

# ACERCA DE LA LONGITUD DE TRANSICIÓN AGUAS ABAJO DE DISIPADORES A RESALTO EN OBRAS DE BAJA CAÍDA

Martín Romagnoli<sup>(1),(2)</sup> y Raúl A. Lopardo<sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup>CONICET, CURIHAM-FCEIA, UNR <sup>(2)</sup>Instituto Nacional del Agua – INA  
E-mail: romagnolmartin@yahoo.com.ar - rlopardo@ina.gov.ar

## RESUMEN

Se presenta una investigación experimental en laboratorio acerca de la longitud de transición aguas abajo de resaltos hidráulicos libres de bajo número de Froude. Para tal fin se ha utilizado un micro velocímetro acústico Doppler (ADV) para efectuar mediciones de velocidades instantáneas en el plano vertical central de un canal rectangular sobre una zona comprendida desde el fin del resalto hasta alcanzar el régimen uniforme en canales abiertos. Basados en observaciones del comportamiento del campo medio de velocidades y de intensidades de turbulencia relativas, el régimen uniforme aguas abajo de un resalto hidráulico libre con número de Froude de ingreso  $2 < F_1 < 5$ , alcanzaría a desarrollarse completamente a una distancia aproximada, desde el pie del resalto, de 20 veces  $(z_2 - z_1)$ . Sin embargo, a los efectos prácticos, la “zona de transición” que requeriría de protecciones aguas abajo de un cuenco disipador a resalto estaría comprendida desde el fin del cuenco, que protege habitualmente un tramo de longitud 6  $(z_2 - z_1)$  hasta una distancia de 16 a 20 veces  $(z_2 - z_1)$ , de acuerdo con los riesgos a asumir y la calidad del terreno a proteger.

## ABSTRACT

An experimental laboratory study of the transition region downstream free hydraulic jumps of low Froude numbers is presented. A micro acoustic Doppler velocimeter (ADV) was used to record time signals of the water velocity in the flume centerline at different locations from the end of the jump until the flow reach the uniform open channel regime. Based on the behavior of the mean velocity field and turbulence intensities, the uniform open channel flow regime downstream hydraulic jumps of incident Froude number  $2 < F_1 < 5$ , would be reached in a distance, from the toe of the jump, approximately equal to 20 times  $(z_2 - z_1)$ . However, in practical sense, the length of the transition region that would have to be protected downstream hydraulic jump stilling basin would be delimited from the end of the basin 6  $(z_2 - z_1)$  to a length of 16 to 20 times  $(z_2 - z_1)$ , depending on the soil quality and the risk assumed by the project.

## INTRODUCCIÓN

En la República Argentina existen numerosas obras hidráulicas de baja caída cuyos aliviaderos poseen disipadores de energía basados en el fenómeno de resalto hidráulico. Gran parte de esas obras, muy especialmente las de mediano y menor porte, vinculadas a control de crecidas y derivación para riego, fueron construidas con anterioridad a la década del setenta. El diseño hidráulico de esas estructuras fue efectuado con las mejores técnicas disponibles en su momento, sobre la base de una "hidráulica de los valores medios", superada a partir de la introducción de técnicas para una "hidráulica de los valores instantáneos", especialmente relevante para el caso de los aliviaderos de crecidas.

Si los cuencos amortiguadores de hormigón armado han sido correctamente dimensionados de acuerdo con las “reglas del arte” (Peterka, 1962), su longitud cubre la totalidad del resalto, definida habitualmente a partir de consideraciones macroscópicas (Lopardo et al., 2004), por lo que en general el proyectista asume que el proceso de disipación de energía está limitado al tramo revestido del cauce y no deberían esperarse entonces procesos erosivos sensibles aguas abajo del mismo.

Sin embargo, es bien conocido por los especialistas en Ingeniería de Ríos que el proceso de disipación de energía dista de finalizar en esa longitud determinada macroscópicamente, pues en la sección final de la misma subsisten intensidades de turbulencia que superan ampliamente las que pueden asociarse a flujo uniforme y permanente en canales abiertos (Marques et al., 1997). Por ello, en gran cantidad de casos prácticos, es necesario utilizar elementos de protección de lecho y márgenes en una zona, que podría llamarse “de transición” en la que la intensidad de turbulencia del flujo decrece hasta los niveles propios de cauces naturales.

