

Modelado matemático de flujo no aireado en aliviaderos escalonados mediante OpenFOAM

Arnau Bayón Barrachina, P. Amparo López Jiménez
*Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente
Universitat Politècnica de València. Camí de Vera, s/n. 46022. València (España)*

Jorge Matos
*Departamento de Engenharia Civil, Arquitectura e Georrecursos
Instituto Superior Técnico. Av. Rovisco Pais 1, 1049-001, Lisboa (Portugal)*

1. Introducción

La disipación de energía constituye uno de los aspectos cruciales del diseño de estructuras hidráulicas. De entre las opciones posibles, los aliviaderos escalonados han devenido una solución cada vez más frecuente durante las últimas décadas (Chanson, 2002). Si bien está documentada la existencia este tipo de estructuras desde hace siglos, en la mayoría de casos, su escalonamiento atendía a criterios estrictamente constructivos, no hidráulicos.

No fue hasta principios del s. XX cuando comenzaron a escalonarse los aliviaderos para mejorar su comportamiento hidráulico. La proliferación de estas estructuras ha sido posible gracias a las mejoras en la calidad de los materiales constructivos empleados, permitiendo que éstos resistan los esfuerzos propios de este tipo de diseños.

Así pues, los aliviaderos escalonados permiten una mayor disipación de energía respecto a sus homólogos de pared lisa. Los elementos de macrorrugosidad contribuyen a un desarrollo más rápido de la capa límite, que alcanza antes la superficie libre, favoreciendo así una mayor aireación del flujo. Ello redundará en una minimización de los riesgos de erosión por cavitación (Chanson, 2002, 2015; Frizell et al, 2015).

Es por ello que la caracterización del comportamiento de los aliviaderos escalonados ha despertado gran interés en las últimas décadas (Matos y Meireles, 2014). Las modelaciones realizadas se centran en el régimen de flujo rasante, la condición más común en la práctica, abordando aspectos como la distribución de aireación, los perfiles de velocidad y la distancia hasta el punto de la entrada de aire, el campo de presiones y la transferencia de gas a través de la superficie libre. Estos modelos han sido tanto de carácter experimental como numérico (Chamani y Rajaratnam, 1999, Sánchez-Juny et al., 2000, 2008; Chanson, 2002, 2009; André, 2004; Ohtsu et al., 2004; Meireles, 2011; Estrella et al., 2012).

No obstante, los patrones de flujo que se originan en este tipo de estructuras presentan una notable complejidad y su estudio no puede ser reducido a enfoques analíticos o modelos unidimensionales. Por ello, deviene necesaria una descripción más exhaustiva del flujo y el uso de modelos numéricos complejos se hace imprescindible para caracterizar con detalle los campos de velocidades, presiones y aspectos de turbulencia relacionados con el mismo. Así pues, existe una creciente cantidad de estudios numéricos, tanto empleando modelos de “Computational Fluid Dynamics”, o CFD (Qian et al., 2009), como de “Smoothed Particle Hydrodynamics”, o SPH (Husain et al., 2014).

A pesar de la profusión de estudios en este campo, pocos son los que analizan el flujo no aireado en aliviaderos escalonados, objeto de este estudio, por ejemplo, Bombardelli et al. (2011), Amador (2005), Amador et al. (2006), González y Chanson (2007), Carvalho y Amador (2008) o Meireles y Matos (2009). En ausencia de aireación, el aliviadero podría ser propenso a daños por cavitación, por lo que el interés en este campo es creciente (Chanson, 2002, 2015, Frizell et al., 2013, 2015).

En el presente trabajo se desarrolla un modelo CFD capaz de reproducir el comportamiento del flujo no aireado en aliviaderos escalonados mediante la plataforma de código abierto y libre acceso OpenFOAM. Para ello se emplea una malla multibloque estructurada adaptativa refinada en las zonas donde se esperan mayores gradientes.

