Castillo y Pérez, 2009).

En este artículo, la metodología CFD se aplica a la investigación del flujo turbulento vertido sobre una estructura de aliviadero tipo de cresta ancha.

2 Aplicación Numérica

Las simulaciones se realizaron mediante el software comercial ANSYS CFX (2006), para lo cual previamente hubo que realizar el mallado del dominio fluido agua-aire en el que se esperaba encontrar la solución (Carrillo, 2009). La resolución numérica por Elementos Finitos del sistema de ecuaciones diferenciales que rigen el fenómeno se realiza en los volúmenes de control definidos por el mallado del dominio fluido, de tal manera que la cantidad de referencia (masa, momentum, energía) se conserva en las tres direcciones para cada volumen de control identificado.

3 Modelos de Turbulencia

Para el caso de flujos complejos, la resolución de las fluctuaciones instantáneas dentro de flujos turbulentos no es viable. Los métodos implementados en CFD se basan en la solución numérica de las ecuaciones de Navier-Stokes y promediado de

Reynolds (*RANS*), junto con modelos de turbulencia de distintos grados de complejidad, que van desde los modelos algebraicos de vorticidad para la viscosidad, hasta los modelos de tensión de Reynolds.

En los modelos de vorticidad, como por ejemplo los modelos clásicos $k-\varepsilon$, *RNG* $k-\varepsilon$ o $k-\omega$, las tensiones de Reynolds se relacionan linealmente con el gradiente de velocidad media, de modo similar a la relación que existe entre las fuerzas y tensiones de los tensores de los flujos laminares newtonianos.

En el modelo de turbulencia de tensiones de Reynolds (*RSM*), no se considera la hipótesis de disipación de la viscosidad. En cambio, se define una ecuación de transporte para cada componente del tensor de tensiones de Reynolds. Este modelo proporciona conceptualmente una representación más acertada de las características de la turbulencia, tales como la anisotropía y el efecto de tensiones adicionales, pero es computacionalmente muy ineficiente y dificulta la convergencia en situaciones complejas (Bürgisser y Rutschmann, 1999; Bouhadji, 2004).

El modelo $k-\varepsilon$, que requiere un esfuerzo computacional mucho menor, sigue siendo uno de los métodos de turbulencia más utilizados para la solución de los flujos en la práctica ingenieril. Sin embargo, existen situaciones complejas en las que, aunque el modelo $k-\varepsilon$ reproduce cualitativamente las características importantes del flujo, sus resultados no son totalmente satisfactorios, en particular relacionadas con las zonas de separación del flujo (Bhajantri et al. 2003).

En este trabajo se ha usado el modelo de turbulencia "Shear Stress Transport" (SST), basado en el modelo de turbulencia $k-\varepsilon$. Este modelo está diseñado para asegurar una predicción exacta de la separación del flujo sometido a gradientes de presión adversos. Todas las paredes sólidas han sido tratadas con la función de pared rugosa (Carrillo, 2009).

4 El modelo multifásico

CFX establece dos tipos de modelos multifásicos para simular tramos con flujos múltiples, burbujas, gotas, partículas sólidas y la superficie libre del flujo: el modelo Euleriano multifásico y la función multifásica de Lagrange de transporte de partículas. El modelo Euleriano multifásico tiene dos submodelos: el modelo homogéneo y el modelo de transferencia interfluido o modelo inhomogéneo. Considera que los fluidos interactúan a través de términos de transferencia en la interfase, existiendo un campo de solución para cada fase por separado.

El modelo homogéneo, que se ha utilizado en este estudio, puede considerarse como un caso límite del modelo de flujo multifásico Euleriano, en el que la tasa de transferencia en la interfase es muy grande. Esto origina que todos los fluidos comparten un campo de flujo común, manteniéndose válido en los flujos por gravedad cuando las fases están completamente estratificadas, como es el caso de un flujo en lámina libre en el que la interfaz está bien definida. En este caso, las fracciones volumétricas de las fases

son igual a uno o cero en todas partes, excepto en la fase de frontera, y de este modo puede emplearse un único campo de velocidades.

5 Resultados

Para comprobar la capacidad de ANSYS CFX, se modeló un aliviadero de dos vanos con forma estándar de perfil de vertedero tipo WES, definido por el *U. S. Army Engineer Waterways Experimental Station* (figura 1), y una pila central tipo II. La modelación se realizó teniendo en cuenta la altura de diseño $H_d = 4$ m, que define el perfil del aliviadero.

