

Análisis comparativo de sondas de detección de cambio de fase en un resalto hidráulico

Comparative analysis between phase-change detection probes in a hydraulic jump

(Recepción 28/01/2021; Aceptación 05/04/2021)

Ortega P.R.^{1,2}; Carrillo J.M.¹; Castillo L.G.¹; García J.T.¹

¹ Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos Canales y Puertos y de Ingeniería de Minas

Universidad Politécnica de Cartagena

Paseo Alfonso XIII, 52, 30203 Cartagena, España

Teléfono: +34 868 071 014

² Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental

Escuela Politécnica Nacional

Av. Ladrón de Guevara 253, 170517, Quito, Ecuador

Email: patricio.ortega@epn.edu.ec

Resumen. La mecánica de los flujos bifásicos agua-aire es un campo en constante desarrollo en diferentes disciplinas científicas. Para caracterizar dichos flujos es necesario una instrumentación robusta y precisa que permita medir la fracción de vacío en un flujo bifásico. En el presente trabajo se realiza la comparación de las mediciones puntuales medidas en un resalto hidráulico no desarrollado con una sonda de conductividad diseñada y construida en la UPCT y una sonda de fibra óptica. Se analiza la distribución de fracciones de vacío y la evolución de la lámina libre a lo largo del resalto hidráulico.

Palabras clave. Resalto hidráulico; sonda de conductividad; sonda de fibra óptica; fracción de vacío; flujo aire agua.

Abstract. Mechanics of air-water flows is a discipline in constant development in different scientific fields. To characterize these flows, reliable and robust instrumentation is necessary due to the characteristics of the phenomenon. In the present work, a comparative analysis of the local results obtained in a hydraulic jump has been studied with a conductivity probe designed and built at the UPCT and an optical fiber probe. The distribution of the void fractions and the evolution of the free surface along the hydraulic jump have been analyzed.

Keywords. Hydraulic jump; conductivity probe; optical fiber probe; void fraction; air-water flow.

1. Introducción

En la naturaleza es común encontrar flujos bifásicos agua-aire altamente turbulentos tales como: cascadas, ríos, olas del mar etc. De igual manera este tipo de flujos está presente en diferentes estructuras hidráulicas como es el caso de aliviaderos lisos y escalonados, cuencos disipadores de energía, entre otros (Chanson, 2004).

El fenómeno de introducción de aire cambia las propiedades iniciales monofásicas del fluido, siendo las fuerzas turbulentas uno de los principales mecanismos físicos para la aireación (Ervine y Falvey, 1987). Inicialmente estas perturbaciones son controladas por las fuerzas de tensión superficial y las fuerzas viscosas. A medida que aumenta las fluctuaciones turbulentas y la amplitud de las perturbaciones se produce ondulaciones e inestabilidades en la superficie libre que van atrapando aire e incorporándolo a la masa de agua de manera continua, produciéndose el fenómeno de autoaireación. Este fenómeno se caracteriza por un constante intercambio de fuerzas internas en la interfaz agua-aire con presencia de burbujas de aire y gotas de

agua de distintas formas y tamaños (Felder y Pfister, 2017).

Este tipo de flujos multifásicos requiere de instrumentación robusta y fiable para su medición y caracterización, tales como las sondas de detección de cambio de fase (por ejemplo, fibra óptica, conductividad/resistividad) (Chanson, 2004).

El objetivo del presente estudio es comparar los resultados obtenidos entre una sonda de conductividad diseñada y fabricada en la Universidad Politécnica de Cartagena (UPCT) y un equipo comercial de fibra óptica. Para ello se realiza la medición de flujo agua-aire altamente turbulento presente en un resalto hidráulico no desarrollado.

2. Materiales y Métodos

2.1. Instalación experimental

El Laboratorio de Hidráulica de la UPCT dispone de un canal hidrodinámico de pendiente variable donde se realizó la campaña experimental. El canal tiene una longitud de 12.5 m y ancho $b = 0.31$ m. En la Fig. 1



se indica un esquema del resalto hidráulico ensayado en laboratorio.

