

Diseño de jetbox para transición de flujo a presión a lámina libre con técnicas CFD

Design of jetbox for transition from pressurized flow to free surface using CFD modeling

(Recepción 05/03/2019; Aceptación 25/05/2019)

Bayón, A.; Vallés-Morán, F. J.

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

Teléfono: (+34) 96 3877613

Email: arbabar@iiama.upv.es

Resumen. El análisis hidráulico de los cuencos de amortiguación de presas requiere el empleo de modelos experimentales. Dado que no siempre es posible construir un aliviadero a escala respetando las leyes de semejanza, es habitual alimentar el dispositivo mediante una instalación a presión gracias a un jetbox o tobera que haga pasar el flujo a presión a lámina libre. Poca atención se presta al diseño de este dispositivo crucial, por lo que el presente trabajo plantea su diseño mediante un modelo CFD tridimensional con modelo RANS RNG $k-\epsilon$ para el tratamiento de la turbulencia. Los valores mínimos de determinadas dimensiones, como las longitudes de cada tramo o los coeficientes de expansión o contracción, para no introducir excesivo sesgo en el futuro modelo experimental son calculados y las repercusiones de estos parámetros en los resultados representados y analizados.

Palabras clave. CFD; RNG k -epsilon; jetbox; hidráulica.

Abstract. The hydraulic analysis of dam stilling basins requires employing experimental models. Given that building a scaled spillway respecting similarity laws is not always possible, it is common practice to supply the device using a pressurized facility thanks to a jetbox or nozzle that makes the pressurized flow become free surface. Little attention is paid to this crucial device design, so this work proposes its design using a three-dimensional CFD model with RANS RNG $k-\epsilon$ for turbulence modeling. The minimum values of certain dimensions, such as stretch lengths or expansion/contraction coefficients, to avoid introducing excessive bias in the future experimental model are computed and the consequences of these parameters on results are reported and discussed.

Keywords. CFD; RNG k -epsilon; jetbox; hydraulics.

1.Introducción

El estudio del funcionamiento de las presas despierta gran interés a día de hoy dadas las terribles consecuencias de su eventual fallo, como ocurrió en la Presa de Burmadinho (Brasil) en 2019 o en la Presa de Xe-Pian Xe-Namnoy (Laos) en 2018. A causa de la naturaleza altamente turbulenta y aireada del flujo en sus aliviaderos, especialmente, en condiciones de avenida, es habitual recurrir al modelado físico reducido para su análisis en laboratorio. No obstante, construir modelos que reproduzcan aliviaderos de grandes presas respetando el rango de escalas que imponen las leyes de semejanza no siempre es posible debido a su gran tamaño y, por ende, elevado coste. Por esa razón, si lo que se pretende es estudiar el flujo en el cuenco de disipación, se suele recurrir a la sustitución de parte del aliviadero por una instalación a presión donde una tobera aporta el caudal de descarga en las condiciones de calado y velocidad propias del aliviadero funcionando por gravedad.

Aparte de que la instalación tenga la potencia necesaria para suministrar el caudal y la presión necesarios, del diseño geométrico de dicha tobera, a

menudo referida como “jetbox”, dependerá la fiabilidad de la instalación. Por ejemplo, cambios de sección demasiado abruptos pueden causar despegues y recirculaciones internas que hagan que, ya en lámina libre, el flujo no tenga las propiedades esperables a pie de presa, redundando en un notable sesgo de los resultados experimentales. Si los cambios de sección se realizan de forma gradual, se evitará dicho problema, pero no es conveniente ni realista diseñar un jetbox demasiado grande por cuestiones de practicidad y coste.

A pesar de la importancia de este aspecto, se le suele prestar poca atención, pues no existen directrices orientativas y las pocas alusiones que se hacen al diseño del jetbox dan a entender que son hechas a estima (Gargano y Hager, 2002; Boes y Hager, 2003).

Dado que realizar una instalación experimental para diseñar el jetbox que, en última instancia, formará parte de una instalación experimental puede parecer excesivamente tedioso y bastante costoso, el presente trabajo propone el diseño del jetbox empleando un modelo numérico de dinámica de fluidos computacional (CFD) tridimensional implementado en la plataforma de código abierto OpenFOAM.



