

# Análisis experimental de frecuencia de interferencia y fracciones de vacío en chorros turbulentos rectangulares

## *Experimental analysis of frequency of interference and void fractions in rectangular turbulent jets*

(Recepción 09/03/2020; Aceptación 20/05/2020)

Ortega P.R.<sup>1,2</sup>; Castillo L.G.<sup>1</sup>; García J.T.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 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

<sup>2</sup> Escuela Politécnica Nacional  
Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental Quito, Ecuador  
Email: patricio.ortega@epn.edu.ec

**Resumen.** *El incremento de las avenidas de diseño en presas, exige hoy en día la evaluación de los criterios actuales de diseño y de la capacidad de descarga de las mismas. El sobrevertido por coronación es uno de los mecanismos considerados para una posible operación de desagüe como consecuencia de la elevación del nivel del embalse. Este mecanismo puede ocasionar daños en la cimentación y cuenco de disipación de energía si los chorros incidentes no están debidamente aireados. El presente estudio experimental evalúa el proceso de aireación de un chorro rectangular turbulento durante su caída, para medir las propiedades agua-aire se utilizó una sonda de conductividad construida y diseñada en la Universidad Politécnica de Cartagena (España).*

**Palabras clave.** *Sonda de conductividad, chorro rectangular turbulento, fracción de vacío, sobrevertido.*

**Abstract.** *The increase in flood dam design, requires evaluating the current design criteria and discharge capacity of many dams. Overtopping is one of the mechanisms considered for a possible spillway operation due to the rise in reservoir level. This mechanism can cause damage to the foundations and the energy dissipation basin if the incident jets are not properly aerated. The present experimental study evaluates the aeration process of rectangular free-falling jets along its fall. A conductivity probe was used to measure the air-water properties; this device was built and designed at Universidad Politécnica de Cartagena (Spain).*

**Keywords.** *Conductivity probe, rectangular free-falling jet, void fraction, overtopping.*

## 1. Introducción

En los últimos años, se han planteado nuevos escenarios para el diseño hidráulico de las presas debido al incremento en la magnitud de las crecidas. Estos nuevos criterios permiten una re-evaluación de la capacidad de diseño actual en estructuras de descarga en presas y de los efectos hidrodinámicos de los chorros de sobrevertido en cuencos de disipación de energía al pie de presa (FEMA, 2014).

Es común que tal como ocurre en la naturaleza, en ríos, olas de mar, cascadas, se encuentren flujos bifásicos agua-aire en las estructuras hidráulicas como disipadores de energía, rápidas lisas o escalonadas.

El fenómeno de aireación de un chorro turbulento es complejo y actualmente se están desarrollando algunos estudios para su interpretación. Uno de los mecanismos más utilizados para la disipación de energía en presas es la descarga de chorros rectangulares turbulentos en la atmósfera, donde se experimenta una reducción de la velocidad y de su energía cinética a medida que el chorro incrementa su caída. En este proceso se introduce aire en la masa de

agua, produciéndose la aireación y dispersión del chorro. De acuerdo a Ervine et al. (1987) la turbulencia es el principal mecanismo para la introducción de aire en los chorros de descarga libre. El ancho del chorro incidente ( $B_j$ ) es el ancho del núcleo reducido por efecto del campo gravitacional más el esponjamiento producido por la introducción de aire y la dispersión del chorro (Castillo et al. 2015). Las características agua-aire de chorros rectangulares de descarga libre influyen directamente en la aireación y turbulencia de los cuencos de disipación de energía.

El presente estudio tiene por objetivo analizar las propiedades bifásicas agua-aire de un chorro rectangular de caída libre: la fracción de vacío ( $C$ ) y frecuencia de interferencia de fase ( $F$ ).

## 2. Materiales y Métodos

### 2.1. Instalación experimental

La Universidad Politécnica de Cartagena (UPCT) dispone de una instalación experimental especial para el estudio de chorros rectangulares turbulentos y de

cuencos de disipación de energía. La instalación está ubicada en el Laboratorio de hidráulica de la UPCT, y ésta dispone de un canal de ingreso de 4.00 m de largo, 1.05 m de ancho y 1.0 m de alto. En la parte aguas abajo del canal existe un vertedero rectangular de cresta delgada con alturas de caída variable. En la Figura 1 se puede apreciar una vista tridimensional de la instalación experimental para el estudio de chorros turbulentos.

