

# DESCRIPCIÓN DE ALGUNAS CARACTERÍSTICAS MACRO TURBULENTAS DEL RESALTO HIDRÁULICO A PARTIR DE LAS PRESIONES EN SU BASE

Raúl Antonio Lopardo, Jorge Daniel Bacchiega y María Cecilia Lopardo

Instituto Nacional del Agua, Ezeiza, Argentina.  
E-mail: rlopardo@ciudad.com.ar

## Introducción

La propiedad esencial del resalto consiste en una transformación de energía cinética en otra potencial más una disipación de energía total por el proceso turbulento. Por esa razón el resalto se emplea como disipador de energía cinética y como tal es utilizado frecuentemente en diversas estructuras hidráulicas.

Los fenómenos asociados a presiones fluctuantes macro turbulentas, que tienen decisiva influencia en la disipación de energía cinética, en contrapartida pueden ser responsables de acciones destructivas sobre las estructuras componentes de cuencos amortiguadores por efectos de arrancamiento de losas, fatiga, vibraciones o cavitación intermitente. Siendo estos fenómenos macro turbulentos de naturaleza aleatoria y neta definición tridimensional, resulta comprensible que en la bibliografía aún no se encuentren tentativas analíticas o numéricas para su interpretación, al menos en casos de clara aplicación práctica.

El presente trabajo tiene por objeto poner en evidencia, a partir de resultados experimentales de presiones instantáneas en la base de resaltos hidráulicos libres con números de Froude de ingreso entre 3 y 6, que algunas características particulares del flujo interno, como el punto de separación de la capa límite respecto de la placa sólida de base y el cambio en la zona de incorporación y expulsión de aire, parecen estar definidos en una misma región para una determinada abscisa..

## Presiones fluctuantes en resalto libre

Con fines de carácter estructural, la intensidad de turbulencia en el interior del resalto puede ser definida en función de las fluctuaciones de presión que se ejercen sobre la base, usualmente mediante el parámetro adimensional  $C'_p$ , donde  $\rho$  es la masa específica del fluido y  $U_1$  la velocidad incidente al resalto:

$$C'_p = \frac{\sqrt{p'^2}}{\rho \frac{U_1^2}{2}}$$

La distribución de presiones fluctuantes en la base de un resalto libre para un dado número de Froude de ingreso es función de una abscisa referida al salto  $x/(h_2-h_1)$ , donde  $h_1$  y  $h_2$  son los tirantes conjugados inicial y final del resalto respectivamente. Con esa selección de variables, los datos experimentales de los cuatro casos presentan sus máximas amplitudes de fluctuación para una abscisa  $x/(h_2-h_1) \sim 2$ , un cambio de curvatura (punto de inflexión) cerca de una abscisa  $x/(h_2-h_1) \sim 4$  y una zona de decaimiento similar para  $4 < F_1 < 6$ , con excepción del caso de  $F_1 = 3$ , que está por debajo de los "resaltos estables" y en medio de los "oscilantes".

## Frecuencias dominantes en resalto libre

Las fluctuaciones de presión macro turbulentas en fluidos reales pueden ser consideradas como un proceso estocástico, estacionario y ergódico. Debido a la naturaleza aleatoria del fenómeno en estudio no resulta posible su descripción a partir

de una función explícita y analítica del tiempo. Sin embargo, existen adecuadas maneras para caracterizar un proceso aleatorio mediante estructuras cuantitativas a partir del análisis estadístico. Para los fines del tema aquí tratado surgen como más adecuadas el espectro de densidad de potencia y la función densidad de probabilidad. El espectro de densidad de potencia determina cómo la energía de una señal se encuentra distribuida en frecuencia. El análisis espectral puede llevarse a cabo mediante la transformada discreta de Fourier (TDF) en su implementación llamada "rápida" (FFT), con ventana de Bartlett. Para lograr un adecuado resultado del análisis estadístico deben seleccionarse correctamente los siguientes parámetros de digitalización de la señal: intervalo de tiempo de muestreo, el número de bloques o promedios del espectro y el número de datos tomados por bloque. Si se utiliza para ello como magnitud representativa la frecuencia dominante o de pico  $f_d$ , alrededor de la cual se concentra la máxima energía de oscilación, del análisis dimensional surge la función:  $S_d = S_d [x/(h_2-h_1), F_1]$ , donde  $S_d$  es el número de Strouhal, definido como  $S_d = f_d h_1 / U_1$ .

