

**XXV CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA
SAN JOSÉ, COSTA RICA, 9 AL 12 DE SETIEMBRE DE 2012**

INTENSIDAD DE TURBULENCIA EN RESALTOS SUMERGIDOS

Raúl A. Lopardo¹ Mariano De Dios²

¹Instituto Nacional del Agua, Ezeiza, Argentina, e-mail: rlopardo@ina.gov.ar

²Departamento de Hidráulica, Universidad Nacional de La Plata, Argentina

RESUMEN:

El escurrimiento interno en el resalto hidráulico es esencialmente impermanente y se encuentra sujeto a fluctuaciones macroturbulentas de presión y velocidad de carácter aleatorio. El Laboratorio de Hidráulica del INA ha desarrollado una prolongada serie de investigaciones acerca del campo de presiones instantáneas en la base de resaltos libres, sumergidos y forzados mediante la medición con transductores de presión y recientemente determinaciones de velocidades instantáneas utilizando la técnica de ADV. A partir de estos últimos datos se ha propuesto una relación práctica entre intensidad de turbulencia en la cercanía del lecho y el coeficiente C'_p de presiones fluctuantes. El estudio experimental del campo de presiones instantáneas permitió así obtener diversos parámetros estadísticos de amplitud y frecuencia, pero en el presente trabajo sólo se han considerado los valores de fluctuación media cuadrática (desvío estándar) de las amplitudes de presiones y velocidades. De acuerdo con anteriores experiencias ya consolidadas, los ensayos se desarrollaron para números de Reynolds incidentes R_1 por encima de 10^5 y alturas de ingreso al resalto h_1 mayores de 3 cm. Los números de Froude incidentes variaron entre $F_1 = 3$ y $F_1 = 6$, con coeficientes de sumergencia desde $S = 0$ (resalto libre) a $S = 0,6$ (con elevada sumergencia).

ABSTRACT:

The internal flow of hydraulic jump is essentially an unsteady flow subjected to macro turbulent random fluctuations and it was not known enough. The INA's Hydraulic Laboratory developed in the past extensive laboratory research for the instantaneous pressure field determination below free, submerged and forced hydraulic jumps by means of pressure transducers and new introductory experiments on velocity fluctuations by means of the ADV technique. Then, a useful relationship between turbulence intensity near the bed and the pressure fluctuation coefficient C'_p was proposed. The experimental study of the instantaneous pressure field was based on the knowledge of several statistical parameters of amplitudes and frequencies, but for this paper only the root mean square of pressure and velocity amplitudes is considered. Following previous experimental conclusions, the tests were accomplished for incident Reynolds Number R_1 up to 100,000 and incident hydraulic jump depths over 3 cm, for incident Froude Numbers between $F_1 = 3$ and $F_1 = 6$ and submergence coefficients from $s = 0$ (free jump) to $s = 0,6$.

PALABRAS CLAVES: resalto hidráulico, macroturbulencia, sumergencia, intensidad turbulenta.

INTRODUCCIÓN

Numerosos investigadores han estudiado el flujo en resaltos hidráulicos, pero en general se han dedicado al análisis integral del mismo, en particular a todo lo referente a la “hidráulica de los valores medios”, que ha permitido el cálculo de parámetros generales como tirantes conjugados, longitud del resalto y cuantificación macroscópica de la transformación de energía y campo de presiones medias. Sin embargo, aún falta mucho por conocer respecto de flujo interior al resalto y sus características turbulentas.

El escurrimiento interno en el resalto hidráulico es esencialmente impermanente y se encuentra sujeto a fluctuaciones macroturbulentas de presión y velocidad de carácter aleatorio. Luego, para la interpretación del escurrimiento es indispensable aún la investigación experimental acerca de los procesos turbulentos involucrados. El Laboratorio de Hidráulica del INA ha desarrollado desde la década de 1980 una serie de investigaciones que permitieron definir el campo de presiones instantáneas en la base de resaltos libres, sumergidos y forzados mediante la medición con transductores de presión. Recientemente se han efectuado determinaciones de velocidades instantáneas utilizando la técnica de ADV. A partir de experiencias realizadas para resalto libre, se ha propuesto una relación práctica entre intensidad de turbulencia en la cercanía del lecho y el coeficiente C'_p de presiones fluctuantes. En el presente trabajo se amplía el conocimiento de la forma de decaimiento de la turbulencia hacia aguas abajo en resaltos sumergidos producidos aguas abajo de una compuerta de fondo, cuando el nivel de restitución supera al del tirante conjugado h_2 .