Dicho modelo, aparentemente inexistente en la literatura, técnica permite: a) analizar la sensibilidad a una serie de parámetros geométricos de la instalación bajo estudio b) decidir qué dimensiones constituyen un buen compromiso entre tamaño (y coste) de la instalación y precisión de los resultados que esta aportará y c) cuantificar el sesgo que el empleo de una instalación a presión para emular el papel de un aliviadero de presa supone.

2. Materiales y métodos

2.1. Caso de estudio

El caso de estudio es la instalación que alimenta un canal para el estudio del efecto de la aireación en resaltos hidráulicos en cuencos amortiguadores. Las dimensiones de la sección de entrada corresponden a un ancho de $L_y=0.80\text{m}$ y un calado máximo de $d=0.10\text{m}$ con un caudal de $0.140\text{m}^3/\text{s}$ ($q=0.175\text{m}^2/\text{s}$). Dicha entrada al canal se produce a $\beta=53.13^\circ$, correspondiente a un aliviadero de talud 0.75:1. La instalación a presión consta de un tramo ascendente de tubería circular de diámetro $\phi=0.2776\text{m}$ (tubería de PVC de presión DN315), un codo de 90° , un tramo horizontal, una transición de sección circular a cuadrada de lado igual al diámetro, un giro descendiente hasta la inclinación que impone el talud del aliviadero y, por último, un tramo de expansión horizontal y contracción vertical hasta alcanzar el ancho y calado de este (ver Fig. 1).

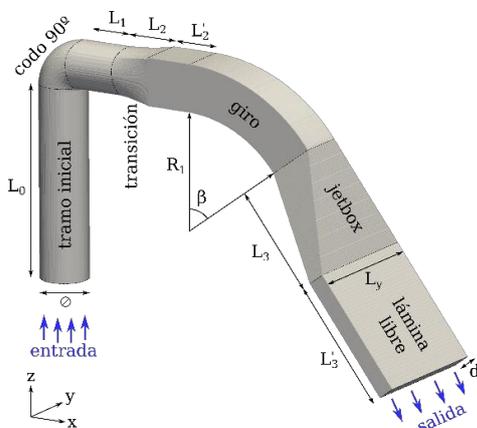


Figura 1. Geometría de la instalación.

El presente trabajo consiste en dimensionar dicha instalación de modo que las condiciones de salida, en lo posible, sean lo más aproximadas a las propias de un aliviadero de pared lisa, especialmente, en términos de calado, perfiles de velocidad y presión. Algunas variables, como el diámetro de la conducción, el ancho del aliviadero o el caudal y calado de este vienen impuestas, mientras que otras, se determinan mediante el modelo CFD descrito a continuación estableciendo un compromiso entre longitud mínima de cada dimensión y la mejora marginal que supone incrementarla. Las variables a estudiar son:

- Longitud del tramo horizontal: L_1

- Longitud de la transición L_2
- Radio de giro: R_1
- Longitud del jetbox: L_3

2.2. Modelo numérico

El modelo numérico planteado contempla una malla estructurada de elementos cúbicos, donde el análisis de convergencia de malla y los valores de y^+ indican que no existe la necesidad de aplicar un refinado selectivo. Se lleva a cabo el pertinente análisis de convergencia de malla según Celik et al. (2008) con 5 mallas de tamaño de elemento de 3, 4, 7, 9 y 10mm, lo que da pie a decantarse por el tamaño $\Delta x=3\text{mm}$ (orden aparente de malla $p=1,91$ y índice de convergencia de malla $GCI=7.95\%$). El presente modelo se implementa en la plataforma CFD de libre acceso OpenFOAM, por lo que la generación de la malla se lleva cabo con *blockMesh* y *snappyHexMesh*.

Pese a tratarse de un dispositivo experimental para estudio de flujos aireados, la zona a presión de la instalación funciona con un solo fluido, por lo que se recurre al algoritmo SIMPLE, que aplica el promediado de Reynolds de las Ecuaciones de Navier-Stokes (RANS) con un modelo de turbulencia RNG $k-\epsilon$, que, en la experiencia de los autores, aporta buenos resultados en modelos similares (Bayón y López-Jiménez, 2015; Bayón et al., 2016, 2017).

