

# ESTABILIDAD DE ENROCADOS AGUAS ABAJO DE DISIPADORES A RESALTO

Raúl Antonio Lopardo y José Miguel Casado

Instituto Nacional del Agua (INA) C.C. 46 (1802) Aeropuerto Ezeiza, Argentina E-mail: rlopardo@ina.gov.ar

## Introducción

El diseño de disipadores de energía de obras hidráulicas desde un punto de vista global y macroscópico ha merecido numerosas investigaciones en el pasado cercano. Se cuenta así con los elementos básicos para el cálculo del resalto y se dispone de una profusa bibliografía técnica respecto de los disipadores convencionales, que incluye manuales de diseño aparentemente completos. Sin embargo, a partir de valores instantáneos de velocidades y presiones del flujo se puede discutir en cierta medida la representatividad de esa visión macroscópica del tema. El presente estudio no tiene por objetivo discutir las fórmulas de longitud de resaltos, que fueran ya tratadas en una publicación reciente (Lopardo et al, 2004). Allí se expone que el cálculo de la longitud del resalto mediante la expresión más actualizada (Noor Afzal & Bushra A., 2002) resulta para cualquier número de Froude incidente superior en un 15% de respecto de la conocida y universalmente aplicada fórmula de Smetana.

La longitud del resalto es una variable particularmente relevante para aspectos de economía y seguridad de la obra. En vertederos de ancho considerable, el ahorro de varios metros en la longitud de la platea de hormigón armado, que a menudo por su fuerte sollicitación debe ser acompañada de importantes anclajes, resulta de singular importancia en la relación beneficio-costos de la obra total. Por ello, es habitual que la platea sea llevada a su mínima longitud compatible con los cálculos, completándose la protección del lecho habitualmente con enrocados.

Del mismo modo, los márgenes del eventual canal de salida del cuenco amortiguador tienden a ser protegidas con esos materiales para evitar erosiones que puedan desviar el flujo de la dirección requerida por el proyectista. Dentro de las metodologías habituales de cálculo de los diámetros estables de esos enrocados de protección, se consideran parámetros obtenidos de valores del flujo medio, que no son otros que los que se utilizan para la determinación de las longitudes de cuenco, en particular la velocidad media en la salida del resalto  $U_2$  y el tirante del escurrimiento aguas abajo  $h_r$ , que puede o no coincidir con el conjugado  $h_2$ . Debido a lo expuesto, es necesario tomar en consideración los parámetros del flujo fluctuante para una adecuada definición de los enrocados estables de protección en esa zona fuertemente sollicitada por acciones fluctuantes aguas abajo de disipadores de energía.

## Objetivos

Partiendo del conocimiento actual de las características de velocidad y presión del flujo macroturbulento en la región inmediatamente posterior al que fija la longitud del resalto (asumiendo que se ha diseñado el cuenco con esa dimensión mal llamada "teórica"), se propone obtener órdenes de magnitud de los materiales de protección del lecho en relación con los estimados habitualmente.

Ellos se obtienen mediante una expresión experimental propuesta para el escurrimiento en canal (que supone intensidades de turbulencia por debajo de  $K_v = 0.01$ ).

## Metodología empleada

La turbulencia residual aguas abajo de un resalto libre ha sido interpretada por la intensidad de turbulencia  $K_v$  (Kalis, 1969). Para el caso de turbulencia aguas abajo de resaltos libres, en una zona definida por el entorno  $0.9 \leq x/L_r \leq 1.1$  (Lopardo et al, 1984). Puede aplicarse la fluctuación de presiones definida por el parámetro  $C'p$  definido como:

$$C'p = \frac{\sqrt{p'^2}}{\rho \frac{U_1^2}{2}} \quad [1]$$

que permite estimar la intensidad turbulenta mediante la expresión:

$$K_v = 0.41(\sqrt{1 + 8F_1^2} - 1)\sqrt{C'p} \quad [2]$$

En virtud de los resultados experimentales (Lopardo et al, 1988) es posible obtener en función del número de Froude incidente el coeficiente de intensidad turbulenta  $K_v$  para la sección final del resalto estable:

$$K_v = 0.36(F_1 - 1)^{0.55} \quad [3]$$

Los órdenes de magnitud de variación de las velocidades instantáneas en relación con las velocidades medias hacen pensar que ese efecto puede ser en gran medida responsable de la inevitable falla de las protecciones de enrocado aguas abajo de cuencos amortiguadores a resalto, para condiciones de escurrimiento muchas veces muy inferiores a las de diseño.