La bibliografía acerca de resaltos sumergidos, aún considerando sólo aspectos de carácter macroscópico, resulta ciertamente escasa. Mediante la aplicación de los principios de conservación de la masa y de la energía (Govinda Rao & Rajaratnam, 1963) se ha caracterizado la relación h_3/h_1 (ver Figura 1) en función de dos parámetros adimensionales: el número de Froude incidente al resalto y el coeficiente de sumergencia. El primero se define por la expresión:

$$F_1 = U_1 / \sqrt{g h_1},$$

donde U_1 es la velocidad de ingreso al resalto en la sección conjugada inicial de altura h_1 , y el coeficiente de sumergencia se define como

$$S = (h_r - h_2)/h_2,$$

siendo h_r el nivel de restitución (Figura 1) y h_2 el tirante conjugado de aguas abajo del resalto, válido para resaltos libres con el mismo número de Froude incidente. .

El estudio experimental del campo de presiones instantáneas permitió obtener diversos parámetros estadísticos de amplitud y frecuencia, pero en el presente trabajo sólo se han considerado valores de fluctuación media cuadrática (desvío estándar) de las amplitudes de presiones y velocidades.

Desde un punto de vista macroscópico, es posible considerar la longitud del resalto sumergido como la distancia entre la sección de “vena contracta” inmediatamente aguas abajo de la compuerta de fondo y la sección en que la superficie libre puede considerarse horizontal. Esta definición, que no toma en cuenta los fenómenos de la macroturbulencia y está sólo sujeta a “valores medios temporales” puede adoptarse como una aceptable aproximación, compatible con la resolución del flujo medio. Tal como se ha demostrado experimentalmente (Sauma Haddad, 1992), la sección de ingreso al resalto sumergido puede ser ubicada a una distancia de 1,5 veces la apertura de la compuerta ($x = 1.5 w$).

Por otra parte, resultados experimentales de otros autores (Long et al, 1990) demostraron que el resalto sumergido posee un campo de velocidades tridimensional, con dos vórtices de eje vertical ubicados aguas debajo de la compuerta.

PRESIONES FLUCTUANTES E INTENSIDAD TURBULENTA

La intensidad de turbulencia isotrópica en escurrimientos a superficie libre se expresa habitualmente a través de la relación entre el valor medio cuadrático de la fluctuación de velocidad en la dirección del flujo y el valor medio de la velocidad en el punto considerado:

$$I_t = \frac{\sqrt{u'^2}}{U} . \quad [1]$$

Por otra parte, debido a aspectos de interés estructural, otra forma de expresar esa intensidad de turbulencia puede estar ligada a la fluctuación de presiones en un contorno del flujo, por ejemplo a través del “coeficiente de presiones fluctuantes” C'_p (Lopardo et al, 1982), que se calcula utilizando la expresión siguiente:

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

Mediante el uso de análisis dimensional, para el caso particular de resalto hidráulico sumergido, donde se define como coeficiente de sumergencia $S = (h_s - h_2)/h_2$, es posible obtener los siguientes parámetros para intensidad de turbulencia a un nivel de altura “z” y de fluctuación de presiones en el piso ($z = 0$) respectivamente:

$$I_t = \frac{\sqrt{u'^2}}{U_1} = \Phi_1 [x/(h_2 - h_1), z/(h_2 - h_1), F_1, S] , \quad [3]$$

$$C'_p = \Phi_2 [x/(h_2 - h_1), F_1, S] . \quad [4]$$

La amplitud de fluctuación de presiones en flujo turbulento puede ser derivada a partir del campo de velocidades instantáneas mediante la separación entre variables medias y fluctuantes de la conocida ecuación de Poisson (Favre et al, 1976). Si la turbulencia puede estimarse como homogénea e isotrópica esa relación puede expresarse como:

$$\sqrt{p'^2} = \alpha \rho \overline{u'^2} . \quad [5]$$

donde ρ es la masa específica del líquido y α es un coeficiente adimensional (Batchelor, 1951).