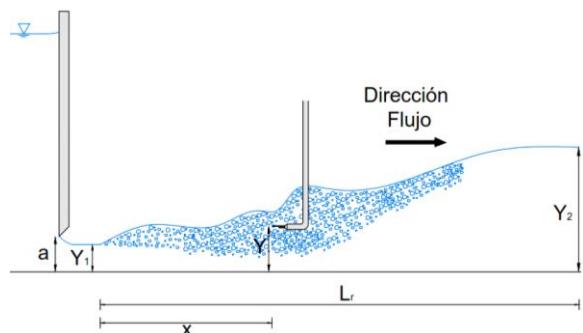


Figura 1. Esquema del resalto hidráulico no desarrollado ensayado.

2.2. Instrumentación

Sonda de conductividad

Con el propósito de medir flujos turbulentos aireados se ha diseñado y construido una sonda de conductividad en la UPCT. La sonda detecta el cambio de fase en la interfaz agua-aire considerando la diferente resistividad de cada fluido. Un sistema de adquisición de datos es utilizado para el registro de las señales de salida. Las señales analógicas se transforman en señales cuadradas binarias utilizando el criterio de umbral de corte simple (Toombes, 2002). La punta de la sonda de conductividad es un electrodo de platino de diámetro $\varnothing = 0.25$ mm. Cada medición fue registrada con una frecuencia de muestreo de 20 kHz durante 45 s según se determinó en estudios previos (Carrillo et al 2020a, 2020b). Mayores detalles del equipo se puede encontrar en trabajos previos (Carrillo et al. 2020a, 2020b). El procesamiento de las señales se realizó mediante un script escrito en MATLAB R2017a.

Sonda de fibra óptica

El equipo de fibra óptica utilizado es una instrumentación comercial de la marca francesa RBI-Instrumentation. La sonda consta de dos cables de fibra óptica de 200 mm que finalizan en un prisma de Descartes, por donde se hace pasar un haz de luz infrarroja. En función de la difracción de haz, un fotodiodo convierte la señal luminosa en voltaje a fin de identificar las interfaces de agua y de aire.

Las Figuras 2a y 2b indican las sondas de conductividad y fibra óptica respectivamente.

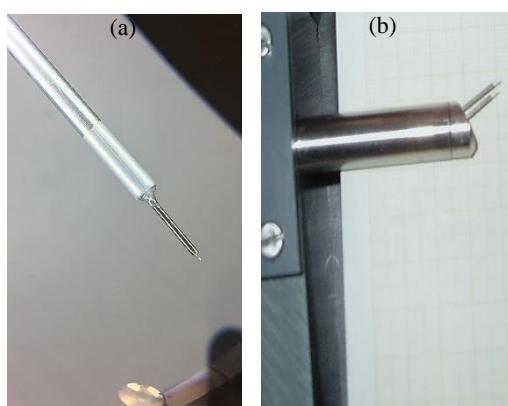


Figura 2. Sondas: a) Conductividad; b) fibra óptica.

2.3. Condiciones experimentales

El resalto hidráulico no desarrollado se formó a la salida de una compuerta plana vertical con abertura $a = 0.02$ m. Los ensayos fueron realizados con una pendiente de la solera horizontal $S = 0$. Para este trabajo se analizaron dos secciones verticales en la zona turbulenta del resalto hidráulico a una distancia $x = 0.261$ y 0.435 m, siendo x la distancia medida desde el pie del resalto hidráulico (ver Fig. 1).

Para minimizar posibles efectos de escala en resaltos hidráulicos es necesario analizar flujos turbulentos con números de Reynolds $R_e > 5 \cdot 10^4$ (Chanson y Chachereau, 2013). Para números de Reynolds menores los efectos de escala pueden ser muy notorios. En la Tabla 1 se detallan las condiciones experimentales.

Tabla 1. Condiciones experimentales del resalto hidráulico no desarrollado.

q ($\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$)	F_r (-)	R_e (-)	Y_1 (m)	Y_2 (m)	L_r (m)	V_1 (m/s)
0.035	7.6	$7.65 \cdot 10^4$	0.012	0.126	0.87	2.88

siendo q el caudal unitario ensayado, F_r el número de Froude, R_e el número Reynolds, Y_1 el calado supercrítico, Y_2 el calado aguas abajo del resalto hidráulico, L_r la longitud total del resalto, y V_1 la velocidad media al pie del resalto. Más información del resalto analizado puede encontrarse en Ortega et al. (2019).

