

Flujo bifásico en cuencos de disipación de energía *Two-phase flow in energy plunge pools*

(Recepción 12/03/2020; Aceptación 24/04/2020)

Marco F.¹; Castillo L.G.¹; García J.T.¹

¹ Escuela de Ingeniería de Caminos Canales y Puertos y de Ingeniería de Minas
Universidad Politécnica de Cartagena (UPCT)
Paseo Alfonso XIII, 52, 30203 Cartagena, España
Teléfono: 868071014
Email: francisca.marco@upct.es

Resumen. Este trabajo presenta un estudio experimental del análisis de un resalto hidráulico sumergido generado al pie de un aliviadero de vertido libre. El estudio se enfoca en el análisis de la fracción de vacío y la velocidad media cerca del fondo. Para ello, se han llevado a cabo mediciones del campo de velocidad y de la tasa de arrastre de aire de diferentes secciones a lo largo del resalto. En las mediciones se ha utilizado un equipo de fibra óptica de doble punta RBI-Instruments y un sistema de tubo de Pitot con back-flushing utilizando transductores de presión GE Druck modelo UNIK 5000.

Palabras clave. Cuenco de disipación; fibra óptica; flujo emulsionado; resalto hidráulico sumergido; tubo de Pitot con back-flushing.

Abstract. This paper presents an experimental study of the analysis of a submerged hydraulic jump generated downstream of a free spillway. The study focuses on the analysis of the void fraction and the mean velocity near the bottom. For this purpose, the velocity field and air entrainment rate were measured in different sections of the submerged hydraulic jump. An optical fiber equipment from RBI-Instruments and a back-flushing Pitot tube with pressure transducers GE Druck model UNIK 5000 were used.

Keywords. Air-water flow; back-flushing Pitot tube; fiber-optical; plunge pool; submerged hydraulic jump.

1. Introducción

En los últimos años, la mejora del conocimiento de las series temporales y la reciente modificación de las Normas Técnicas de Seguridad para las grandes presas y sus embalses (NTS), han aconsejado la reevaluación de la capacidad de descarga y de las condiciones de operación de presas en todo el mundo. Varios estudios (FEMA, 2014) han planteado que muchas de las presas existentes pueden tener una capacidad de descarga insuficiente, lo que aumenta la posibilidad de que existan desbordamientos durante eventos extremos. Pero aumentar la capacidad de los aliviaderos resulta costoso y en ocasiones técnicamente inviable. El sobrevvertido genera nuevas condiciones de cargas y pueden causar aguas abajo de la presa problemas de erosión y socavación (Wahl et al., 2008).

Un mejor conocimiento de los patrones de flujo en el cuenco de disipación es importante para los diseñadores y los proyectistas. Los efectos de la entrada de aire en el resalto hidráulico sumergido pueden ser esenciales de cara a la seguridad de operación de estructuras hidráulicas.

El resalto hidráulico es una transición súbita de un régimen en flujo supercrítico a subcrítico. Se caracteriza por el desarrollo de la turbulencia a gran escala, ondas superficiales, incorporación de aire y alta disipación de energía. La Fig. 1 muestra una

representación esquemática del resalto hidráulico sumergido en un cuenco de disipación.

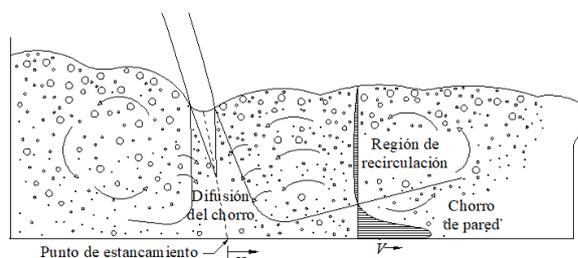


Figura 1. Resalto hidráulico sumergido en un cuenco de disipación (adaptado de Carrillo et al., 2020).

2. Material y métodos

2.1. Instalación experimental

La infraestructura utilizada se encuentra en el Laboratorio de Hidráulica de la Universidad Politécnica de Cartagena. Permite estudiar la disipación de energía de resaltos hidráulicos sumergidos creados aguas abajo de un aliviadero de vertido libre. Dicha instalación permite medir caudales entre 10 y 200 l/s, registrar alturas de caída de 2.20 hasta 3.50 m, y disponer de colchones de agua que varían entre 0 m y 1 m de profundidad. En el resalto hidráulico sumergido que se forma aguas abajo del punto de impacto (Fig. 1), se han realizado

mediciones de la tasa de aireación y del campo de velocidades en diez secciones transversales aguas abajo del punto de estancamiento y equiespaciadas cada 0.10 m, con un equipo de fibra óptica y un sistema de tubo de Pitot con back-flushing.