Teniendo en cuenta que la velocidad media U en cada punto está vinculada con la velocidad de ingreso al resalto en la sección conjugada inicial U_1 y ésta tiene relación teórica con la velocidad de la sección de egreso U_2 , pueden utilizarse las siguientes expresiones de cálculo:

$$I_t = \frac{\sqrt{u'^2}}{U_1} = \lambda \sqrt{C'_p} \quad [6]$$

$$\overline{u'^2} / U_2 = (\lambda/2) (\sqrt{1+8F_1^2} - 1) \sqrt{C' p} \quad . \quad [7]$$

A efectos de lograr un acuerdo razonable entre medidas directas e indirectas de intensidad de turbulencia para velocidades cercanas al piso del resalto ($z = 1 \text{ cm}$), se ha propuesto un valor para el coeficiente adimensional $\lambda = 0.6$ (Lopardo y Romagnoli, 2009). Los resultados presentados por esos autores se refirieron exclusivamente al caso de resaltos libres, para dos diferentes números de Froude incidente ($F_1 = 3$ y $F_1 = 5$).

RESULTADOS EXPERIMENTALES

En la Figura 1 se presenta el esquema del equipo experimental utilizado, donde se transcriben las variables mencionadas en cuanto a velocidades y tirantes. Los resaltos hidráulicos libres y sumergidos fueron generados en laboratorio aguas abajo de una compuerta de fondo en un canal rectangular de lecho rígido plano horizontal y paredes de acrílico de 0,65 m de ancho, un metro de profundidad y 12 metros de longitud.

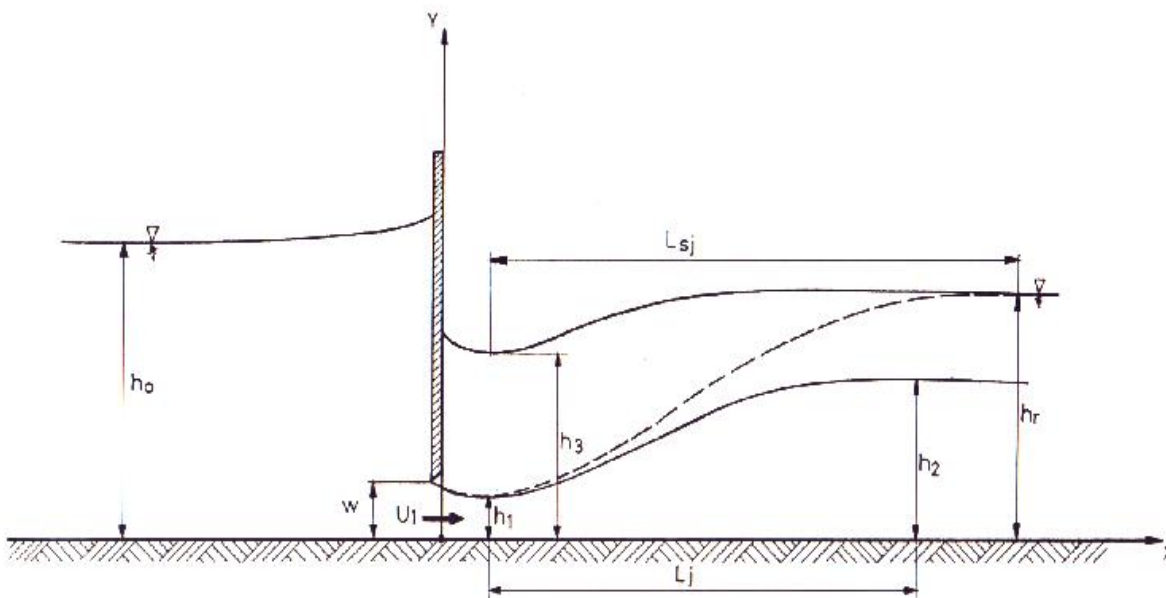


Figura 1.- Esquema experimental utilizado

Para la determinación de la fluctuación media cuadrática de velocidad en la dirección del flujo a 1 cm del fondo se utilizó un micro velocímetro acústico Doppler, ADV (SonTek/YSI®, 16MHz “down looking”) desarrollándose mediciones instantáneas. La longitud de los registros fue de 8192 muestras adquiridas a una frecuencia de 50 Hz. El tiempo de registro representa aproximadamente 500 veces el valor esperado de la macro escala de tiempo en el modelo estimado según la relación entre h_2 y U_2 . Se realizó un extenso análisis sobre la influencia del error Doppler y la estrategia de registro en la determinación de los parámetros turbulentos computados de las series temporales de velocidad (Romagnoli et Al, 2009).