Las sondas de conductividad y de fibra óptica fueron colocadas en las mismas posiciones y de forma paralela a la dirección principal de flujo.

3. Resultados y Discusión

3.1. Fracción de vacío

La fracción de vacío local promedio C se define como la relación entre el tiempo que el sensor de la sonda está en contacto con el aire y el tiempo total de muestreo ($C = \sum t_i / t$).

En la Fig. 3 se comparan las distribuciones de fracciones de vacío obtenidas con las dos sondas para dos secciones del resalto hidráulico no desarrollado. Las secciones analizadas corresponden a la zona central de recirculación del resalto hidráulico que presenta una alta turbulencia y disipación de energía.

Los resultados obtenidos con las dos instrumentaciones son muy similares. En ambos casos se registran fracciones de vacío menores al 10% en la región turbulenta, que disminuyen conforme la distancia x aumenta y el efecto de auto-aireación es menor.

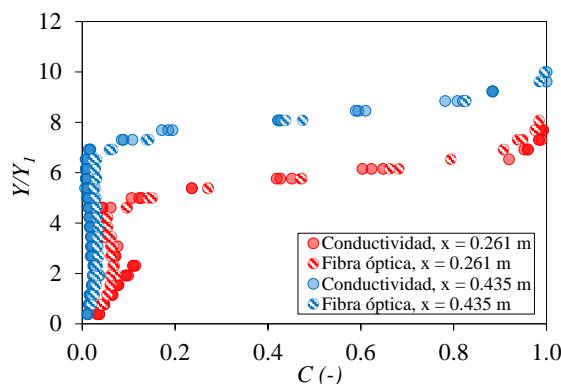


Figura 3. Comparación de la distribución de fracciones de vacío.
 $F_r = 7.6$, $R_e = 7.65 \cdot 10^4$, $V_I = 2.88$ m/s.

En la Fig. 4 se comparan los resultados obtenidos con ambas instrumentaciones. Pese a estar en una zona altamente turbulenta, los resultados muestran un buena correlación entre sí, con máximas diferencias menores al 5%. Comportamientos similares fueron obtenidos en trabajos previos como Felder y Pfister (2017).

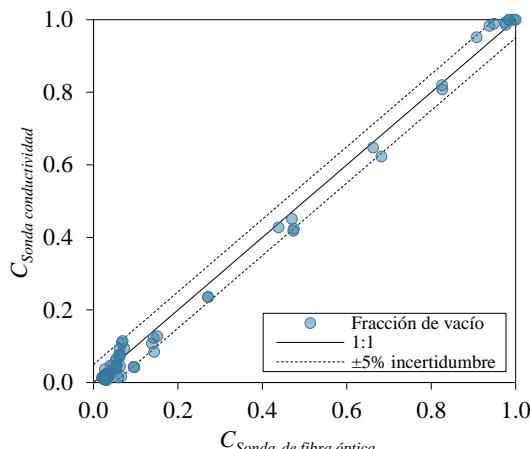


Figura 4. Comparativa entre fracciones de vacío C obtenidas con los equipos de conductividad y fibra óptica.

3.2. Variación de calados

Para analizar la evolución de la lámina libre a lo largo del resalto hidráulico, se han considerado los valores puntuales de fracciones de vacío en las secciones verticales cuyos calados Y_{90} , Y_{50} y Y_{10} corresponden a fracciones de vacío del 90, 50 y 10%.

La Fig. 5 muestra la evolución de la lámina libre, en cada sección se obtuvo los puntos de Y_{90} , Y_{50} y Y_{10} . Los resultados calculados con la sonda de conductividad y de fibra óptica son muy similares, salvo ligeras variaciones propias del fenómeno oscilatorio hidráulico ($F_r = 7.6$).

Los errores absolutos del calado están entre 1.0 y 7.0 mm, mientras que los errores relativos varían entre 1.5 y 5.6%.