Como continuación del artículo de Carrillo et al. (2020), se analiza un resalto hidráulico sumergido con un caudal específico $q = 0.099 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ y un calado al final del cuenco de disipación $Y = 0.30 \text{ m}$.

2.2. Fibra óptica

Para detectar el cambio de fase entre el agua y el aire (RBI-Instruments, 2012) se empleó un equipo de fibra óptica de RBI-Instruments, con la finalidad de obtener la fracción de vacío local. Esta sonda de doble punta detecta el ascenso y el descenso de la señal como el inicio y el fin del cambio de fase en la punta del sensor. Los valores establecidos para el umbral se fijaron en 0 V (agua) y 5 V (aire). Se definió la fracción de vacío como el cociente entre el tiempo total que la sonda se encuentra en aire (Σt_{Gi}) y el tiempo total t del experimento.

Una fuente de error en la estimación del aire atrapado en un flujo es debida al cálculo estadístico del número de burbujas de aire que entra en contacto con las puntas de la sonda (Stutz, 1996). Por lo tanto, es necesario contar con mediciones lo suficientemente largas para obtener resultados precisos.

Para estimar la duración mínima que la medición debe tener se siguieron las recomendaciones de André et al. (2005) y de Boes y Hager (2003), considerando así un tiempo de muestreo de 90 s.

2.3. Tubo de Pitot con Back-flushing

Se utilizó un tubo de Pitot con back-flushing para registrar los perfiles de velocidad en las mismas secciones donde se habían realizado las mediciones de fibra óptica. El tubo de Pitot mide la diferencia de presión entre la presión dinámica y la estática. Se utilizaron transductores de presión GE Druck modelo UNIK 5000 para registrar las variaciones de presión. Estos sensores tienen un rango de medición entre -200 y +800 mbar y una precisión de fondo de escala de $\pm 0.04\%$. La señal de salida de ambos puertos fue escaneada a 20 Hz durante 90 s (1800 datos).

Para impedir el ingreso de aire en el sistema neumático del tubo de Pitot durante las mediciones, se forzó un contraflujo continuo (Matos y Frizell, 2000; Matos et al., 2002). El contraflujo se controlaba mediante válvulas de aguja y para reducir la perturbación de las mediciones, la tasa de contraflujo se limitó a casi cero.

Wood (1983) determinó que la velocidad media a partir de la presión medida con el tubo de Pitot en los flujos bifásicos es:

$$V = \sqrt{\frac{2g\Delta P}{\rho_w(1 - \lambda C_{aire})}} \quad (1)$$

donde V es la velocidad, g la aceleración de la gravedad, ΔP la diferencia entre la presión total y la presión estática, ρ_w la densidad del agua, C_{aire} la fracción de vacío local, y λ el coeficiente de derivación que tiene en cuenta el comportamiento no homogéneo del flujo aire-agua que se aproxima al punto de estancamiento del tubo de Pitot.

La región de recirculación puede afectar a las mediciones del tubo de Pitot (Matos y Frizell, 2000; Matos et al., 2002). Por esta razón, las velocidades locales se limitaron al chorro de la pared cerca de la región inferior.

3. Resultados y discusión

3.1. Fracción de vacío

La Fig. 2 presenta la fracción de vacío de forma adimensional en función de la relación X/B_j , siendo X la distancia del perfil vertical al punto de estancamiento y B_j el espesor del chorro de impacto. Siguiendo a Castillo et al. (2014), el espesor del chorro de impacto se definió como:

$$B_j = B_g + 2\xi = \frac{q}{\sqrt{2gH}} + 4\varphi\sqrt{h}(\sqrt{2H} - 2\sqrt{h}) \quad (2)$$

donde ξ es la distancia lateral de difusión del chorro por efectos de aireación y turbulencia y $\varphi = K_\varphi T_u$, siendo T_u la intensidad de turbulencia y K_φ un parámetro experimental de valor 1.24 para el caso de chorros bifásicos y tridimensionales (Castillo et al., 2014).

