

Caracterización de curvas de gasto en desagües profundos de presas mediante modelado CFD

Characterization of rating curves in dam bottom outlets using CFD modeling

(Recepción 31/01/2018; Aceptación 09/05/2018)

Bayón, A.¹; Macián-Pérez, J.F.¹; Río, F.², Conesa, F. J.², & García-lorenzana, D.²

¹Instituto de Ing. del Agua y Medio Ambiente (IIAMA), Universitat Politècnica de València (España).

²Endesa Generación S.A.

Teléfono: (+34) 96 3877613

Email: arbabar@iiama.upv.es

Resumen. El flujo en desagües profundos de presas constituye un fenómeno complejo debido a sus grandes dimensiones, así como a las dramáticas consecuencias de un eventual fallo. Se presenta una metodología numérica para caracterizar las curvas de gasto de este tipo de estructuras según la posición de sus elementos de regulación. Para ello, se desarrolla un modelo CFD empleando un modelo de turbulencia RANS $k-\epsilon$ RNG y un método VOF para tratar la presencia de aire. Los resultados muestran coherencia con la física del fenómeno, aunque no se ha llevado a cabo todavía una validación basada en observaciones de campo.

Palabras clave. CFD; k -epsilon; presa; RNG; VOF.

Abstract. The flow in dam bottom outlets constitutes a complex phenomenon due to its extraordinary dimensions and singularities, as well as to the dramatic consequences of an eventual failure. A numerical methodology is presented to characterize the rating curves of this kind of structures according to the position of their regulation devices. To this end, a CFD model is developed using a RANS $k-\epsilon$ RNG turbulence model and a VOF method to deal with the expectable presence of air. The results are physically coherent with the phenomenon, although a validation based on field observation has not been conducted yet.

Keywords. CFD; dam; k -epsilon; RNG, VOF.

1. Introducción

El estudio del comportamiento hidráulico del flujo aireado en desagües profundos de presas mediante modelado numérico tridimensional se ha llevado a cabo con anterioridad (Dargahi, 2011; Harrison et al., 2014; Shamsaei y Soleymanzadeh, 2006), aunque el número de trabajos en el área disponibles en la bibliografía técnica es relativamente escaso.

De los existentes, la mayoría emplean modelos CFD con cierre de turbulencia RANS $k-\epsilon$ basados en el método VOF implementados en códigos comerciales. No se tiene constancia de trabajos con códigos de libre acceso, salvo el presentado por este equipo en Bayón et al. (2017a) analizando los esfuerzos hidrodinámicos sobre los elementos de regulación (válvula y compuerta) de un desagüe de fondo.

En este contexto y dada la necesidad de predecir el correcto comportamiento hidráulico de estructuras tan críticas, cuyo fallo puede resultar catastrófico, se presenta una metodología basada en un modelo numérico cuyas principales diferencias con respecto a los trabajos previos son: a) se emplea software CFD de código abierto (OpenFOAM) y b) se emplea un enfoque RANS donde, en lugar de observar los estados transitorios entre diferentes escenarios, se somete a análisis una casuística muy extensa, pudiendo interpolarse las situaciones intermedias.

2. Materiales y métodos

2.1. Caso de estudio

El caso de estudio empleado es el desagüe de fondo de la Presa de Mequinenza, construida en la década de 1960 en Aragón (España). El escenario de operación considerado corresponde a un nivel de Embalse de Mequinenza de 80 m.s.n.m. y de 67 m.s.n.m del Embalse de Ribarroja, al que vierte el desagüe. Al ser la cota del desagüe de 60 m.s.n.m., la salida de este se halla sumergida.

El desagüe, de sección circular de diámetro variable entre 2 y 3 m y de 56 m de longitud, es regulado mediante una compuerta vertical y una válvula de mariposa, que cuentan con sendos conductos de aireación (1 y 2 respectivamente) aguas abajo de éstas para la rotura de carga cuando las bajas presiones dadas lo requieran (ver Fig. 1).