Pese a que la zona donde mayor disipación de energía se suele producir se encuentra aguas abajo de la sección de afloramiento de la capa límite, el presente trabajo se centra en cuanto acontece aguas arriba de ésta. Una correcta descripción hidrodinámica del flujo no aireado es condición sine qua non para modelar fiablemente el conjunto de la estructura y condiciona significativamente la bondad de los resultados de las predicciones del comportamiento de la estructura en la zona emulsionada. A fin de validar el modelo numérico, se aplica a un caso de estudio del que se dispone de datos experimentales obtenidos en laboratorio, comparando principalmente velocidades y calados entre ambos modelos.

2. Modelo físico de aliviadero escalonado

Con objeto de validar el modelo numérico, se han utilizado datos experimentales provenientes de las instalaciones experimentales del Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) de Lisboa, Portugal (Matos, 1999; Meireles, 2004; Meireles et al., 2012).

Esta infraestructura consiste en un aliviadero escalonado de pendiente 0.75H:1V cuya cresta se halla a 2.90m sobre el cuenco de amortiguación, a cota 0.40m. La zona superior del aliviadero define un perfil WES con un tramo liso inmediatamente aguas abajo de la cresta, seguido por unos escalones cuyas dimensiones son variables a fin de adaptarse a dicho perfil. Aguas abajo de estos, a partir del punto tangente entre el perfil WES y la pendiente constante, los escalones alcanzan unas alturas y longitudes constantes, de 0.08m y 0.06m, respectivamente. El caudal del caso de estudio analizado es $0.18\text{m}^3/\text{s}$ y el ancho del modelo

es 1.00m. Por tanto, la descarga específica en el caso de estudio es de $0.18\text{m}^2/\text{s}$, lo que da lugar a un flujo deslizante sobre la recta que une los extremos de los escalones (pseudo-solera). Obsérvese la Fig. 1 para mayor detalle de la geometría del caso de estudio analizado.

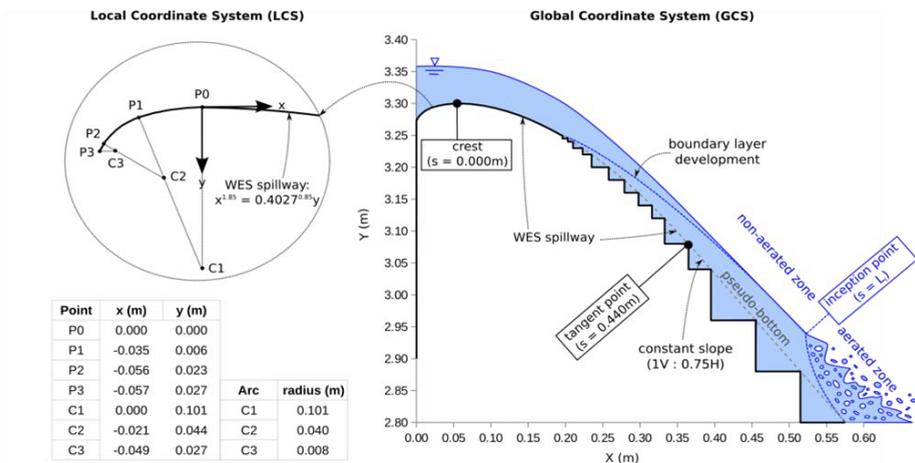


Figura 1. Geometría del caso de estudio con detalle de la cresta del aliviadero.

3. Modelo computacional con el código OPENFOAM

Al tratarse de un modelo CFD, es necesario discretizar el dominio geométrico que se pretende analizar mediante su mallado. De los diferentes tipos de malla, por las características del modelo, se opta por una malla multibloque estructurada adaptativa con un refinamiento de 1:8 (relación entre el mayor y el menor elemento de la malla). El empleo de mallas de estas características en este tipo de aplicaciones se desarrolla más extensamente en Bayón-Barrachina y López-Jiménez (2015).