En consecuencia, el objetivo del presente trabajo es determinar la extensión de dicha zona de transición, a través de observaciones del campo instantáneo de velocidades y, de esta manera, contribuir en lo posible a la formación de criterios para el dimensionamiento de los elementos de protección que este tipo de obras requieren. En general las obras de baja caída, de importancia en hidráulica fluvial, poseen cuencos amortiguadores con bajos rangos de números de Froude de ingreso. En este sentido, se ha considerado de interés cubrir estados dentro del rango  $2 < F_1 < 5$  que corresponde a los llamados “resaltos oscilantes”, donde el fenómeno que se pretende poner en evidencia en este trabajo presenta mayor importancia.

## INSTALACIÓN EXPERIMENTAL Y METODOLOGÍA

El trabajo experimental se desarrolló en el Laboratorio de Hidráulica del Instituto Nacional del Agua sobre un canal horizontal de sección rectangular con escurrimiento de agua a superficie libre. Sus medidas aproximadas son de 0,65 m de ancho por 1,00 m de alto y 12,00 m de longitud. La sección de ensayos, con una longitud aproximada de 3,50 m, se caracteriza por estar construida totalmente en acrílico. En su comienzo, dicha sección posee una compuerta plana con descarga de fondo que permite la formación del resalto hidráulico aguas abajo. Luego de la sección de ensayos y una distancia aproximada de 3,50 m se encuentra la compuerta para regulación de niveles de restitución en el interior del canal. Las condiciones de ensayo son detalladas en la tabla 1 que se adjunta.

**Tabla 1.-** Detalles del experimento. ( $z_1$  y  $z_2$  tirantes conjugados del resalto,  $U_1$ ,  $F_1$  y  $Re_1$  velocidad, número de Froude y número de Reynolds medio al ingreso del resalto respectivamente,  $Q$  caudal)

$z_1$ (cm)	$U_1$ (m/s)	$F_1$	$z_2$ (cm)	$Q$ (l/s)	$Re_1$
4,48	3,24	4,88	26,71	94,25	1,45e+05
4,48	2,01	3,03	16,96	58,50	9,00e+04
4,48	1,41	2,12	12,04	40,92	6,30e+04

En todos los ensayos la abertura de la compuerta fue 0,07 m. El pie del resalto se localizó en la sección de máxima contracción, en consecuencia el tirante conjugado supercrítico  $z_1$  fue 0,0448 m ( $z_1=0,64 a$  donde  $a$  es la abertura de compuerta, Ohtsu y Yasuda, 1994). El tirante conjugado subcrítico  $z_2$  fue medido mediante una punta limnimétrica a una distancia de 6,00 m aguas abajo de la compuerta. La velocidad media al pie del resalto  $U_1$  fue variada con el fin de obtener diferentes números de Froude de ingreso  $F_1=U_1/(g \cdot z_1)^{0.5}$ , de 4,88, 3,03 y 2,12, donde  $g$  es la aceleración de la gravedad. El rango de número de Reynolds de ingreso estudiado,  $Re_1=U_1 \cdot z_1/\nu$  donde  $\nu$  es la viscosidad cinemática, fue  $63.000 < Re_1 < 145.000$ .

Se utilizó un micro velocímetro acústico Döppler – ADV (SonTek® 16MHz “down looking”) para obtener mediciones instantáneas del vector velocidad sobre el plano vertical central del canal en diferentes posiciones en una distancia que comprende el final del resalto y su transición hacia el régimen uniforme en canales abiertos. La longitud de los registros fue de 8192 puntos adquiridos a una frecuencia igual a 50 Hz. La totalidad de las series registradas presentaron un valor de relación señal ruido (SNR) mayor a 15 db.