En la figura 2 se puede apreciar la diferente resolución de la malla empleada en la modelación del aliviadero. Para la obtención de unos mejores resultados en el cálculo de la lámina libre, se refinó la malla en sucesivas iteraciones en la zona en la que se sitúa la lámina libre de agua.

En las figuras 3 y 4 puede apreciarse el resultado de la lámina libre obtenida a su paso por el aliviadero y el efecto de las pilas en el mismo (obsérvese la zona de expansión del flujo tras la pila).

La figura 5 muestra el resultado de la fracción volumétrica del agua a su paso por uno de los vanos del aliviadero. El color rojo corresponde a una fracción de volumen de agua igual a 1 (agua), mientras que el color azul corresponde a una fracción de volumen de agua igual a 0 (aire). La interfaz aire/agua queda bien definida, apreciándose la evolución del calado (mayor altura en la parte central del vano).

Finalmente, la figura 6 muestra la comparativa, en el centro del vano, entre los resultados obtenidos mediante ANSYS CFX y los valores experimentales del USACE (observar el perfecto acuerdo).

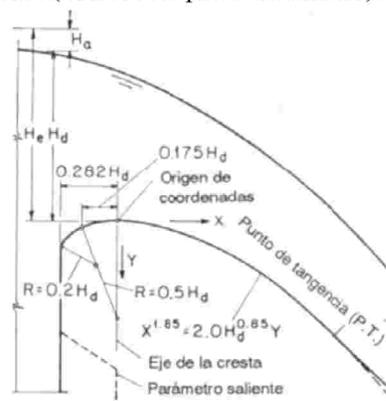


Figura 1. Forma estándar de vertederos WES. *U. S. Army Engineer Waterways Experimental Station*. (Ven Te Chow, 1998).

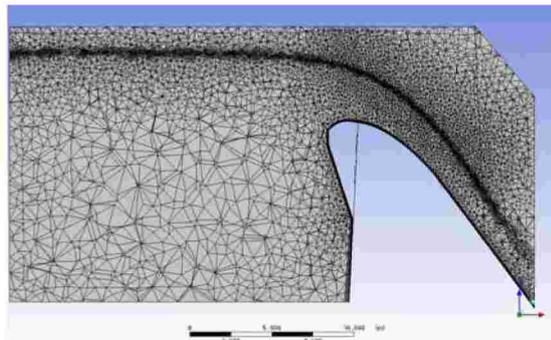


Figura 2. Adaptación del mallado a la zona de lámina libre.

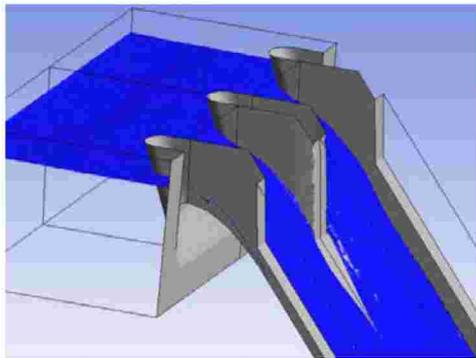
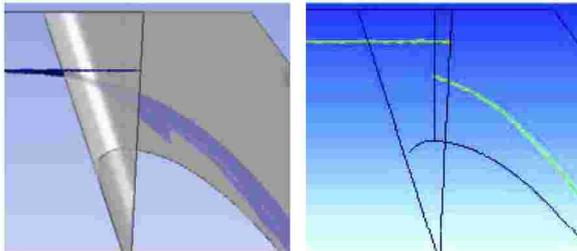


Figura 3. Detalles de la lámina libre en la entrada del aliviadero, para Nivel Máximo Normal del embalse ($H_d=4$ m).



a) b)
Figura 4. Detalles de la lámina libre en la entrada del aliviadero, para altura de diseño H_d . Figura 4a) vista lateral de la lámina libre tridimensional. Figura 4b) contacto de la lámina libre con la pared que conforma la pila del aliviadero.

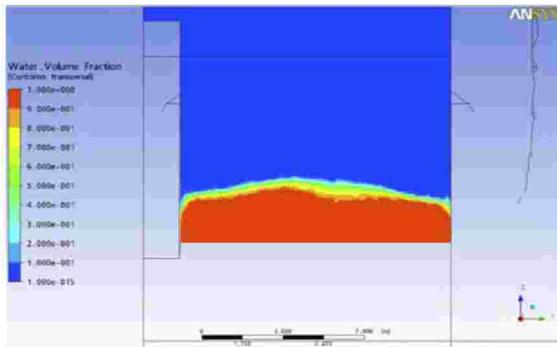


Figura 5. Curvatura de la fracción volumétrica del agua en el canal de descarga (capa de lámina libre).