Las presiones instantáneas fueron determinadas en el eje central del piso del canal mediante la utilización de transductores de presión bidireccionales con puente activo de strain-gage. Los registros fueron procesados y analizados mediante la tecnología de muestreo de valores discretos, El intervalo de muestreo adoptado fue de 0,01 segundo, en acuerdo con el teorema de muestreo para datos aleatorios. El número de datos que se consideran en cada punto de medición es de 16.384, pues se toman 34 bloques de 512 valores cada uno. En breve síntesis, el criterio de toma de datos, longitud de tubos de adaptación, detalles técnicos de instrumentación y metodología de análisis estadístico y

espectral de presiones fluctuantes aleatorias ha seguido las normativas adoptadas por el Laboratorio desde hace muchos años (Lopardo y Henning, 1984).

En el Laboratorio de Hidráulica del INA se desarrollaron investigaciones que demostraron la validez de extrapolación a flujos en prototipo de los resultados de presiones instantáneas en resalto hidráulico en laboratorio (Lopardo, 1988), cuando se cumplen las condiciones de números de Reynolds incidentes superiores a 10^5 y aperturas de compuerta mayores de 3 cm. Esas experiencias cubrieron el rango de resaltos con números de Froude incidentes entre $F_1 = 3$ y $F_1 = 6$ y coeficientes de sumergencia de $0.1 < S < 1.1$.

Como la determinación de los valores medios cuadráticos (rms) de fluctuación de presiones no resulta suficiente para los estudios de tendencia a la cavitación o para el cálculo de acciones de levantamiento de losas de cuencos amortiguadores a resalto, en investigaciones posteriores (Lopardo et Al, 2004) se obtuvieron las relaciones entre las deflexiones máximas (tanto positivas como negativas) en relación con la amplitud media cuadrática.

Las determinaciones de presiones instantáneas permitieron observar el comportamiento de la intensidad de turbulencia calculada mediante la expresión [6] para el caso de resalto libre con cuatro diferentes números de Froude incidentes.

La Figura N° 2 ilustra acerca de la forma de la función de ecuación [3] para z constante tendiendo a cero (1 cm del fondo). Allí se aprecia que a partir de una abscisa cercana a $x/(h_2-h_1) = 5$ el decaimiento de la turbulencia se hace más débil para el caso de $F_1 = 3$ respecto de los tres casos restantes, donde se trata de resaltos estables, aunque a cierta distancia ya todas las curvas tienden naturalmente la intensidad propia del flujo uniforme en canales.

En términos generales, podría afirmarse que para una amplia gama de números de Froude incidentes dentro del rango de los resaltos oscilantes y estables el efecto de sumergencia sólo parece distinguirse la curva correspondiente al caso de $F_1 = 3$, que presenta un decaimiento de la turbulencia más lento, lo que sería coherente con esa característica de los resaltos oscilantes, que aún no han desarrollado totalmente su capacidad de disipación macroturbulenta de energía, en relación con la energía cinética incidente.