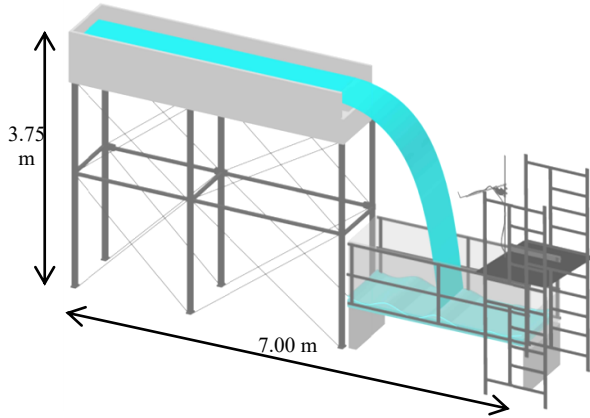


Figura 1. Instalación experimental para el estudio de chorros rectangulares turbulentos, Laboratorio de Hidráulica UPCT.

## 2.2. Instrumentación

Para analizar las propiedades agua-aire en chorros turbulentos se ha diseñado y construido una sonda de conductividad en la Universidad Politécnica de Cartagena.

Estas sondas detectan la diferente resistividad/conductividad del agua y el aire. Mediante un sistema de adquisición de datos se registran las señales de salida (Chanson, 2004). La punta de la sonda de conductividad consta de un electrodo de platino de diámetro  $\varnothing = 0.25$  mm. Cada medición fue registrada con una frecuencia de 20 kHz durante 45 s. En la Figura 2 se indica la medición del chorro con la sonda de conductividad.

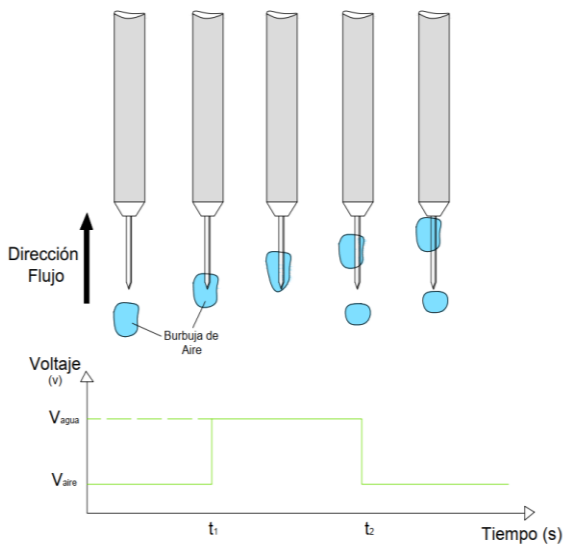


Figura 2. Sonda de conductividad en chorro rectangular UPCT.

La señal analógica es transformada en una señal cuadrada utilizando el criterio de umbral simple de corte al 50% del voltaje total (Toombes, 2002). Las propiedades bifásicas agua-aire fueron obtenidas mediante el procesamiento de señales con un programa escrito en MATLAB R2017a.

## 2.3. Condiciones experimentales

Las mediciones fueron realizadas para diferentes alturas cada 0.20 m, considerando alturas de caída entre  $0.0 \text{ m} < Z < -2.0 \text{ m}$  (Carrillo et al. 2020). El caudal unitario de ensayo es  $q = 0.072 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ . La carga sobre el vertedero rectangular de pared delgada es  $h_o = 0.11 \text{ m}$ . En la Figura 3 se indica un esquema de las características experimentales.