Seis posiciones de la compuerta (aperturas del 10, 20, 40, 60, 80 y 100%) y cinco de válvula (la apertura del 10% supone una sección de paso despreciable) son analizadas y sus resultados, empleados para ajustar las curvas de gasto del desagüe, i.e. caudal de agua vertido en función de la posición de la válvula y la compuerta. Adicionalmente, las curvas de demanda



de aire en función de éstas variables son presentadas y analizadas.

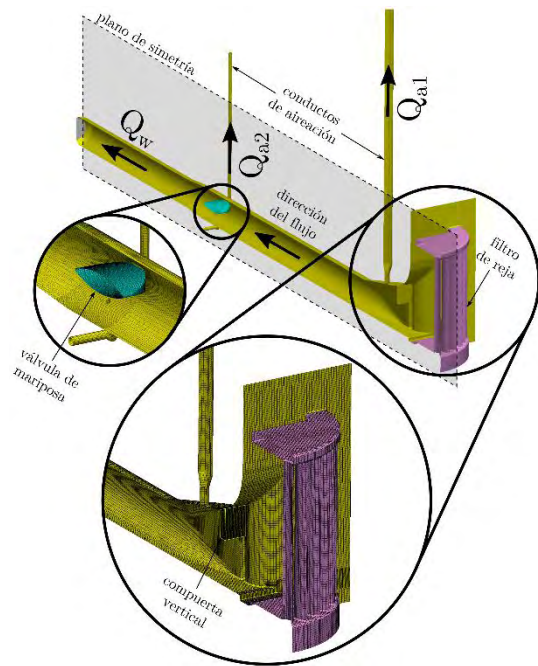


Figura 1. Sección de la geometría del desagüe con apertura de compuerta del 60% y de válvula del 100% (Bayón et al., 2017).

2.2. Modelo numérico

La discretización de la geometría del dominio analizado se lleva a cabo mediante una malla estructurada de elementos cúbicos con un refinamiento de relación 1/16 en las inmediaciones de las singularidades geométricas, donde son esperables mayores gradientes.

Tras llevar a cabo el correspondiente análisis de convergencia de malla según la metodología expuesta en Celik et al. (2008), se opta por una malla de $2.75 \cdot 10^6$ elementos (tamaño mínimo de 0.0234 m).

El modelo numérico se basa la aproximación de las Ecuaciones de Navier-Stokes con promediado RANS y cierre de turbulencia RNG k-ε, cuyos resultados en aplicaciones similares han dado buenos resultados (Bayón et al., 2016, 2017a; 2017b; Bombardelli et al., 2011; Dargahi, 2011). El algoritmo de resolución empleado es el PIMPLE, que combina las ventajas de los algoritmos PISO y SIMPLE, según su implementación en el solver interFoam de OpenFOAM (2011).

Al contemplarse la rotura de carga del flujo en el desagüe en ciertos escenarios de operación, un modelo con un solo fluido resulta insuficiente, por lo que se considera un segundo fluido mediante el método VOF, resolviendo ambas fases, aire y agua, como un sólo fluido bifásico donde la presencia de un fluido u otro viene dada por la variable de transporte advectivo fracción de fluido. A fin de mitigar los efectos de la difusividad numérica, se emplea un algoritmo de velocidad de compresión (OpenFOAM, 2011), obteniéndose así una interfaz aire-agua nítida.

En el modelo numérico planteado, se dan tres tipos de condiciones de contorno, a saber:

- Hidrostática: se aplica un perfil de presiones hidrostático a la entrada y salida del desagüe correspondiente a la columna de agua que descansa sobre cada uno de ellos.
- Atmosférica: se impone a las entradas de ambos conductos de aireación presión nula, permitiendo la salida de fluido y, en caso de presiones negativas, la entrada de aire.
- No deslizamiento: a los contornos sólidos, se les impone una condición de contorno de no deslizamiento con función de pared de alto número de Reynolds para evitar el excesivo refinamiento de la malla.