Respecto a las condiciones de contorno del problema, se impone el caudal deseado ($0.140\text{m}^3/\text{s}$) en la entrada, con una condición de contorno de salida libre (presión atmosférica) a la salida. A los contornos sólidos, se les impone una condición de no deslizamiento de pared lisa, salvo a la correspondiente a la lámina libre en el tramo final del modelo, a la que se le impone una condición de deslizamiento. Este enfoque permite obviar el papel del aire y evita tener que recurrir a un modelo bifásico con VOF o similar, con el consiguiente ahorro de coste computacional. Con finalidad similar, a los contornos sólidos, se les impone una función de pared de alto número de Reynolds para evitar el excesivo refinado de la malla.

Las cuatro variables geométricas anteriores se estiman simulando, primero, el tramo horizontal con la salida al final de este. Después, una vez adoptado el valor L_1 definitivo, se simula el primer y segundo tramo para determinar L_2 y, así, sucesivamente hasta simular el modelo completo.

3. Análisis de resultados

La Fig. 2 muestra los resultados obtenidos a partir del modelo numérico con las dimensiones de instalación supuestas a priori. Puede observarse una aceleración en la zona superior de la conducción horizontal propia del giro abrupto que impone el codo de 90° , con la consiguiente región de gradiente de presión negativo y el correspondiente despegue de flujo y recirculación. En las zonas superiores de ambos giros, el codo a 90° y el más gradual, se aprecian

ligeras sobrepresiones propias del estancamiento parcial que imponen y que deben ser tenidas en cuenta para el correcto anclaje de la instalación experimental.

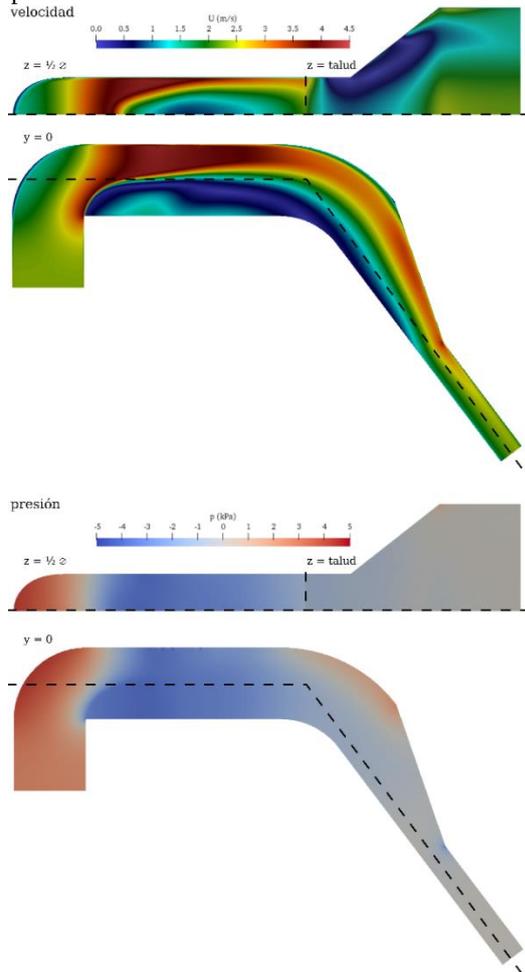


Figura 2. Secciones de planta y perfil de los campos de velocidad y presión de la instalación.

La Fig. 3 muestra las líneas de corriente en planta y alzado en el mismo escenario, donde, no solo se observa claramente la recirculación aguas abajo del codo a 90°, sino un despegue indeseable en la zona de expansión horizontal de la conducción. Este fenómeno debe limitarse, pues compromete de forma determinante la consecución del objetivo de la instalación, que es la entrega del flujo en condiciones.