Por otra parte, si se asume que la protección de enrocado de diámetro uniforme  $d_s$  sobre un lecho plano a la acción de una corriente normal a superficie libre puede ser calculada a partir de ecuaciones convencionales, entre ellas una de sencilla estructura (a efectos de evaluar sólo a posteriori la influencia del flujo macroturbulento) que se propone (Lopardo, 1976) como extensión de protecciones de márgenes para ángulo de talud nulo:

$$d_s = 0.28 V^3 h^{-1/2} [g(s-1)]^{-3/2} \quad [4]$$

Con esa expresión, en la que "h" es el tirante líquido, "V" la velocidad media en la sección y "s" la relación de pesos específicos entre sólido y agua, resulta posible estimar la relación entre la relación tirante a diámetro ( $h/d_s$ ) y el número de Froude del enrocado definido como:

$$F_G = V / [g(s-1) d_s]^{1/2} \quad [5]$$

La relación entre  $F_G$  y  $h/d_s$  fue presentada hace casi treinta años y no se asume que es la más ajustada a los valores de la realidad, pero ha cumplido su función razonablemente, salvo en regiones donde la intensidad de turbulencia supera los rangos normales.

A partir de las experiencias de presiones y velocidades fluctuantes aguas abajo de resaltos libres y sumergidos se ha considerado posible vincular la velocidad media máxima instantánea de escurrimiento (obtenida de la suma de la velocidad media más la que surge de la intensidad de la turbulencia) para determinar una nueva relación entre  $F_G$  y  $h/d_s$ .

Debe tenerse presente que la intensidad de turbulencia está definida por la amplitud media cuadrática y no por el verdadero máximo valor de amplitud, que según Kalis puede triplicarlo. Si bien a partir de los estudios de presiones fluctuantes en flujos macroturbulentos inducidos por resalto hidráulico se ha detectado que ese apartamiento es diferente para distintos números de Froude incidentes al resalto se confirma que la semiamplitud máxima negativa de presión supera en esos rangos a la media cuadrática.

**Resultados**

En virtud de las experiencias de presiones fluctuantes ha sido posible constatar con cierto grado de razonabilidad el comportamiento de la ecuación [3] para un rango de números de Froude incidentes entre 2 y 9, tal como puede apreciarse en la Figura N° 1. En esa misma figura se ha representado la relación entre el diámetro estable representativo de una protección en flujo macroturbulento  $d_s$  y el correspondiente diámetro estable para flujo con turbulencia normal  $d_{s0}$  para la misma velocidad media y tirante líquido de escurrimiento.

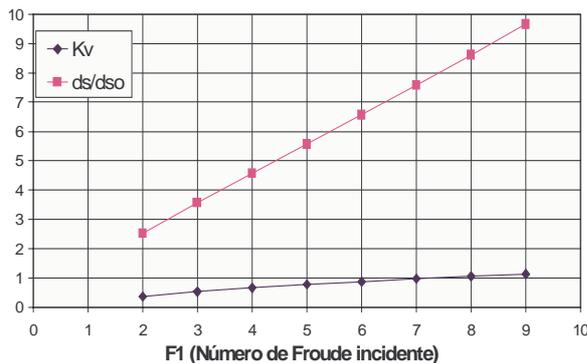


Figura 1.- Turbulencia al final del resalto ( $x = L_r$ )

A partir de esos resultados, y tomando en cuenta una mayoración de la velocidad de cálculo (asumiendo un valor instantáneo igual a la suma del valor medio más el medio cuadrático de fluctuación) es posible efectuar un análisis preliminar, tendiente a determinar el orden de magnitud de los diámetros de enrocado de protección necesarios para lechos planos aguas abajo de disipadores a resalto libre y resalto sumergido.