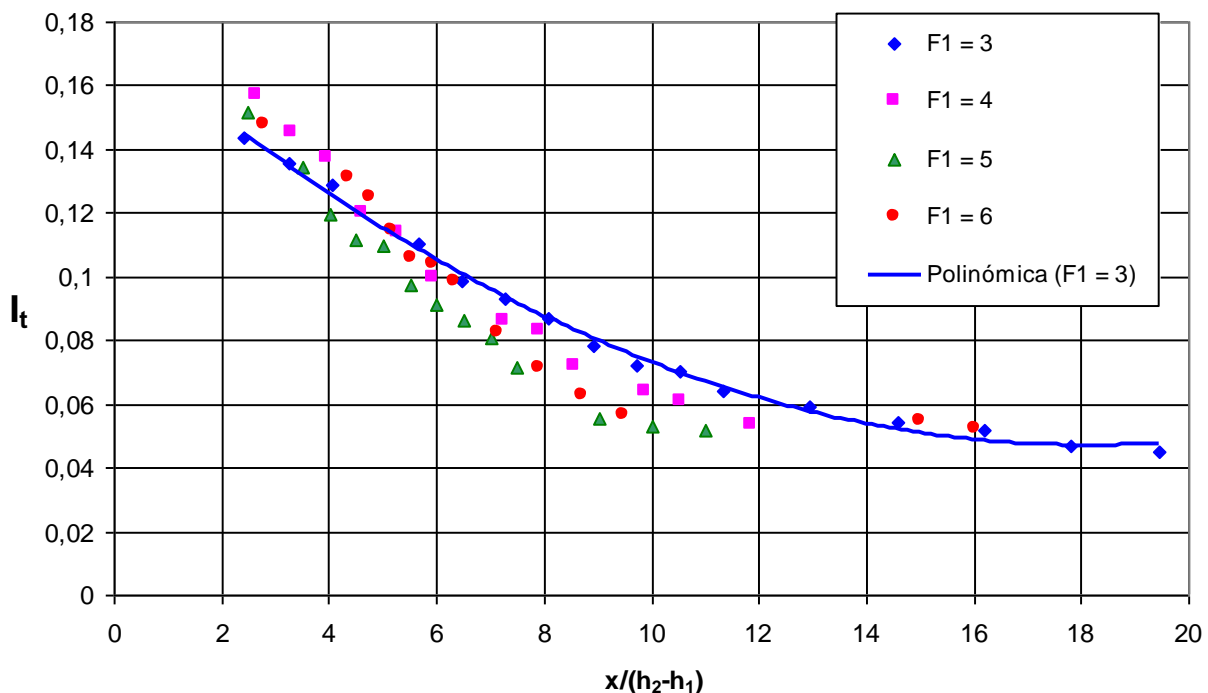


Figura 2.- Intensidad de turbulencia para resalto libre

La Figura 3 ilustra acerca de los resultados de las experiencias con resaltos sumergidos y permite apreciar la influencia de la sumergencia “S” respecto de la intensidad de turbulencia I_t a lo largo de la abscisa $x/(h_2-h_1)$ para el caso de número de Froude incidente $F_1 = 6$.

Es interesante observar que hasta aproximadamente la abscisa $x/(h_2-h_1) = 5$ el resalto libre presenta mayor intensidad de turbulencia que los resaltos sumergidos, mientras que aguas abajo de esa abscisa todo parece equilibrarse sensiblemente.

Es de señalar que aproximadamente para esa abscisa se detecta el fenómeno de separación de capa límite en el piso del resalto sumergido a través de la asimetría de la función de densidad de probabilidad de amplitudes (Lopardo y Casado, 2007).