Para la aproximación de las ecuaciones de Navier-Stokes en el modelo propuesto se emplea el algoritmo PIMPLE, que aúna las ventajas de los algoritmos SIMPLE y PISO. La turbulencia es modelada mediante el modelo RANS RNG $k-\varepsilon$ por su capacidad para reproducir fielmente este tipo de fenómenos (Bombardelli et al., 2011).

La coexistencia de dos fluidos, aire y agua, es tratada empleando un método inspirado en el VOF ("Volume Of Fluid"), propuesto por Hirt y Nichols (1981). Puesto que este tipo de enfoques no definen explícitamente una interfaz entre fluidos, se emplea un modelo basado en la adición de una velocidad de compresión de interfaces, con lo que se logra definir una superficie libre nítida, pese a las posibles imprecisiones fruto de fenómenos como la difusión numérica.

A pesar de que la aireación del flujo en la zona estudiada es prácticamente despreciable, a fin de evitar posibles problemas de convergencia de las simulaciones, se emplea un modelo

de aireación Euleriano, que tiene en cuenta los efectos de flotación, arrastre y sustentación. Por último, a fin de evitar tener que resolver las zonas próximas a los contornos sólidos del dominio analizado, donde grandes gradientes suelen producirse y, por tanto, sería preciso un gran refinamiento de la malla, se emplea una función de pared.

4. Caso de estudio: resultados de la modelación

El modelo es capaz de reproducir la física del fenómeno bajo estudio, incluyendo el cambio de régimen subcrítico a supercrítico sobre el vertedero y consiguiente la aparición del flujo deslizante (ver Fig. 2). Se observa también la aparición de torbellinos sobre los escalones, precisamente, bajo el flujo deslizante. Tras practicar un análisis de sensibilidad de malla, el tamaño mínimo de elemento en la zona escalonada con el que se obtienen mejores resultados es 1.6mm. Es por ello que todo análisis posterior se ha realizado con resultados obtenidos con dicho tamaño de malla.

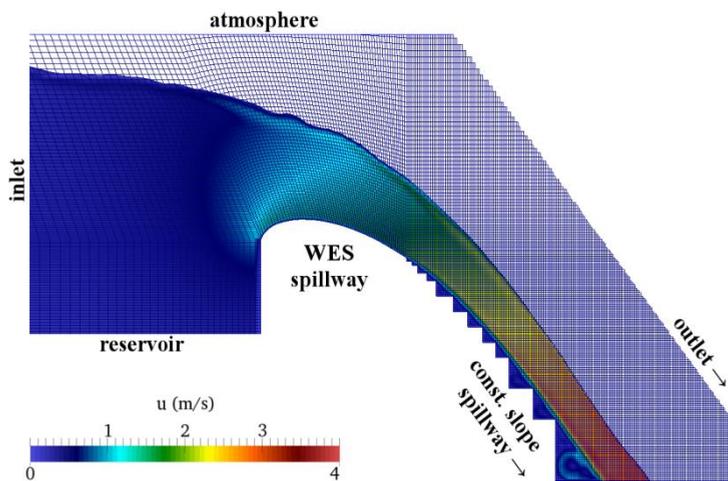


Figura 2. Campo instantáneo de velocidades en la zona de transición entre regímenes.

Pasando al análisis cuantitativo de los resultados, se han obtenido los calados y los perfiles de velocidad en perpendicular a la pseudo-solera sobre la cresta del aliviadero ($L=0,00m$) y sobre las aristas de 12 escalones no equidistantes, hasta el punto $L=1,54m$. Dichos datos son comparados con los obtenidos experimentalmente a fin de someter a juicio la precisión del modelo. Se observa en la Fig. 3 el buen ajuste obtenido en la estimación de calados a lo largo de la pseudo-solera, obteniéndose una precisión con respecto a los datos experimentales del 95.5%, lo que se corresponde con una media del error relativo del valor calculado respecto al experimental de 4.5%. El calado a lo largo de los aliviaderos de presas deviene crucial a fin de asegurar un correcto diseño de sus cajeros y prevenir así desbordamientos. Se ha observado que los resultados obtenidos mediante el modelo numérico no varían de forma

significativa y, por tanto, se considera que el modelo ha convergido, cuando los calados alcanzan un estado quasi-estacionario durante al menos 3s, como se puede ver en la Fig. 3.