La Figura N° 2 ilustra acerca de la diferencia entre las relaciones tirante/diámetro con el número de Froude de enrocado, según se calculen para flujo con turbulencia normal o para flujo macroturbulento para número de Froude de ingreso al resalto  $F_1 = 6$ .

Finalmente, se presenta la Figura N° 3 a efectos de evaluar la incidencia de la macroturbulencia sobre el diámetro estable para un caso particular, en el que el número de Froude al resalto es  $F_1 = 6$ , para una velocidad media de egreso al resalto  $V = 2\text{m/s}$ .

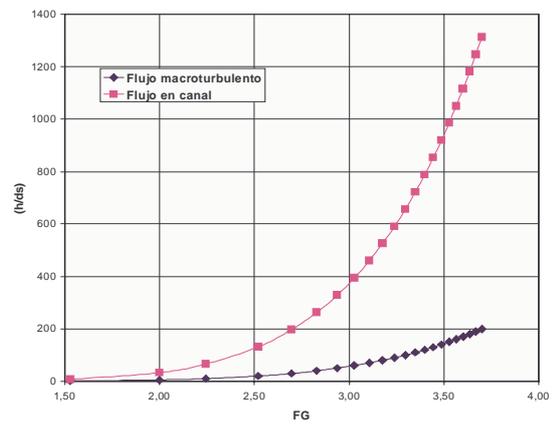


Figura 2.- Estabilidad de enrocados para  $F_1 = 6$  ( $x = L_r$ )

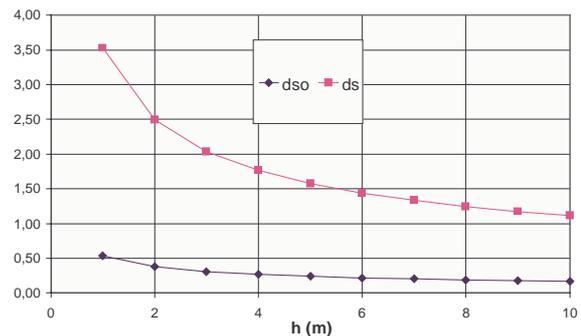


Figura 3.- Diámetros estables para  $V = 5\text{ m/s}$

**Conclusiones**

Se estima haber puesto de manifiesto la relevancia de tomar en cuenta los valores fluctuantes del flujo en la determinación de diámetros estables aguas abajo de resalto, resultando valores varias veces superiores a los del cálculo tradicional.

**Referencias Bibliográficas**

Kalis, J. (1961): "Diminution de la turbulence derrière le ressaut", IX IAHR International Congress, Dubrovnik, proc. paper J11.

Lopardo, R.A. (1976): "Cálculo práctico de enrocados para protección de márgenes", Anales del VI Congreso Latinoamericano de Hidráulica, IAHR, Santiago, Chile, 1976, Vol. I, pág. 429-440.

Lopardo et Al. (1984): "Algunas experiencias sobre velocidades instantáneas en el egreso de un resalto hidráulico", XI Congreso Latinoamericano de Hidráulica, IAHR, Buenos Aires, Vol. 2, pág. 601-612.

Lopardo, R.A. et Al. (1988): "Energía cinética turbulenta aguas abajo de disipadores a resalto", XIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, IAHR, La Habana, Cuba, Vol. 4, pág. 171- 181.

Lopardo, R.A. et Al. (2004): "Una aproximación por turbulencia remanente de la longitud del resalto sumergido", XXI Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Sao Pedro, Brasil, Paper G362,

Noor Afzal & Bushra A. (2002): "Structure of the turbulent hydraulic jump in a trapezoidal channel", Journal of Hydraulic Research, IAHR, Vol 40, N° 2, pág. 205-214.