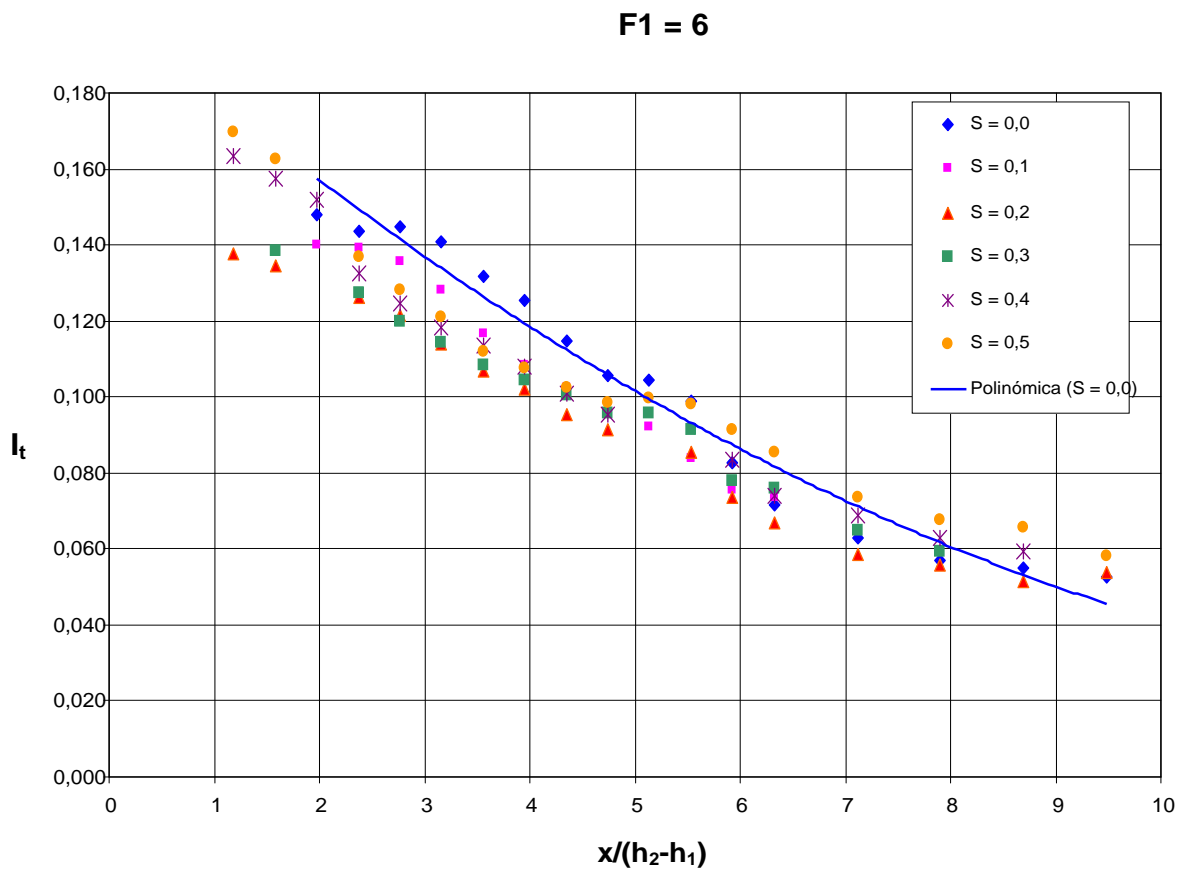


Figura 3.- Intensidad de turbulencia para resalto sumergido con $F_1 = 6$

Otra forma de presentación de los mismos resultados experimentales, considerando una sumergencia constante y variando el número de Froude incidente, se presenta en la Figura 4. Allí es posible apreciar la variación de la intensidad de turbulencia y su decaimiento para una sumergencia dada (en este caso $S = 0,3$) de acuerdo con el número de Froude incidente. Allí se aprecia que en casi la totalidad del tramo de aguas abajo la intensidad es inversamente proporcional a F_1 .

Si se considera el caso de una abscisa $x/(h_2-h_1) = 6$, que es la histórica (y no por ello la más acertada) definición de la longitud del resalto libre, se observa que la intensidad de turbulencia es 71% mayor en el caso de número de Froude incidente $F_1 = 3$ con respecto al valor que se detecta para un número de Froude incidente $F_1 = 6$.

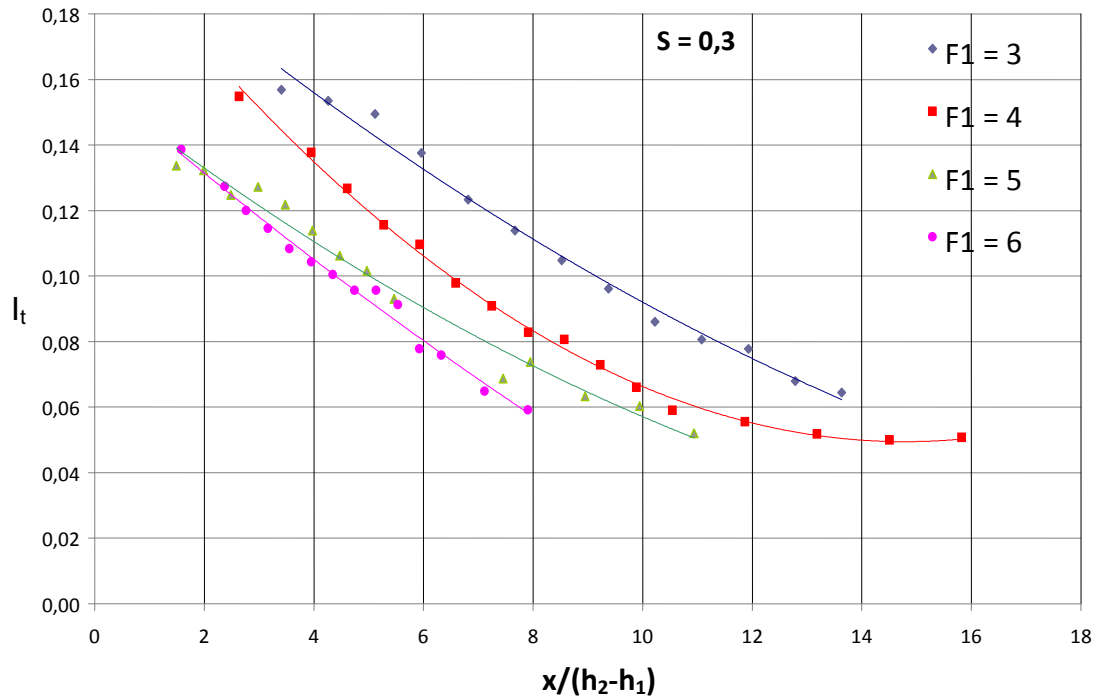


Figura 4.- Variación de la intensidad turbulenta con F_1 para $S = 0,3$

La asimetría de la función de probabilidad de amplitudes es un parámetro que caracteriza el desvío de la misma respecto de la curva normal, en términos de poseer mayor tendencia hacia extremos negativos o positivos más violentos y muestra el grado de distorsión con respecto a la curva gaussiana. Ella puede expresarse como:

$$Ad = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} p'^3 P(p') dp'}{\sqrt{p'^2}} \quad , \quad [8]$$

donde $P(p')$ es a función de densidad de probabilidad de la variable p' , que es la fluctuación de la presión instantánea.