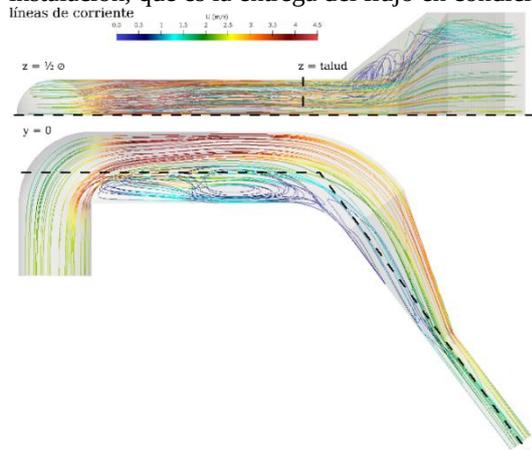


Figura 3. Líneas de corriente en planta y perfil de la instalación.

Gracias a una serie de simulaciones preliminares, se determina la longitud mínima de tramo inicial vertical necesaria para alcanzar el completo desarrollo del flujo, hallándose que, a partir de $L_0=0$, la variación del perfil es inferior al 1%, valor aceptable y con una repercusión escasa en el desarrollo posterior del flujo y con un coste computacional que, en caso de aumentar la longitud inicial, haría el modelo inviable por cuestiones económicas y de espacio físico.

3.1. Longitud de tramo horizontal L_1

El tramo horizontal es, con toda certeza, en el que ocurre la mayor perturbación del flujo, ya que se da una inevitable separación y recirculación de este aguas abajo del codo, como se observa en las Fig. 2 y 3. Por ello, como se puede ver en la Fig. 4, tras el codo, la estabilización total del flujo ocurriría con valores de L_1 fuera de lo razonable y factible, razón por la cual, se opta por un valor de $L_1=1.70\text{m}$, que supone una variación marginal del perfil de velocidad y presión del 5%.

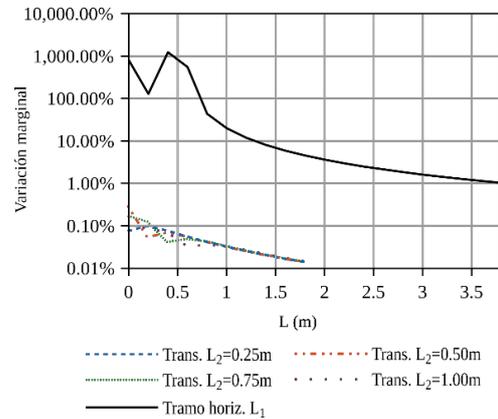


Figura 4. Variación marginal media de la velocidad en el tramo horizontal (L_1) y tras la transición de circular a cuadrado (L_2).

3.2. Longitud de transición L_2

Respecto a la longitud de la transición de sección circular a cuadrada, se ensayan los valores 0.25, 0.50, 0.75 y 1.00m y se comparan los perfiles de velocidad a partir del inicio de la transición en los cuatro casos. Como se observa en la Fig. 4, algo a priori contra la intuición, la longitud de transición es prácticamente irrelevante a partir de 1.00m. Por tanto, a menos que ello suponga problemas de manufactura, se adopta el valor de mínimo: $L_2=0.25\text{m}$, seguido de $L_2'=0.75\text{m}$ de sección rectangular.

3.2. Radio de giro R_1

El radio de giro de la conducción cuadrada es de gran importancia ya que, por un lado, un valor demasiado bajo causa el despegue del flujo ya cerca de la salida al aliviadero, mientras que un valor relativamente alto hace crecer la instalación de forma desproporcionada. El modus operandi para optimizar R_1 difiere ligeramente del resto de variables: tras realizar una

primera simulación con un R_1 tentativo, se observa el radio de giro que toman las líneas de corriente del flujo y se adopta este como valor mínimo. A partir de dicho valor ($R_1=0.35m$), que se observa que no causa despegue de flujo, se prueban valores superiores, comprobándose que los perfiles de velocidad aguas abajo del giro son indiferenciables a partir del tamaño $R_1=0.70m$ (ver Fig. 5), que se adopta como óptimo.