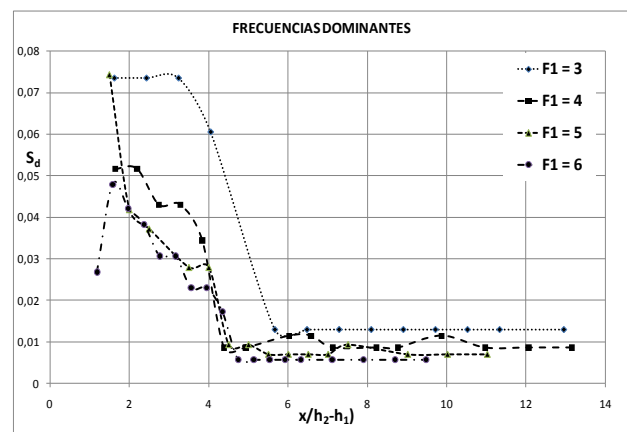


Figura 1.- Números de Strouhal con frecuencia dominante de presiones en la base.

Lo expresado para las presiones fluctuantes respecto la alteración del flujo en la abscisa  $x = 4 (h_2-h_1)$  coincide con un descenso brusco de las frecuencias dominantes, que se aprecia en la figura 2, gráfico de números de Strouhal  $S_p = ff[x/(h_2-h_1)]$ . Allí es evidente que para esa abscisa deja de existir una frecuencia dominante, apareciendo espectros de densidad de frecuencia monótonamente decrecientes, representativos de la turbulencia normal en flujos a superficie libre.

## Asimetría de la función de la ley de densidad de probabilidad de amplitudes

El espectro de densidad de potencia determina cómo la energía de una señal se encuentra distribuida en frecuencia, pero no especifica unívocamente la señal en sí. La información acerca de la forma de la onda puede obtenerse de la función de probabilidad de amplitudes de fluctuación o de su derivada, la función densidad de probabilidad, ambas independientes del espectro. Las leyes de distribución asumen en el caso "gaussiano" que las ramas positiva y negativa de la curva son

estrictamente simétricas. Sin embargo, está demostrado que en el caso de presiones fluctuantes en la base de un resalto hidráulico se presenta un efecto de "asimetría" de distribución de la función densidad de probabilidad de amplitudes  $A_d$  o "skewness" definida como:

$$Ad = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} p'^3 P(p') dp'}{\sqrt{p'^2}}$$

que es especialmente importante para determinar la tendencia a la cavitación por pulsos de presión (Lopardo, 2003).

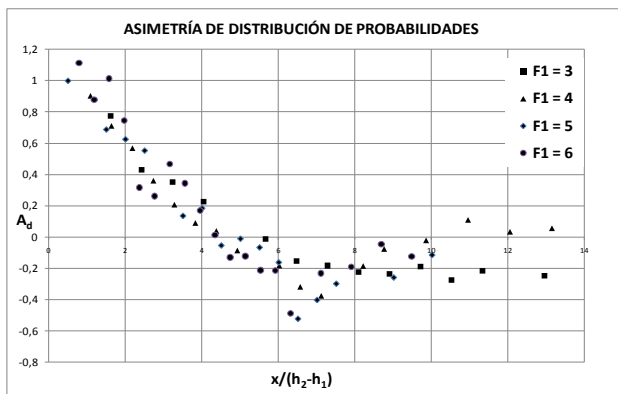


Figura 2.- Asimetría de distribución de probabilidad de amplitudes.

Es interesante observar que la abscisa antes mencionada de  $x = 4 (h_2 - h_1)$  también coincide con el cambio de signo de la asimetría  $Ad$ , que pasa de positiva a negativa, como se presenta en la figura 3 de la función  $Ad = f[x/(h_2 - h_1)]$ , que implica, de acuerdo a lo expresado en anteriores publicaciones (Lopardo y Casado, 2007), un fenómeno de separación de la capa límite respecto del borde sólido en el piso del resalto.

Tomado el tramo efectivamente de interés  $2 < x/(h_2 - h_1) < 11$ , se ha intentado definir una expresión polinómica que contenga la totalidad de los puntos experimentales de  $C'_p$  para  $3 < F_1 < 6$ , con  $X = x/(h_2 - h_1)$  resultando una expresión:

$$C'_p = -2.10^{-5} X^4 + 6.10^{-4} X^3 - 4.9.10^{-3} X^2 + 3.5.10^{-3} X + 0,0725,$$

con un intervalo de confianza  $R^2 = 0,954$ .