Tal como se adelantara, se ha demostrado que la transición a lo largo del piso del resalto entre valores con asimetrías positivas y negativas implica la posibilidad de registrar el fenómeno de separación del flujo respecto de una pared rígida.

La expresión lineal que sería resultante del primer tramo de la Figura 5 para resalto sumergido con $S = 0,1$ es:

$$Ad = 0,41 - 0,08 [x/(h_2-h_1)] \quad , \quad [9]$$

observándose que se anula para $x/(h_2-h_1) = 5,12$ dentro del orden de magnitud de la distancia para la que se producen los cambios en la estructura del flujo detectados en trabajos previos con relación al despegamiento de la capa límite (Lopardo y Casado, 2007). En caso de ajustarse una expresión polinómica de tercer grado, tal como se grafica en la Figura 5, que incluye los datos de asimetrías

registrados en el piso de resaltos sumergidos para los cuatro números de Froude incidentes estudiados, la asimetría pasa de positiva a negativa para $x/(h_2-h_1) = 4,76$.

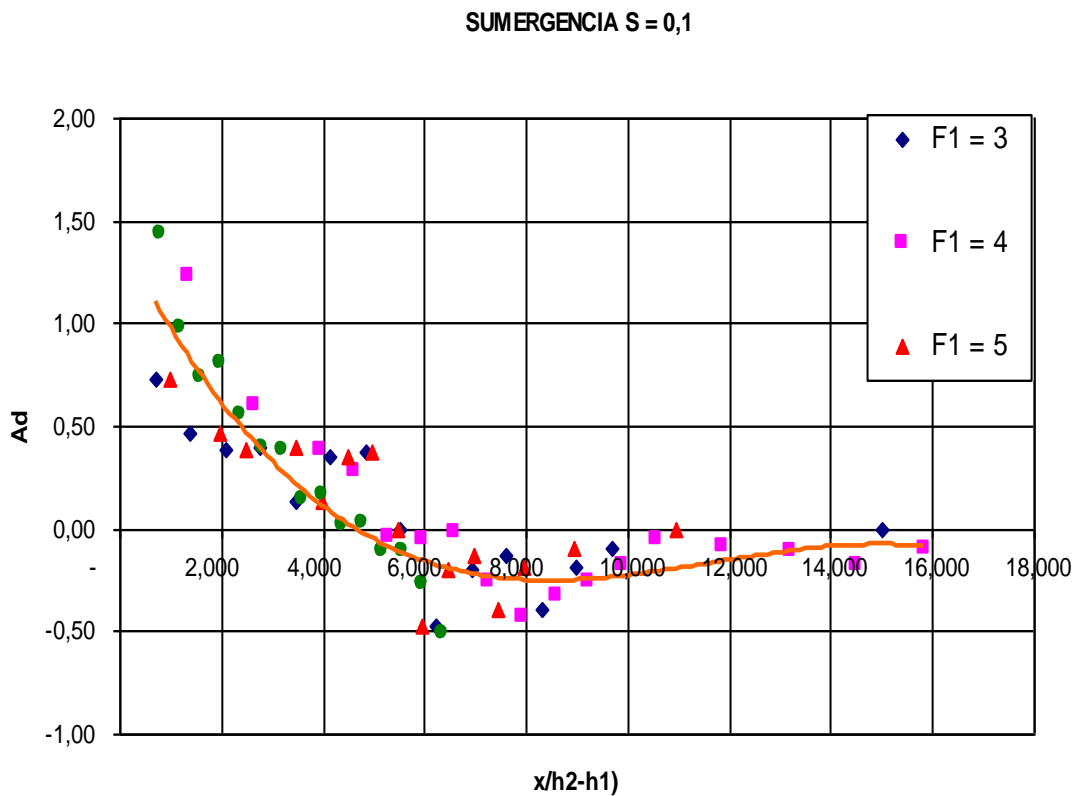


Figura 5.- Asimetría de probabilidad de amplitudes en promedio, para $S = 0,1$

CONCLUSIONES

La aplicación de la ecuación [6] ha permitido extender el conocimiento de la variación de la intensidad de turbulencia aguas abajo de resaltos sumergidos, pudiendo encontrarse tendencias claras tanto para la influencia del número de Froude incidente como de la razón de sumergencia.