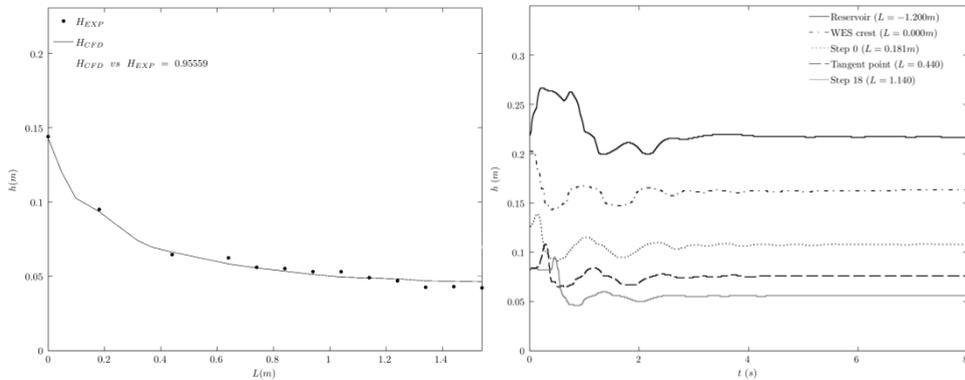


Figura 3. Izquierda: calado (H) en numérico (CFD) y experimental (EXP) sobre la pseudo-solera. Derecha: evolución temporal del calado en diferentes puntos del aliviadero.

Como se comenta anteriormente, aparte del análisis de los resultados a nivel macroscópico, se ha llevado a cabo un estudio de los perfiles de velocidad en 13 secciones del aliviadero. Dichos perfiles son adimensionalizados respecto a la velocidad máxima en la sección (U_{max}) y el espesor de la capa límite (δ), determinado según la altura a la que la velocidad del flujo es del 99% de U_{max} . En la Fig. 4 puede observarse el resultado, destacando una cierta auto-similaridad de los perfiles obtenidos numéricos y experimentales. No obstante ambas nubes de puntos se agrupan alrededor de perfiles potenciales medios de diferente exponente (N) y, por tanto, curvatura, siendo $N=3.2$ en los datos experimentales y $N=11.2$ en los numéricos. El valor obtenido experimentalmente es además avalado por diferentes fuentes bibliográficas (Bombardelli et al., 2011), por lo que es más plausible que el modelo numérico no esté reproduciendo bien los perfiles de velocidad, hecho que actualmente está siendo estudiado y remediado.

Se ha realizado también una estimación del punto de afloramiento de la capa límite, como se describe en la Fig. 1. Dicha estimación se ha realizado a partir de la extrapolación de los calados y los espesores de capa límite según diferentes ajustes llevados a cabo mediante mínimos cuadrados. La comparación de la distancia de la cresta al punto de afloramiento de la capa límite con la estimada por Chanson (2002) arroja un ajuste del 89.3% (error relativo medio de 10.7%), tendiendo el modelo numérico a sobreestimar dicho valor, como se muestra en la Fig. 4. Este hecho está sin duda relacionado con las diferencias de curvatura de los perfiles de velocidad obtenidos con el modelo numérico respecto a los datos experimentales.