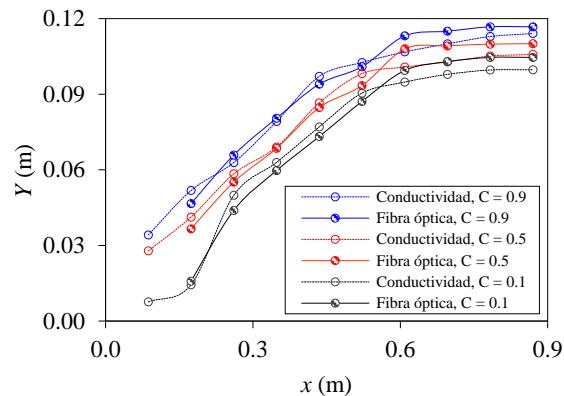


Figura 5. Evolución de la lámina libre a lo largo del resalto hidráulico no desarrollado.

4. Conclusiones

El resalto hidráulico es un fenómeno hidráulico caracterizado por alta aireación, turbulencia y disipación de energía. Estas características se aprovechan en el funcionamiento de las estructuras hidráulicas. El análisis de flujos bifásicos agua-aire requiere instrumentación que permita registrar la presencia de burbujas de aire en el agua, para así determinar su propiedades bifásicas.

Los resultados de distribución de fracciones de vacío obtenidos con la sonda de conductividad y la sonda de fibra óptica son semejantes, presentando máximas diferencias relativas inferiores al ±5% de la fracción local de vacío.

Respecto a la evolución de los perfiles longitudinales registrados para diferentes fracciones de vacío ($C = 0.90$, 0.50 , y 0.10), los resultados obtenidos son similares, con máximas diferencias relativas inferiores a 5.6%, a pesar de que las secciones analizadas se encuentran en la región con mayor turbulencia e inestabilidad.

Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento por el financiamiento recibido del Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades y el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER), 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”, referencia: RTI2018-095199-B-I00, y a la Fundación Séneca-Agencia de Ciencia y Tecnología de la Región de Murcia (España), por su apoyo a través del proyecto “Análisis de la capacidad de descarga de vertederos tipo laberinto y de la disipación de energía aguas abajo de los mismos”, referencia: 20879/PI/18.

Referencias

Carrillo, J.M., Ortega, P.R., Castillo, L.G., García, J.T. (2020a). Air entrainment in rectangular free falling jets. *Proceedings 8th IAHR International*

Symposium on Hydraulic Structures, Santiago, Chile.

<https://doi.org/10.14264/uql.2020.605>

Carrillo, J.M., Ortega P.R., Castillo, L.G., García, J.T. (2020b). Experimental Characterization of Air Entrainment in Rectangular Free Falling Jets. *Water*, 12(6), 1773, <https://doi.org/10.3390/w12061773>

Chanson, H. (2004). Air-water Flows in Water Engineering and Hydraulic Structures. Basic Processes and Metrology. *Proceedings Hydraulics of Dams and River Structures*, London, ISBN 90 5809 632, 73-16.

Chanson, H., Chachereau, Y. (2013). Scale effects affecting two-phase flow properties in hydraulic jump with small inflow Froude number. *Experimental Thermal and Fluid Science*, (45), 234-242. doi:10.1016/j.expthermflusci.2012.11.014.

Ervine, D. A., Falvey, H. (1987). Behaviour of turbulent jets in the atmosphere and plunge pools. *Proceedings of the Institutions of Civil Engineers*, 83(2), pages. 295-314.

Felder, S., Pfister, M. (2017). Comparative analyses of phase-detective intrusive probes in high-velocity air-water flows. *International Journal of Multiphase Flow*, (2017), 88-111.

MATLAB R2017a. (2017). The MathWorks, Inc., Natick, Massachusetts, United States.

Ortega, P.R., Carrillo, J.M., Castillo, L.G., García, J.T. (2019). Análisis experimental de flujos bifásicos en resaltos hidráulicos. *Proc., Jornadas de Ingeniería del Agua*. Toledo, Spain.

Toombes, L. (2002). *Experimental study of air-water flow properties on low-gradient stepped cascades*. PhD Thesis. School of Civil Engineering. The University of Queensland, Australia.