Las series de velocidad fueron filtradas a través del “Phase Space Threshold Despiking Method” (Goring y Nikora, 2002) modificado por Wahl (2003) utilizando el aplicativo WinADV. En este sentido, los resultados no se han visto modificados de manera relevante en comparación con los datos crudos, pues las condiciones de ensayo desde el punto de vista de los niveles de concentración de aire e intensidad de turbulencia son favorables. Luego, los valores de varianza fueron corregidos debido a la presencia de ruido Döppler por medio del “método espectral” (Voulgaris y Trowbridge, 1998; Romagnoli y Lopardo, 2006). Recomendaciones acerca de optimizar la capacidad de este tipo de instrumentos para describir la turbulencia se encuentran en García et al. (2005). Los valores del parámetro adimensional:

$$F = fs \cdot L / U_c, \quad (1)$$

donde L es la escala de los grandes vórtices,  $U_c$  la velocidad convectiva y  $fs$  la frecuencia de adquisición, se encuentran dentro de un rango aceptable y en consecuencia no se llevaron a cabo correcciones por efecto de la estrategia de adquisición.

## RESULTADOS

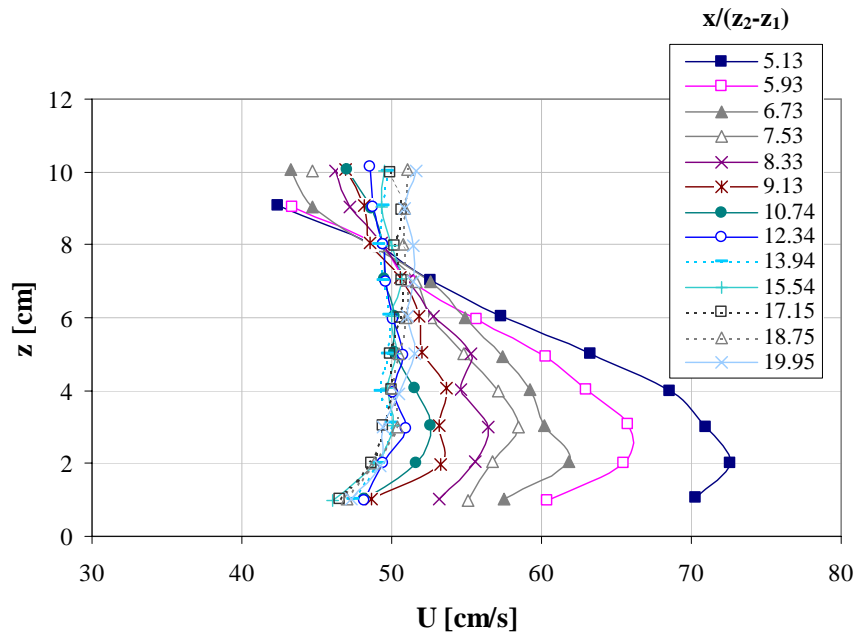
La figura 1 presenta perfiles de velocidades medias (para  $F_1 = 3,03$ ) en la cual U y W son las velocidades en las direcciones longitudinal y vertical respectivamente, z es la distancia en la vertical medida desde el fondo y x la distancia en horizontal medida desde el pie del resalto.

Es interesante observar de la figura 1a, en posiciones coincidentes con el fin del resalto, como el perfil de velocidades en la dirección longitudinal se asemeja al perfil de velocidades característico de un jet de pared. En cuanto se incrementa x, el perfil abandona esta característica y su valor máximo tiende a desplazarse en dirección hacia la superficie, adoptando la forma típica de un perfil de velocidades en un canal abierto en régimen uniforme y permanente.