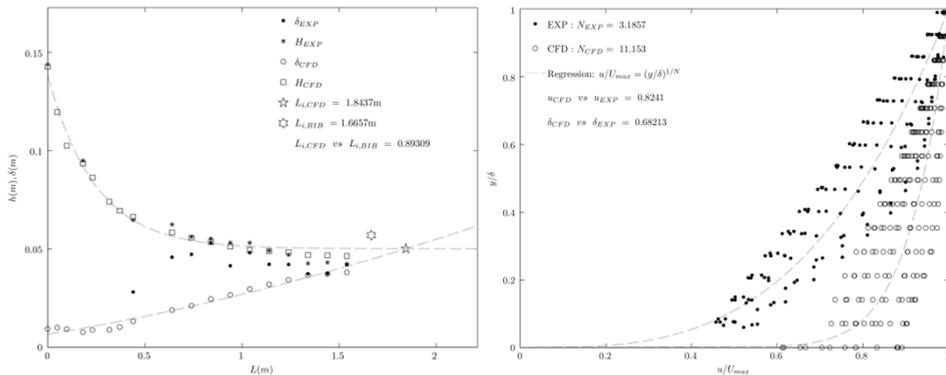


Figura 4. Izquierda: calado (H) y el espesor de capa límite (δ) en numérico (CFD) y experimental (EXP) y afloramiento de la capa límite (L_a) en numérico (CFD) y bibliografía (BIB), Chanson (2002). Derecha: perfiles de velocidad adimensionalizados numéricos (CFD) y experimentales (EXP).

5. Conclusiones

La presente comunicación describe un modelo numérico del fenómeno del flujo no aireado en aliviaderos escalonados. El análisis de resultados demuestra que la predicción de calados a lo largo del aliviadero llevada a cabo por el modelo es muy exacta. A excepción de algunos puntos próximos a la sección de afloramiento de la capa límite, los errores relativos en la predicción de calados nunca superan el 5%, comparados con los resultados experimentales.

Los perfiles de velocidad en diferentes secciones también son calculados y comparados con datos experimentales. En este caso el modelo se comporta bien y es capaz de hacer ciertas predicciones cuantitativas, tales como el punto de afloramiento de la capa límite, con relativa exactitud. Sin embargo, ciertas variables aún no son calculadas con toda la precisión deseable. Principalmente, la forma de los perfiles de velocidad no se ajusta a la determinada experimentalmente y avalada por la bibliografía.

Las causas de dicho fenómeno están siendo analizadas y corregidas mediante calibración del modelo. Queda por tanto como desarrollo futuro el estudio del efecto sobre la precisión de los resultados de parámetros como el modelo de turbulencia empleado, el uso o no de función de pared, etc.

Agradecimientos

Esta investigación se ha desarrollado gracias al programa VALi+D de la Generalitat Valenciana, incluyendo la financiación de una estancia académica de Arnau Bayón Barrachina en el Departamento de Engenharia Civil, Arquitectura e Georrecursos del Instituto Superior Técnico (Lisboa, Portugal) en 2015.

Referencias

Amador A. (2005) Comportamiento Hidráulico de los Aliviaderos Escalonados en Presas de Hormigón Compactado. PhD Thesis, UPC, Barcelona, Spain.

Amador, A., Sánchez-Juny M. y Dolz J. (2006) Characterization of the non-aerated flow region in a stepped spillway by PIV. J. Fluid. Eng. ASME 138(6):1266-1273.

André, S. (2004) High velocity aerated flows over stepped chutes with macro-roughness elements. Ph.D. thesis, EPFL, Lausanne, Switzerland.

Bayón-Barrachina, A. y López-Jiménez, P.A. (2015) Numerical analysis of hydraulic jumps using OpenFOAM, J. of Hydroinformatics, 17 (4), 662-678.

Bombardelli, F. A.; Meireles, I. y Matos, J. (2011) Laboratory measurements and multi-block numerical simulations of the mean flow and turbulence in the non-aerated skimming flow region of steep stepped spillways, Env. Fluid Mechanics, 11 (3), 263-288.

Carvalho R. y Amador, A. (2008) Physical and numerical investigation of the skimming flow over a stepped spillway. 3rd IAHR Int. Symp. on Hydraulic Structures, China, 1767-1772.

Chamani M.R. y Rajaratnam N. (1999) Characteristics of skimming flow over stepped spillways. J. Hydraul. Eng. ASCE 125 (4), 361-368.