En función de la relación X/B_j los datos se han agrupado en cuatro subclases. Los valores de fracción de vacío más altos se obtuvieron cerca del fondo ($0.10 < y/y_{90} < 0.40$) e inmediatamente aguas abajo del punto de impacto o estancamiento, alcanzando valores próximos al 20%. A medida que el flujo se desplaza hacia aguas abajo disminuye la fracción de vacío detectada. Para $0.40 < y/y_{90} < 0.70$, la fracción de vacío tiende a un valor constante en la vertical en torno al 10%. Para valores de $y/y_{90} > 0.80$, cerca de la superficie libre, los valores de fracción de vacío aumentan rápidamente.

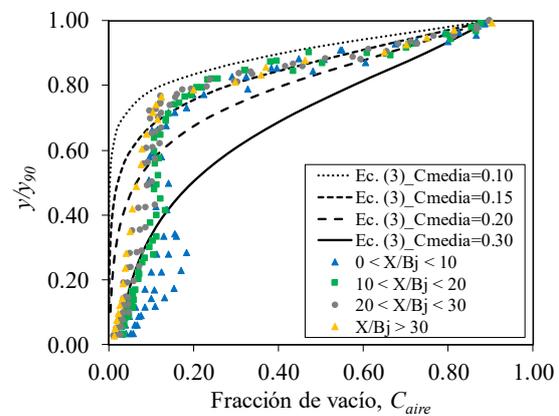


Figura 2. Perfiles de fracción de vacío aguas abajo del punto de estancamiento ($q = 0.099 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$, $Y = 0.30 \text{ m}$).

Estos valores obtenidos se han comparado con la ley teórica desarrollada por Chanson (1995) para una emulsión aire-agua de un flujo uniforme en equilibrio.

$$C_{air} = 1 - \tanh^2 \left(K' - \frac{y'}{2D'} \right) \quad (3)$$

donde K' es una constante de integración, D' es la difusividad turbulenta adimensional (asumiendo una turbulencia homogénea) e $y' = y/y_{90}$. K' y D' dependen de la concentración media y cuyos valores recogidos por Chanson se adjuntan a continuación:

Tabla 1. Constantes de Integración K' y difusividad turbulenta D' utilizados en la Ec. (3). Desde Chanson (1995).

C_{media}	D'	K'
0.01	0.007312	68.70445
0.05	0.036562	14.00290
0.10	0.073124	7.16516
0.15	0.109704	7.16516
0.20	0.146489	3.740068
0.30	0.223191	2.567688
0.40	0.311100	1.934650
0.50	0.423441	1.508251
0.60	0.587217	1.178924
0.70	0.878462	0.896627

Aunque la Ec. (3) no fue desarrollada para resaltos hidráulicos sumergidos, puede proporcionar un punto de referencia para la comparación.

En la Fig. 2 se ha representado la Ec. 3 para varias fracciones medias de vacío. Se puede observar que todos los datos experimentales medidos ($0 < X/B_j < 0.30$) y que poseen a una concentración media entre 0.15 y 0.25, tienden a caer entre las leyes teóricas de 0.10 y 0.20 para $y/y_{90} > 0.60$.

3.2. Distribución de velocidades

Las mediciones de velocidad media se obtuvieron con el tubo de Pitot con back-flushing corregido por la fracción de vacío local con la Ec. 1.

Estudios previos (Rajaratnam, 1965) han demostrado que los perfiles de velocidad en la dirección principal de flujo de resaltos hidráulicos al pie de aliviaderos de vertido libre, pueden compararse si se normaliza la velocidad con respecto a la velocidad máxima $V_{m\acute{a}x}$ en cualquier sección y, las distancias a la solera con la longitud característica δ_l , definida como la distancia al fondo donde se alcanza la velocidad local $V = V_{m\acute{a}x}/2$ y donde el gradiente de velocidad es negativo.