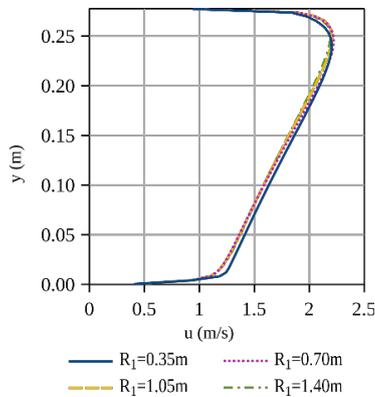


Figura 5. Perfiles de velocidad verticales aguas abajo del giro con diferentes radios de giro (R_1).

3.2. Longitud del jetbox L_3

Por último, a fin de determinar el valor óptimo de la longitud del jetbox propiamente dicho, consistente en una expansión horizontal y una contracción vertical hasta el calado pertinente, se representa el perfil de velocidades horizontal a lo ancho de la salida de la instalación, es decir, de ingreso al canal experimental. El objetivo es conseguir un perfil de velocidades lo más uniforme posible y, como se observa en la Fig. 6, ni yendo a longitudes que prácticamente imposibilitarían la manufactura de la pieza, se logra dicho objetivo al 100%. Es por ello que se adopta como valor de compromiso la longitud correspondiente a $L_3=0.694m$, pues muestra una clara mejora respecto al valor anterior y una diferencia relativamente pequeña respecto al tamaño siguiente, que es el doble.

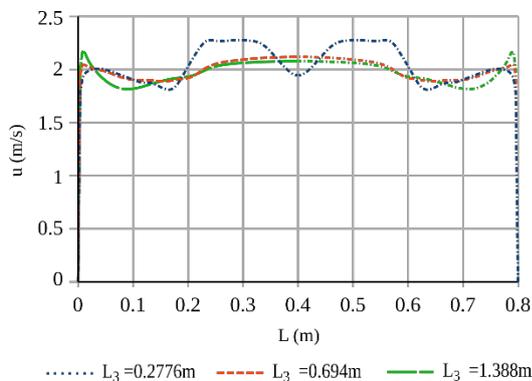


Figura 6. Perfiles de velocidad horizontales aguas abajo del jetbox con diferentes longitudes de este (L_3).

A fin de garantizar una distribución más uniforme de velocidades, se contempla la instalación de difusores que ayuden a dirigir el flujo en este tramo de la instalación.

4. Conclusiones

Se plantea un modelo CFD tridimensional implementado en la plataforma de código abierto OpenFOAM para el diseño de un jetbox de instalación hidráulica experimental. La mayoría de parámetros geométricos e hidráulicos vienen impuestos, mientras que, para otros, se debe calcular la longitud mínima como compromiso entre tamaño/coste de la instalación y perturbación que imponen (ver Tab. 1).

Tabla 1. Resultados de los parámetros geométricos ($\phi=0.2776m$).

L_1	6.1 ϕ	L_3	2.5 ϕ
L_2	0.9 ϕ	R_1	2.5 ϕ
L_2'	2.7 ϕ		

Queda como trabajo futuro validar los resultados arrojados por el modelo, que solo podrá llevarse a cabo una vez ejecutada la instalación.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido desarrollado en el contexto del proyecto “LA AIREACION DEL FLUJO Y SU IMPLEMENTACION EN PROTOTIPO PARA LA MEJORA DE LA DISIPACION DE ENERGIA DE LA LAMINA VERTIENTE POR RESALTO HIDRAULICO EN DISTINTOS TIPOS DE PRESAS” (BIA2017-85412-C2-1R-AR), financiado por la Agencia Estatal de Investigación (España).

Referencias

Bayon, A., y Lopez-Jimenez, P. A. (2015). Numerical analysis of hydraulic jumps using OpenFOAM. *Journal of Hydroinformatics*, 17(4), 662-678.

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., Toro, J.P., Bombardelli, F.A., Matos, J. y López-Jiménez, P.A. (2017). “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).

Boes, R. M., y Hager, W. H. (2003). “Hydraulic design of stepped spillways”. *Journal of Hydraulic Engineering*, 129(9), 671-679.

Celik, I. B., Ghia, U., Roache, P. J., Freitas, C. J., Coleman, H. y 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.

Gargano, R., y Hager, W. H. (2002). Supercritical flow across sewer manholes. *Journal of Hydraulic Engineering*, 128(11), 1014-1017.