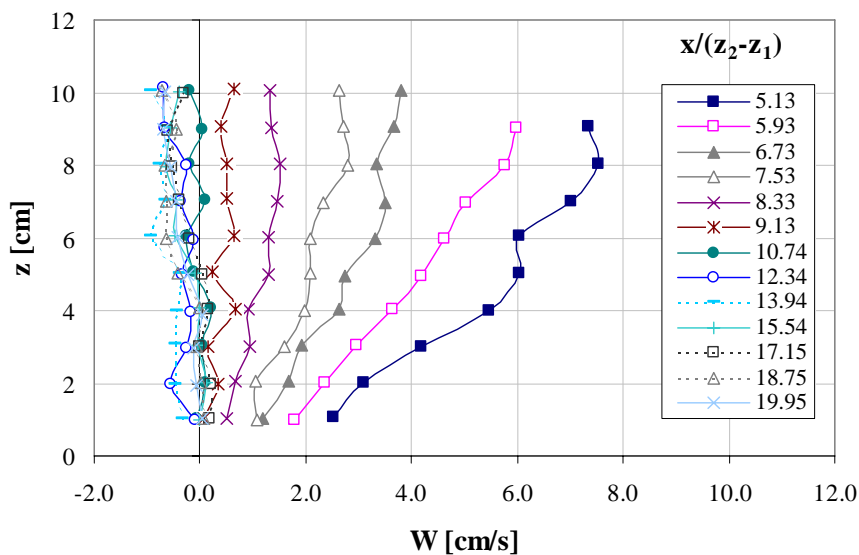
En relación con la velocidad en la dirección vertical W (figura 1b), es posible destacar que los perfiles en posiciones correspondientes al fin del resalto evidencian la ocurrencia de un movimiento bi-direccional ascensional en el plano central y, además, con mayores valores de W una vez que la distancia al fondo z aumenta. Con el incremento de la distancia x, los valores de velocidad W disminuyen y tienden a asumir un valor constante, en función de z, casi nulo en las últimas secciones donde se presume que el régimen uniforme ha sido alcanzado.

Esta modificación gradual observada en el perfil de velocidades medias, con el aumento de la distancia en x, es una de las características que presenta el régimen de flujo en la zona de transición y bajo la cual, además de otras como variación de tensión de corte en el fondo e intensidad de descarga, se basan Wu y Rajaratnam (1996) para su delimitación.

Sin embargo, y aquí radica el aporte del presente trabajo, otro aspecto interesante acerca de la zona de transición es el comportamiento de la intensidad de turbulencia relativa  $u'/U$ , en la cual  $u'$  es el valor de la raíz del valor medio del cuadrado de las fluctuaciones y  $U$  es la velocidad media local en la dirección longitudinal respectivamente.



a) Perfiles de velocidad media  $U$  en la dirección longitudinal.



b) Perfiles de velocidad media  $W$  en la dirección vertical.

**Figura 1.-** Perfiles de velocidad en la zona de transición,  $F_1=3,03$ ,  $x$  es la distancia en horizontal desde el pie del resalto y  $z$  la distancia en vertical desde el fondo.

En la figura 2 se muestran los resultados correspondientes a intensidad de turbulencia relativa  $u'/U$  en función de la distancia adimensional  $x/(z_2-z_1)$  en los números de Froude de ingreso  $F_1$

investigados en el presente trabajo, para dos valores de alturas  $z/z_2$  diferentes, en torno a 0,18 y 0,30.

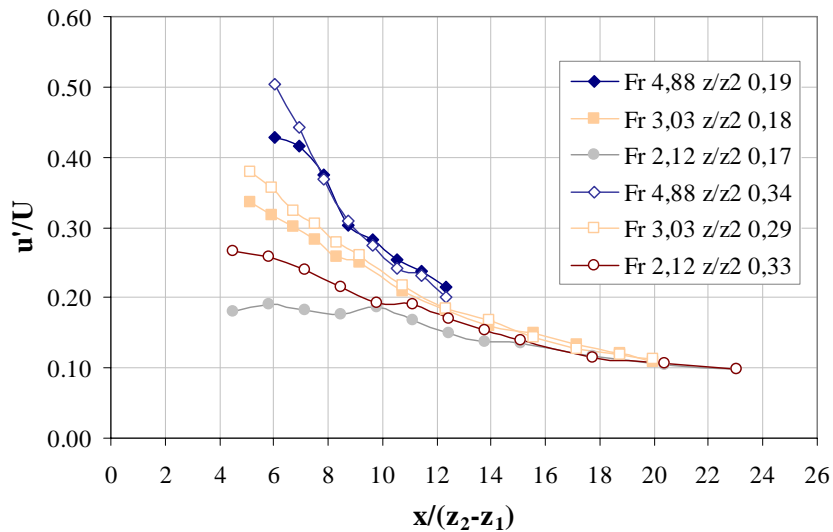


Figura 2.- Decaimiento de la intensidad de turbulencia relativa en la zona de transición.