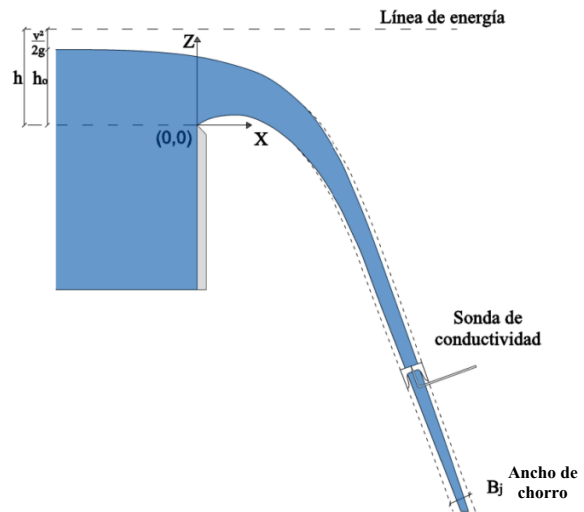


Figura 3. Representación esquemática de un chorro rectangular turbulento.

Posibles efectos de escala pueden afectar las condiciones iniciales del chorro. Para minimizar este efecto es necesario que las cargas sobre el vertedero de cresta delgada sean  $h \geq 0.045 \text{ m}$  y números de Weber  $We > 10^3$  en chorros verticales (Chanson 2009, Heller 2011).

## 3. Resultados y Discusión

### 3.1. Fracción de vacío

La fracción de vacío promedio  $C$  es la proporción de tiempo que la punta (sensor) de la sonda de conductividad está en contacto con el aire dividido para el tiempo total de muestreo ( $C = \sum t_i / t$ ).

La Figura 4 indica los perfiles de fracción de vacío desde  $0.0 \text{ m} < Z < -2.00 \text{ m}$ . Para los perfiles hasta  $Z = -1.20 \text{ m}$  se puede evidenciar fracciones de vacío  $C = 0.0$  lo que significa que el núcleo interno de agua se mantiene durante el descenso inicial.

Para los perfiles  $Z > -1.40 \text{ m}$  se inicia la aireación del chorro y el núcleo de agua desaparece. Conforme avanza las alturas de caída, la aireación en la parte central del chorro aumenta hasta llegar a fracciones de vacío del orden de  $C = 0.40$ .

### 3.2. Frecuencia de interferencia

La frecuencia de burbujas o frecuencia de interferencia  $F$  es analizada por muchos autores (Felder, 2013) y en distintos fenómenos hidráulicos. Esta se define como el número de burbujas que impactan el sensor de la sonda de conductividad por segundo.

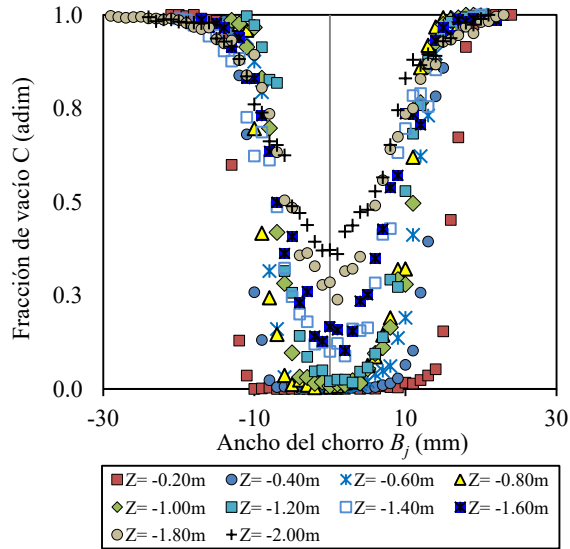


Figura 4. Fracción de vacío  $q = 0.072 \text{ m}^3/\text{s/m}$ .

La Figura 5 indica la variación de la frecuencia de interferencia en el chorro rectangular para alturas de caída entre  $0.0 \text{ m} < Z < -2.00 \text{ m}$ . A mayor altura de caída se registran las frecuencias de interferencia más altas entre  $20 \text{ Hz} < F < 30 \text{ Hz}$ . En el inicio del chorro se puede evidenciar dos zonas con picos máximos correspondientes a la parte exterior e interior del chorro. Este comportamiento cambia para valores de  $Z > -1.20 \text{ m}$ .