Para una sumergencia dada, por ejemplo $S = 0,3$ se ha demostrado que la intensidad de turbulencia en la región de aguas abajo del resalto es sensiblemente decreciente con el número de Froude incidente. Para el número de Froude máximo estudiado en este caso $F_1 = 6$, se observa que la sumergencia disminuye las intensidades de turbulencia en el primer tramo del resalto, hasta aproximadamente $x/(h_2-h_1) \sim 4,5$, donde aparentemente se despega la capa límite del fondo y cambia la estructura del flujo en la parte inferior del resalto.

El resultado obtenido con resaltos libres muestra una tendencia con intensidades de turbulencia mayores para números de Froude más bajos en la región $x/(h_2-h_1) < 5$, que luego se invierte, hasta que para $x/(h_2-h_1) > 12$ ya prácticamente se alcanzan los rangos correspondientes a flujo uniforme a superficie libre. Ello no se puede extender al caso de los resaltos sumergidos.

Es importante destacar que esa intensidad turbulenta a la que se refiere el presente trabajo corresponde a valores de velocidades instantáneas muy cercanas al fondo, donde tienen particular importancia para el análisis de procesos de erosión de lechos aguas abajo de disipadores planos a resalto hidráulico.

Un importante objetivo de esta serie de trabajos experimentales es brindar una adecuada colaboración a los investigadores especializados en hidráulica computacional a través de la publicación de datos que pueden resultar útiles para la calibración o verificación de una nueva etapa de modelos matemáticos que tratan de describir el campo de escurrimientos macroturbulentos.

REFERENCIAS

- Batchelor, G.K.** (1951). "Pressure fluctuations in isotropic turbulence", *Proc. Cambridge Phil. Soc.*, Vol. 47, pp 359-374.
- Favre et al** (1976). *La turbulence en mécanique des fluides*, Gauthiers-Villars, Paris.
- Govinda Rao, N.S. & Rajaratnam, N.** (1963). "The submerged hydraulic jump". *Journal of Hydraulic Division, ASCE*, Vol. 89: pp. 139-162.
- Long, D. et Al.** (1990). "LDA study of submerged hydraulic jump". *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 28, N° 4: pp.437-460.
- Lopardo, R.A.** (1988). "Stilling basin pressure fluctuations". *International Symposium on Model-Prototype Correlation of Hydraulic Structures*. Colorado Springs, USA: pp. 56-73.
- Lopardo, R.A., De Lio, J.C. & Vernet, G.F.** (1982). "Physical modeling on cavitation tendency for macroturbulence of hydraulic jump", *BHRA Proceedings of the International Conference on the Hydraulic Modeling of Civil Engineering Structures*, Coventry, 1982, pp. 109-121.
- Lopardo, R.A. y Henning, R.E.** (1984): "Temas prácticos de la medición y análisis de presiones instantáneas en laboratorio", *XI Congreso Latinoamericano de Hidráulica, IAHR*, Buenos Aires, 1984, Vol. 1, pág. 375-386
- Lopardo, R.A., Fattor, C.A., Lopardo, M.C. Y Casado, J.M.** (2004). "Instantaneous pressure field on a submerged jump stilling basin", en "*Hydraulics of Dams & River Structures*" edited by Farhad Yazdandoost & Jalal Attari, A.A. Balkema Publishers, London U.K., Part I, pp. 133-138.
- Lopardo, R.A. y Romagnoli, M.** (2009). "Pressure and velocity fluctuations in stilling basins", *Advances in Water Resources & Hydraulic Engineering*, Vol. VI, Zhang, C. & Tang, H., Springer Verlag, pp. 2093-2098.
- 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, Venecia, Italia.
- Romagnoli, M., Garcia, C.M. y Lopardo, R.A.** (2009). "Experiencias en la caracterización de la turbulencia en flujos complejos utilizando velocímetros acústicos Doppler (ADV)". *Primer Simposio sobre Métodos Experimentales en Hidráulica*, Villa Carlos Paz, Córdoba, ISBN 978-987-25153-0-0.
- Sauma Haddad, J.C.** (1992). "Resalto sumergido". *Report INCYTH LHA-116-02-92, INA*. Ezeiza, Argentina.