3. Análisis de resultados

3.1. Caudal de descarga

La Fig. 2 muestra el caudal de agua en función de la apertura de compuerta para diferentes aperturas de válvula, observándose que, no sólo los valores entran dentro del rango contemplado por el diseño de la infraestructura, sino que, además, muestran un patrón claro cuya tendencia es físicamente consistente.

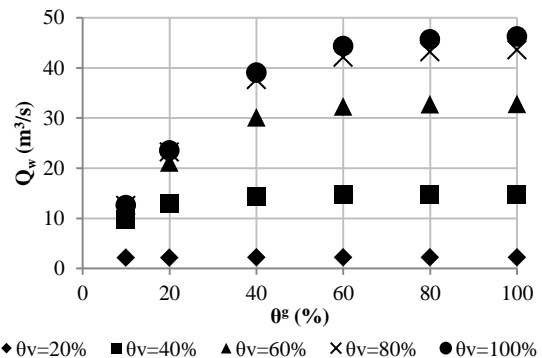


Figura 2. Caudal de agua (Q_w) en función de la apertura de válvula (θ_v) y compuerta (θ_g).

Mediante el ajuste estadístico de dichos resultados, se obtiene que la curva de gasto, que relaciona el caudal líquido vertido Q_w (m^3/s) con el grado de apertura de la compuerta θ_g (%) y la válvula θ_v (%), puede aproximarse por la Ecuación 1, con un coeficiente de determinación de $R^2 = 0.973$ (error medio absoluto inferior a $2 m^3/s$):

$$Q_w = a + b\theta_v + c\theta_v^2 + d\theta_g + e\theta_g^2 + f\theta_v\theta_g + g\theta_v^2\theta_g^2 \quad (1)$$

Los valores de las constantes de a a g pueden encontrarse en la Tabla 1. Otros ajustes probados, que incluían términos polinómicos de orden superior, logarítmicos, exponenciales y potenciales, arrojaban ajustes ligeramente superiores, pero la mejora del coeficiente de determinación no superaba en ningún caso el 1%, por lo que, en virtud del Principio de Parsimonia y en aras de mantener la solución matemáticamente más sencilla de entre las múltiples evaluadas, se opta por la expresión de la Ecuación 1.

Tabla 1. Resultados del ajuste estadístico de Q_w .

a	-6.00127	e	$-1.73563 \cdot 10^{-3}$
b	0.392273	f	$1.14538 \cdot 10^{-2}$
c	$-2.79298 \cdot 10^{-3}$	g	$-4.9508 \cdot 10^{-7}$
d	$-7.72619 \cdot 10^{-2}$		

Pese a que todavía no se dispone de datos de campo para la validación del modelo, esta expresión aporta una idea aproximada de cuál debe ser la posición de los elementos de regulación del desagüe para verter el caudal deseado durante su operación.

3.2. Demanda de aire

Adicionalmente, la Fig. 3 muestra la demanda de aire de ambos conductos de aireación, aguas abajo de la compuerta (1) y de la válvula (2).

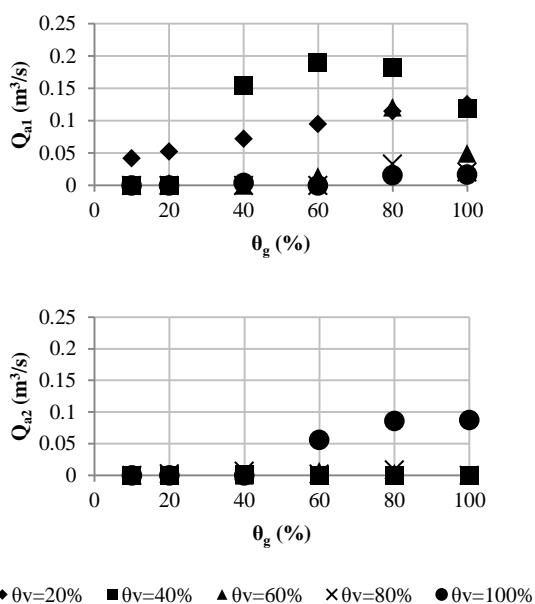


Figura 3. Caudal de aire en los conductos 1 y 2 (Q_{a1} – arriba y Q_{a2} – abajo, respectivamente) en función de la apertura de válvula (θ_v) y compuerta (θ_g).