La velocidad máxima $V_{m\acute{a}x}$ y la escala de longitud δ_l se calcularon en cada sección transversal del resalto hidráulico sumergido. La Fig. 3 muestra los perfiles adimensionalizados de la velocidad en secciones transversales situadas entre 0.10 y 1.00 m, aguas abajo del punto de estancamiento. Las velocidades más altas se han registrado cerca del fondo y tienden a disminuir a medida que el flujo se desplaza hacia la superficie libre. Los resultados obtenidos también concuerdan con las fórmulas de distribución de velocidades adimensionales de chorros de pared y

resaltos hidráulicos, obtenidas por varios autores con las siguientes ecuaciones (Ec. 4, 5, 6, 7 y 8).

Görtler (1942), citado por Liu et al. (1998):

$$\frac{V_x}{V_{m\acute{a}x}} = 1 - \tanh^2 \left(0.881 \frac{y}{\delta_l} \right) \quad (4)$$

Rajaratnam (1976):

$$\frac{V_x}{V_{m\acute{a}x}} = e^{-0.693 \left(\frac{y}{\delta_l} \right)^2} \quad (5)$$

Lin et al. (2012):

$$\frac{V_x}{V_{m\acute{a}x}} = 2.3 \left(\frac{y}{\delta_l} \right)^{0.42} \left(1 - \operatorname{erf} \left(0.886 \frac{y}{\delta_l} \right) \right) \quad (6)$$

De Dios et al. (2017):

$$\frac{V_x}{V_{m\acute{a}x}} = 2.0 \left(\frac{y}{\delta_l} \right)^{1/7} \left(1 - \operatorname{erf} \left(0.55 \frac{y}{\delta_l} \right) \right) - 0.39 \quad (7)$$

Castillo et al. (2017):

$$\frac{V_x}{V_{m\acute{a}x}} = 1.48 \left(\frac{y}{\delta_l} \right)^{1/7} \left(1 - \operatorname{erf} \left(0.66 \frac{y}{\delta_l} \right) \right) \quad (8)$$

donde $\operatorname{erf}(u) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^u e^{-t^2} dt$.

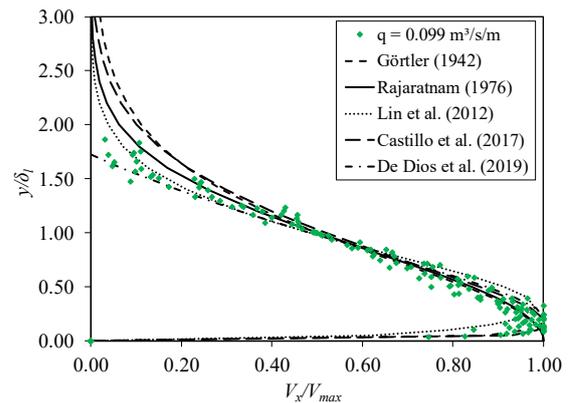


Figura 3. Perfiles de velocidad media horizontal en diferentes secciones del cuenco de disipación ($q = 0.099 \text{ m}^3/\text{s/m}$, $Y = 0.30 \text{ m}$) (adaptado de Carrillo et al., 2020).

4. Conclusiones

El estudio de los flujos bifásicos aire-agua es muy importante en las estructuras hidráulicas debido a la naturaleza no diluida del flujo.

En este trabajo se han analizado las características del flujo aire-agua producido aguas abajo de un aliviadero de vertido libre. Un equipo de fibra óptica y un tubo de Pitot con back-flushing fueron utilizados. Teniendo en cuenta las limitaciones de ambos equipos en la región de flujo prácticamente unidireccional, se pudo estimar la fracción de vacío y el campo de velocidad utilizando la corrección por aireación.

Se han obtenido los valores de fracción de vacío y velocidades más altos en la zona más próxima al fondo y tienden a disminuir conforme nos alejamos del mismo. Además, se han registrado los máximos valores para las secciones más cercanas al punto de estancamiento y disminuyen a medida que el flujo se

desplaza aguas abajo de la zona de impacto del chorro. La distribución de fracción de vacío tiende a ser sensiblemente superior con respecto a un flujo emulsionado uniforme en equilibrio, alcanzando valores del 20% hasta $y/y_{90} < 0.40$ y a partir de ahí, se mantiene sensiblemente constante (del orden de un 10%) hasta $y/y_{90} = 0.80$. Seguidamente aumenta rápidamente, pero con valores inferiores al flujo emulsionado uniforme en equilibrio (Fig. 2).