De la figura anterior es posible observar diversas características interesantes además del decaimiento general de la intensidad de turbulencia relativa conforme la distancia en horizontal  $x$  aumenta.

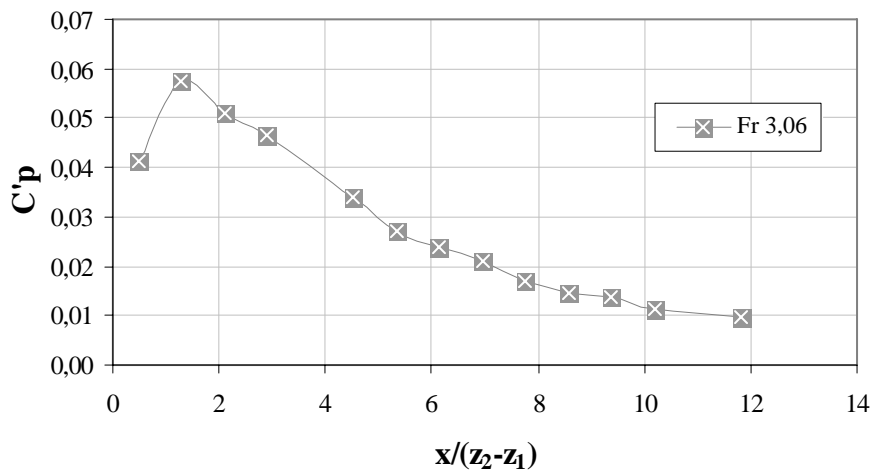
En las secciones próximas al final del resalto, en torno a  $x/(z_2-z_1)$  igual a 6, la intensidad de turbulencia relativa aumenta conforme lo haga el número de Froude de ingreso. Sin embargo, en torno de un valor aproximado de 10 a 12 veces  $(z_2-z_1)$ , esta diferencia entre valores de intensidad de turbulencia relativa para los distintos números de Froude de ingreso aquí estudiados comenzaría a perder relevancia.

Luego, a medida que  $x/(z_2-z_1)$  continua aumentando, las curvas se comportan de manera casi asintóticas en un valor de intensidad de turbulencia relativa igual a 0,10 independientemente del número de Froude de ingreso. Este valor de intensidad de 0,10 está de acuerdo con los valores de intensidad de turbulencia relativa reportados por Blinco y Partheniades (1971) para canales a superficie libre con fondo liso en alturas  $0,1 < z/z_2 < 0,3$ .

En los estudios efectuados para presiones instantáneas en la base de resalto hidráulico libre (es decir con sumergencia nula), para número de Froude  $F_1=3,06$  es posible observar que para valores del coeficiente de presiones fluctuantes  $C'_p$ , definido como:

$$C'_p = \frac{\sqrt{p'^2}}{\rho \frac{U_1^2}{2}}, \quad (2)$$

donde  $p'$  es la fluctuación de presión en torno a la media,  $U_1$  la velocidad media al pie del resalto y  $\rho$  la masa específica, la rama descendente de la curva  $C'_p = f [x/(z_2-z_1)]$  (figura 3) aún no alcanza a estabilizarse asintóticamente al valor constante  $C'_p = 0.01$  para distancias  $x/(z_2-z_1)$  del orden de 12 (Lopardo et al, 2004).



**Figura 3.-** Decaimiento del coeficiente de presiones fluctuantes en la base del resalto.

## CONCLUSIONES

Basados en observaciones de perfiles de velocidades medias y de intensidades de turbulencia relativas, el régimen uniforme y permanente en un canal aguas abajo de un cuenco disipador a resalto alcanzaría a desarrollarse completamente, para los números de Froude de ingreso  $F_1$  aquí estudiados, a una distancia aproximada de 20 veces  $(z_2 - z_1)$  medida desde el pie del resalto.

Para el rango de números de Froude analizados, habituales para disipadores de energía de presas de baja caída, no parece ser ese parámetro adimensional una variable relevante, cuya influencia se haya detectado claramente en los resultados experimentales obtenidos.