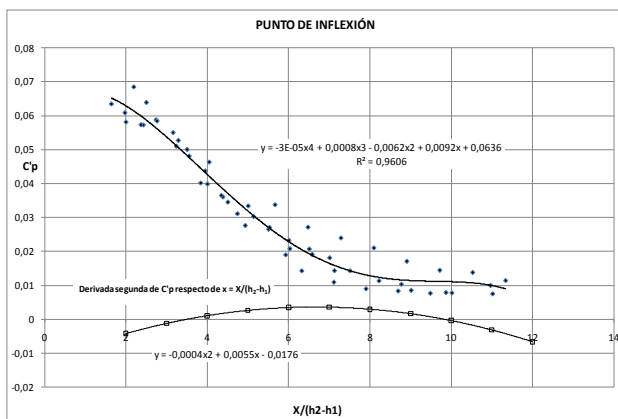


Figura 3.- Derivada segunda de  $C'_p$  en función de  $x/(h_2 - h_1)$ .

Así se ha podido calcular la derivada segunda de la ecuación anterior, que se grafica junto con los puntos experimentales en el tramo de  $x/(h_2 - h_1)$  considerado en la figura 3. Es interesante notar que la derivada segunda de la función se anula para las abscisas 3,9 y 9,2 coincidiendo la primera raíz con el primer punto de inflexión de la curva de presiones instantáneas  $C'_p$ , es decir prácticamente  $x/(h_2 - h_1) = 4$ .

Además, muy probablemente, el efecto físico que se produce en el interior del resalto para esa distancia desde su inicio puede estar vinculado con una disminución sensible de la celeridad de propagación de las ondas de presión sobre el piso, obtenido con mediciones de velocidad de convección con anemómetro Döppler acústico a un centímetro de altura sobre la base del resalto para  $F_1 = 3$  (Lopardo y Romagnoli, 2010) donde también el punto de inflexión es cercano a  $x/(h_2 - h_1) = 4$ .

## Conclusiones

En virtud de diversos estudios experimentales desarrollados sobre resaltos hidráulicos libres y estables se ha podido apreciar que el flujo interno macroturbulento en su interior puede ser dividido en una zona de aguas arriba, dominada por el torbellino de mayor, que presenta una frecuencia dominante y capa límite "pegada" al piso y una zona posterior, en la que el flujo tiene asintóticamente a buscar las condiciones de escurrimiento turbulento normal a superficie libre. De acuerdo con los resultados de las curvas de amplitudes de fluctuación de presiones, asimetrías de distribución de probabilidad de amplitudes, números de Strouhal dominantes obtenidos de espectros de frecuencia y hasta velocidades de convección cercanas al piso del resalto que coinciden en demostrar que esa anomalía se produce para alrededor de una distancia de cuatro veces el "salto" entre tirantes conjugados.

Wang et Al (2015) determinaron que la presión total media en el interior de un resalto libre y estable alcanza el máximo valor en la parte inferior del flujo de corte. Esos autores demostraron que ciertas alteraciones de la superficie libre revelan patrones de deformación que interactúan con la variación de la fracción de vacío instantánea y la presión total en diferentes partes del "roller" y que la oscilación longitudinal del pie del resalto afecta la desaceleración y aireación del flujo de corte próximo a la base, que se asocia con el arrastre de aire al pie del resalto. Si bien la interpretación puede no ser la única, es posible que el fenómeno esté vinculado a la presencia de dos zonas con comportamiento diferente en el interior del resalto que generan distintas condiciones en la base: una aguas arriba de  $x/(h_2 - h_1) = 4$ , que incorpora aire a la masa líquida y otra más allá de esa abscisa, que lo expulsa (Zhang et Al, 2014).

## Referencias bibliográficas

- Lopardo, R.A. (2003): "Cavitación en flujos macroturbulentos", Matematicae Notae, NR Editora, Rosario, Argentina, Año XLII, volumen II, ISSN 0025-552 X, pág. 19-40.
- Lopardo, R.A. y Casado, J.M. (2007). "Boundary layer separation beneath submerged jump flows", en *Harmonizing the Demands of Art and Nature in Hydraulics*, Proceedings of the XXXII IAHR Congress, Venezia, Italy.
- Lopardo, R.A. y Romagnoli, M. (2010). "Velocidad convectiva y ondas de presión en la base de resalto hidráulico libre", Memorias del XXIV Congreso Latinoamericano de Hidráulica, IAHR, Punta del Este, Uruguay.
- Wang, H., Murzyn, F. y Chanson, H. (2015). "Interaction between free-surface, two-phase flow and total pressure in hydraulic jump", *Experimental Thermal and Fluid Science* N° 64, pág. 30-41
- Zhang, W., Liu, M., Zhu, D.Z. y Rajaratnam, N. (2014). "Mean and Turbulent Bubble Velies in Free Hydraulic Jumps for Small to Intermediate Froude Numbers", *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 140, N° 11, pp 1-9.