Los valores de velocidad media adimensionalizada coinciden sensiblemente con las leyes de distribución obtenidas por otros investigadores en el caso de chorros de pared y resaltos hidráulicos, colapsando en una sola ley para relaciones $y/\delta_l < 1.20$ (Fig. 3).

Agradecimientos

La primera autora agradece al Ministerio de Educación, Cultura y Deporte por la ayuda financiera recibida de la beca de Formación de Profesorado Universitario (FPU), número de referencia FPU16/05658.

Los autores agradecen por el financiamiento recibido desde el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades (MCIU), la Agencia Estatal de Investigación (AEI) y el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER), a través del Proyecto “La aireación del flujo en el vertido en lámina libre por coronación de presas a nivel de prototipo y su efecto en cuencos de disipación de energía” (RTI2018-095199-B-I00).

Referencias

- André, S., Boillat, J.L., and Schleiss, A.J. (2005). “Discussion of ‘Two-phase flow characteristics of stepped spillways’ by Robert M. Boes and Willi H. Hager”. *J. Hydraul. Eng.*, 131(5), 423-427.
- Boes, R., and Hager, W.H. (2003). “Two-phase flow characteristics of stepped spillways.” *J. Hydraul. Eng.*, 129(9), 661–670.
- Carrillo J.M., Marco F., Castillo, L.G., García J.T. (2020). “Analysis of two-phase flows in plunge pools of nappe jets.” *Proc. 8th IAHR International Symposium on Hydraulic Structures*, Chile.
- Castillo, L. G., Carrillo, J. M., & Blázquez, A. (2014). “Plunge pool mean dynamic pressures: a temporal analysis in nappe flow case”. *Journal of Hydraulic Research*, 53(1), 101-118.
- Castillo, L.G., Carrillo, J.M., and Bombardelli, F.A. (2017). “Distribution of mean flow and turbulence statistics in plunge pools.” *Journal of Hydroinformatics*, 19(2), 173-190.
- Chanson, H. (1995). Air bubble entrainment in free-surface turbulent flow. Report CH46/95, University of Queensland.
- De Dios, M., Bombardelli, F.A., García, C.M., Liscia, S.O., Lopardo, R.A., and Parravicini, J.A. (2017). “Experimental characterization of three-dimensional flow vertical structures in submerged hydraulic jumps.” *Journal of Hydro-environment Research*, 15, 1-12.
- FEMA. 2014. “Technical Manual: Overtopping Protection for Dams. Federal Emergency Management Agency.” FEMA P-1014, May. US Department of Homeland Security, USA.
- Lin, C., Hsieh, S.-C., Lin, I.-J., Chang, K.-A., and Raikar, R. V. (2012). “Flow property and self-similarity in steady hydraulic jumps.” *J. Exp. Fluids*, 53, 1591–1616.
- Matos, J., Frizell, K. H., André, S. and Frizell, K. W. (2002). “On the performance of velocity measurement techniques in air-water flows.” *Proc. Hydraulic Measurements & Experimental Methods 2002 Conference, EWRI-ASCE/IAHR*, Estes Park, Colorado, USA (ed. T. L. Wahl, C. A. Pugh, Kevin A. Oberg and T. B. Vermeyen), CD-ROM.
- Matos, J., and Frizell, K. H., (2000). “Air concentration and velocity measurements on self-aerated flow down stepped chutes.” *Proc. 2000 Joint Conf. on Water Resources Engineering and Water Resources Planning & Management, ASCE*, USA.
- Rajaratnam, N. (1965). “The hydraulic jump as wall jet.” *Proc. ASCE J. Hydraul. Div.* 91 (HY5), 107–132.
- Rajaratnam, N. (1976). “Turbulent Jets.” Elsevier Scientific, Development in Water Science, 5, New York, USA.
- RBI-Instrumentation (2012). ISO Software user's guide.
- Stutz, B. (1996). “Analyse de la structure diphasique et instationnaire de poches de cavitation.” *PhD Thesis*, Institut National Polytechnique de Grenoble, France (in French).
- Wahl, T.L., Frizell, K.H., and Cohen, E.A. (2008). “Computing the trajectory of free jets.” *J. Hydraul. Eng.*, 134(2), 256–260.
- Wood, I. R. (1983). “Uniform region of self-aerated flow.” *Journal of Hydraulic Div., ASCE*, 109(3), 447–461.