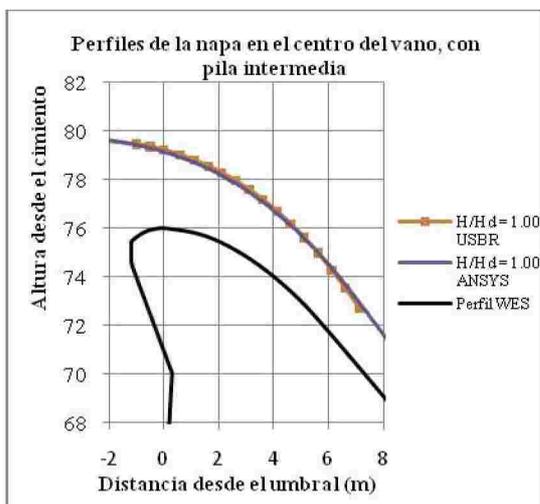


Figura 6. Comparación de resultados obtenidos en el centro del vano del aliviadero. Nivel Máximo Normal de embalse ($H_d=4$ m).

6 Conclusiones

Los resultados numéricos que se obtuvieron mediante ANSYS CFD, en el centro del vano de un aliviadero

tipo, se aproximan muy bien a los obtenidos experimentalmente por el Cuerpo de Ingenieros de EE.UU. Las simulaciones demuestran el gran potencial que presenta la metodología CFD para proporcionar resultados fiables al reproducir el flujo en proyectos de aliviaderos de presas.

Esta metodología se está aplicando actualmente al estudio de los chorros turbulentos y bifásicos agua-aire (vertido libre por coronación de presas). La medición de diferentes variables en una infraestructura construida para el efecto en el laboratorio de ingeniería hidráulica de la UPCT: aireación (equipo de fibra óptica), presiones (transductores piezorresistivos) y velocidades (equipo Doppler), a distintas alturas de vuelo del chorro, diferentes puntos en el fondo y diferentes alturas de colchón de agua en el cuenco de disipación de energía, nos permitirá validar el programa, así como también verificar y calibrar los distintos parámetros e índices turbulentos de este tipo de estructuras hidráulicas (Castillo, 2008; Castillo y Pérez, 2009).

Referencias

- [1] American Society of Civil Engineers (1995). *Hydraulic design of spillways*. Ed. ASCE.
- [2] ANSYS CFX (2006). *ANSYS CFX. Reference Guide*. Release 11.0.
- [3] Bhajantri, M.R.; Eldho, T.I.; Deolalikar, P.B. (2006). *Hydrodynamic modelling of flow over a spillway using a two-dimensional finite volume-based numerical model*. Sādhanā Vol. 31, Part 6, December, pp. 743-754.
- [4] Bouhadji, L. (2004). *Three dimensional Numerical Simulation of Turbulent Flow Over Spillway*. ASL-AQFlow Inc., Sidney, British Columbia, Canada.
- [5] Bürgisser, M.F.; Rutschmann, P. (1999) *Numerical solution of viscous 2D free surface flows; flow over spillway crests*. Proc., 28 th IAHR Congr. Technical universal Graz, Graz, Austria.
- [6] Carrillo Sánchez, J. M. (2009). *Evaluación de la seguridad hidrológico-hidráulica de la presa de Compuerto (T.M. de Velilla del río Carrión, Provincia de Palencia)*. Proyecto Fin de Carrera de Ingeniero de Caminos, C. y P., UPV.
- [7] Castillo, L. (2006). *Aerated jets and pressure fluctuations in plunge pools*. The 7th Int. Conf. on Hydroscience and Engineering (ICHE-2006). September, Philadelphia, USA.
- [8] Castillo, L. (2008). *Pressure characterization of undeveloped and developed jets in shallow and deep pool*. 32th Congress of IAHR, the International Association of Engineering & Research. Venice, Italy, July.
- [9] Castillo, L; Pérez, J. (2009). *Evaluación de las acciones hidrodinámicas a pie de presa por efecto del desbordamiento por coronación*. I Jornadas Ingeniería del Agua. Madrid, Octubre.
- [10] Ven Te Chow. (1998). *Hidráulica de canales abiertos*. Ed. McGraw Hill.