La caracterización del caudal de aire en los conductos de aireación de presas es de gran importancia, pues documentos como la Guía Técnica de Seguridad de Presas del SPANCOLD establecen umbrales máximos, tanto de velocidad, como de pérdidas de carga a lo largo de su recorrido.

No obstante, a diferencia del caso de los caudales líquidos, las curvas de demanda de aire, que correlacionan el caudal de éste en los conductos de aireación 1 y 2 (Q_{a1} y Q_{a2} , respectivamente) con el grado de la compuerta (θ_g) y la válvula (θ_v), no parecen ajustarse a una ecuación global.

4. Conclusiones

El presente estudio desarrolla un modelo CFD tridimensional implementado en software de código abierto (OpenFOAM) para caracterizar las curvas de gasto de desagües profundos de presas. El ajuste de

caudales vertidos muestra un alto coeficiente de determinación ($R^2 = 0.973$), pese a que los resultados no han sido validados con observaciones de campo, tarea que constituye el trabajo futuro de esta investigación.

El mismo modelo numérico aporta datos relativos a la demanda de aire en los conductos de aireación del desagüe, pese a que estos no se ajustan a una única tendencia.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el proyecto “Análisis fluidodinámico del desagüe de fondo de la Presa de Mequinenza”, fruto de la colaboración entre la Universitat Politècnica de València y Endesa Generación S.A.

Referencias

Bayón, A., Valero, D., García-Bartual, R., Vallés-Morán, F.J., López-Jiménez, P.A. (2016). “Performance assessment of OpenFOAM and FLOW-3D in the numerical modeling of a low Reynolds number hydraulic jump”. *Environmental Modelling Software*. 80, 322–335.

Bayón, A., Macián-Pérez, J. F., Río, F., Conesa, F. J., y García-lorenzana, D. (2017a). “Modelado CFD del flujo aire-agua en un desagüe de fondo de presa”, *V Jornadas de Ingeniería del Agua, A Coruña*.

Bayón, A., Toro, J.P., Bombardelli, F.A., Matos, J. y López-Jiménez, P.A. (2017b). “Influence of VOF technique, turbulence model and discretization scheme on the numerical simulation of the non-aerated, skimming flow in stepped spillways”, *Journal of Hydro-environment Research* (in press).

Bombardelli, F.A., Meireles, I., 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”. *Environmental Fluid Mechanics*. 11, 263–288.

Celik, I. B., Ghia, U., Roache, P. J., Freitas, C. J., Coleman, H. & Raad, P. E. (2008), Procedure for Estimation and Reporting of Uncertainty Due to Discretization in CFD Applications. *Journal of Fluids Engineering*, 130(7), 1–4.

Dargahi, B. (2010). “Flow characteristics of bottom outlets with moving gates”. *Journal of Hydraulic Research*, 48(4), 476–482.

Harrison, S., Nielsen, K., Morse, D., y Chambers, J. (2013). “Computational Fluid Dynamics Modeling of the Pueblo Dam River Outlet Works”. *Pipelines 2013: Pipelines and Trenchless Construction and Renewals—A Global Perspective*, pp. 430-439.

OpenFOAM (2011). *OpenFOAM User Guide*. The Free Software Foundation Inc.

Shamsaei, A., y Soleymanzadeh, R. (2006). “Numerical simulation of air-water flow in bottom outlet”. *International Journal of Civil Engineering*, 4(1), 14–33.