Este valor es algo superior al reportado por Wu y Rajaratnam (1996) de 17 veces  $(z_2 - z_1)$  para un rango de  $3,8 < F_1 < 10,5$ , basado en resultados de tensiones de corte en el fondo, intensidad de descarga y perfiles de velocidades medias.

Sin embargo, a los efectos prácticos, la “zona de transición” que requiere de protecciones aguas abajo de un cuenco a resalto libre estaría comprendida desde el fin del cuenco, asumido como 6 veces  $(z_2 - z_1)$ , hasta un rango de 16 a 20 veces  $(z_2 - z_1)$ , de acuerdo con los riesgos a asumir y la calidad del terreno a proteger.

***Agradecimiento.** Se agradece el aporte institucional del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) y de la Universidad Nacional de Rosario. También a los profesionales y técnicos del Laboratorio de Hidráulica Aplicada del Instituto Nacional del Agua por la ayuda y consejos brindados.*

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\rho$ : masa específica del agua  
 $a$ : abertura de la compuerta  
 $C'_p$ : coeficiente de presiones fluctuantes

F: número adimensional  
 $F_1$ : número de Froude de ingreso  
 fs: frecuencia de adquisición  
 g: aceleración de la gravedad  
 L: escala de los grandes vórtices  
 $p'$ : fluctuación de presión en torno a su media temporal  
 Q: caudal  
 $Re_1$ : número de Reynolds de ingreso  
 U: velocidad media en la dirección longitudinal  
 $u'$ : raíz cuadrada del valor medio del cuadrado de las fluctuaciones  
 $U_1$ : velocidad media al ingreso  
 $U_c$ : velocidad convectiva  
 W: velocidad media en la dirección vertical  
 x: distancia en horizontal desde el pie del resalto  
 z: distancia en vertical desde el fondo  
 $z_1$ : tirante conjugado supercrítico  
 $z_2$ : tirante conjugado subcrítico  
 $\nu$ : viscosidad cinemática

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Blinco, P. H. & Partheniades, E.** (1971) "Turbulence characteristics in free surface over smooth and rough boundaries" *Journal of Hydraulic Research*, vol. 9, n 1, pp 43-69.
- García, C. M.; Cantero, M.; Niño, Y. & García, M. H.** (2005) "Turbulence measurements with acoustic Doppler velocimeters" *Journal of Hydraulic Engineering*. ASCE Vol. 131, n 12, pp. 1062-1073.
- Goring, D. G. & Nikora, V. I.** (2002) "Despiking Acoustic Doppler Velocimeter Data". *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, vol 128, n 1, 117-126.
- Lopardo, R. A.; Fattor, C. A.; Casado, J. M. y Lopardo, M. C.** (2004) "Una aproximación por turbulencia remanente de la longitud del resalto sumergido" *XXI Congreso Latinoamericano de Hidráulica*. São Pedro, Brasil.
- Marques, M. G.; Drapeau, J. e Verrette, J. L.** (1997) "Flutuação de pressão em um resalto hidráulico" *XVII Congreso Latinoamericano de Hidráulica*, Guayaquil, Ecuador.
- Ohtsu, I. & Yasuda, Y.** (1994) "Characteristics of supercritical flow below sluice gate". *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, vol 120, n 3, 904-921.
- Peterka, A. J.** (1962) "Hydraulic design of stilling basins and energy dissipators" Engineering Monograph N° 25, USBR, Denver, USA.
- Romagnoli, M. y Lopardo, R. A.** (2006) "Influencia del ruido sobre parámetros estadísticos de la turbulencia en anemometría Doppler acústica" *XXII Congreso Latinoamericano de Hidráulica*, Ciudad Guayana, Venezuela.

**Voulgaris, G. & Trowbride, J. H.** (1998). "Evaluation of the Acoustic Doppler Velocimeter (ADV) for Turbulence Measurements". *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, vol. 15, pp. 272-289.

**Wahl, T. L.** (2003). Discussion of "Despiking Acoustic Doppler Velocimeter Data" by Goring, D. G. and Nikora, V. I. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, vol 129, n 6, 484-488.

**Wu, S. & Rajaratnam, N.** (1996). "Transition from hydraulic jump to open channel flow". *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, vol. 122, n. 9, pp. 526-528.