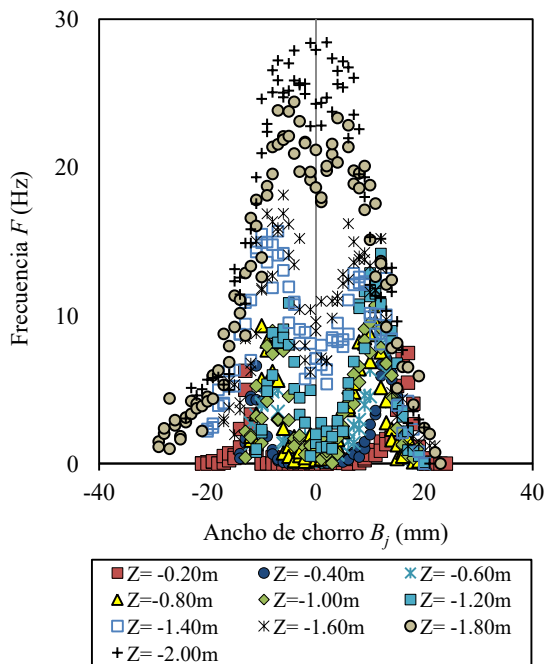


Figura 5. Frecuencia de interferencia de fase, para distintas caídas  $Z$ ,  $q = 0.072 \text{ m}^3/\text{s/m}$ .

Al inicio del descenso del chorro ( $Z = -0.20 \text{ m}$ ) los valores de frecuencia de interferencia son cercanos a cero, sin embargo, para puntos más bajos ( $Z = -2.0 \text{ m}$ ) las fracciones de vacío registran valores altos de frecuencia de interferencia; esto debido a que el núcleo desaparece y la aireación se incrementa.

### 4. Conclusiones

La aireación del chorro durante la caída se debe principalmente a los efectos de la turbulencia en la superficie libre. A medida que el chorro descende éste adquiere mayor velocidad por efecto de la fuerza de gravedad disminuyendo el ancho del núcleo del chorro para progresivamente desaparecer. Para alturas de caída mayores a  $Z > -1.20 \text{ m}$  se evidencia una mayor introducción de aire cuyos valores mínimos de fracción de vacío alcanzan valores de  $C = 0.40$ . A mayor altura de caída, la frecuencia de interferencia de burbujas aumenta como resultado de una mayor aireación en la parte más baja. Un mejor conocimiento del proceso de aireación en chorros rectangulares, producido por el sobrevertido de presas, ayudará a mejorar el diseño en las mismas.

### 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 “The flow aeration in the free surface overtopping of dams in prototype situations and his effect in energy dissipation plunge pools” (RTI2018-095199-B-I00).

Un agradecimiento especial al Dr. José María Carrillo por el apoyo y soporte científico-técnico al presente proyecto. Finalmente el primer autor agradece la ayuda económica facilitada por la Escuela Politécnica Nacional en base al programa de movilidad de profesorado para realizar estudios de doctorado.

### Referencias

Castillo, L., Carrillo, J.M., and Blázquez, A. (2015). “Plunge pool mean dynamic pressures: a temporal analysis in nappe flow case”. *Journal of Hydraulic Research* 2015; 53(1):101–118.

Carrillo, J.M., Ortega, P.R., Castillo, L.G., García, J.T. (2020). “Air entrainment in rectangular free-falling jets”. Aceptado para su publicación en *Proceedings 8<sup>th</sup> IAHR International Symposium on Hydraulic Structures*, Santiago, Chile.

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

Chanson, H. (2009). “Turbulent air-water flows in hydraulic structures: dynamic similarity and scale effects”. *Environ Fluid Mech* 2009; 9:125-142.

Ervine, D. A., Falvey, H. (1987). “Behaviour of turbulent jets in the atmosphere and plunge pools”.

Proceedings of the Institutions of Civil Engineers 1987; 83(2):95-314.

FEMA. (2014). "Technical Manual: Overtopping Protection for Dams". Federal Emergency Management Agency. FEMA P-1014, May. *US Department of Homeland Security*, USA.

Felder, S. (2013). "Air-water flow properties on stepped spillways for embankment dams: aeration, energy dissipation and turbulence on uniform, non-uniform and pooled stepped chutes". *PhD Thesis*. School of Civil Engineering, The University of Queensland, Australia.

Heller, Valentin. (2011). "Scale effects in physical hydraulic engineering models". *Journal of Hydraulic Research* 2011; 49(3):293-306.

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

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.