Chanson, H. (2002) The hydraulics of stepped chutes and spillways. Balkema, Lisse.

Chanson, H. (2009) Turbulent air-water flows in hydraulic structures: dynamic similarity and scale effects, Env. Fluid Mechanics, 9 (2), 125-142.

Chanson, H. (2015) Discussion of “Cavitation Potential of Flow on Stepped Spillways” por K. Warren Frizell, Floriana M. Renna y Jorge Matos. J. Hydraul. Eng., 141 (5), 07014025.

Estrella, S., Sánchez-Juny, M., Dolz, J., Ibañez, R., Domínguez, M., Balairon y L. y López, D. (2012) Velocity and Air Concentration in Air-Water Flow: Application on a Stepped Spillway Without Sidewalls. Matos, J., Pagliara, S. y Meireles, I. (Eds) Preprints of the 4th IAHR Int. Symp. Hydraulic Structures, Porto, February 9-11, 2012.

Frizell, K. W., Renna, F. M. y Matos, J. (2013) Cavitation potential of flow on stepped spillways, J. Hydraul. Eng. 139 (6) 630-636.

Frizell, K.W., Renna, F.M. y Matos, J. (2015) Closure to “Cavitation Potential of Flow on Stepped Spillways”. J. Hydraulic Eng., 141 (8), 07015009.

Gonzalez C. y Chanson H. (2007) Hydraulic design of stepped spillways and downstream energy dissipators for embankment dams. *Dam Eng.* XVII (4), 223-244.

Hirt, C. y Nichols, B. (1981) Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries, *J. of Computational Physics*, 39 (1), 201-225.

Husain, S. M., Muhammed, J. R., Karunaratna, H. U. y Reeve, D.E. (2014) Investigation of pressure variations over stepped spillways using SPH, *Adv. in Water Resources*, 66, 52-69.

Matos, J. (1999) Emulsionamento de Ar e Dissipação de Energia do Escoamento em Descarregadores em Degraus, PhD Theses, IST, Portugal.

Matos, J. y Meireles, I. (2014) Hydraulics of Stepped Weirs and Dam Spillways: Engineering Challenges, Labyrinths of Research. Chanson, H. y Toombes, L. 5th IAHR International Symposium on Hydraulic Structures, Australia, 1-30

Meireles, I. (2004) Caracterização do Escoamento Deslizante sobre Turbilhões e Energia Específica Residual em Descarregadores de Cheias em Degraus. M.Sc. thesis, IST, Portugal.

Meireles I. y Matos J. (2009) Skimming flow in the non-aerated region of stepped spillways over embankment dams. *J. Hydraul. Eng.* ASCE 135 (8), 685-689.

Meireles, I. (2011) Hydraulics of Stepped Chutes: Experimental-numerical-theoretical Study, Ph.D. thesis, Universidade of Aveiro, Aveiro, Portugal.

Meireles, I., Renna, F., Matos, J. y Bombardelli, F.A. (2012) Skimming, Nonaerated Flow on Stepped Spillways over RCC Dams. *J. of Hydraul. Eng.*, 138 (10), 870-877.

Ohtsu, I., Yasuda Y. y Takahashi, M. (2004) Flow characteristics of skimming flows in stepped channels. *J. Hydraul. Eng.*, ASCE 130(9):860-869.

Qian, Z., Hu, X., Huai, W. y Amador, A. (2009) Numerical simulation and analysis of water flow over stepped spillways. *Sci China Ser E-Tech Sci* 52, 1958-1965.

Sánchez-Juny, M., Matos, J., Pomares, J., Dolz, J. y Quintela, A. (2000) Presiones negativas sobre los peldaños de un aliviadero escalonado, y su relación con la aireación del flujo. XIX Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Córdoba (Argentina).

Sánchez-Juny, M., Bladé, E. y Dolz, J. (2008) Analysis of pressures on a stepped spillway, *J. Hydr. Res.* 46(3), 410-414.