

## MODELOS FÍSICOS DE ATAGUÍAS DE ENROCADO EN EL LABORATORIO DE HIDRÁULICA DEL INA

Raúl A. Lopardo y J. Daniel Bacchiega

Instituto Nacional del Agua

Ecasilla de Correo 46, 1802 Aeropuerto Ezeiza, Teléfono 4480 9162

E-mail: rlopardo@ina.gov.ar - Web: http://www.ina.gov.ar

E-mail: simposio@rios.net.ar - Web: http://www.simposio.rios.net.ar/

### Introducción

El estudio de la "hidrodinámica de enrocados" se inició en la década de 1970 y configuró una línea de investigación y desarrollo fuertemente aplicada, nacida por la necesidad de dar respuestas concretas y generar una tecnología propia en la materia, refiriéndose fundamentalmente al cierre de cauces fluviales con materiales sueltos.

El objeto de los estudios de cierres fluviales es determinar la configuración más conveniente de las obras a construir, de acuerdo con las características hidrológicas e hidrodinámicas del río, teniendo en cuenta las condiciones particulares del lugar y la naturaleza de los materiales utilizables. Si no se toman en cuenta sistemas muy ingeniosos pero muy particulares, pueden distinguirse dos sistemas de cierre por volcado de materiales sueltos: a) el corte por elevación progresiva de un macizo por capas horizontales (normal dump method) de manera de elevar los depósitos de material sobre el lecho en todo el ancho de la brecha final y b) el cierre por avance a partir de las márgenes, es decir por tramos verticales, donde el espigón progresa transversalmente al río, partiendo de una o de ambas riberas.

La motivación inicial de esta investigación surgió de los estudios sobre modelo físico del cierre del río Uruguay para la construcción de la presa de Salto Grande, que abrieran con su posibilidad de verificación entre prototipo y modelo varios temas de interés que se estudiaron sucesivamente. Se desarrolló un análisis general de estabilidad de enrocados durante etapas de cierre de grandes ríos, se elaboró y publicó un criterio original de cálculo de tamaño de rocas para el caso de cierres por avance lateral (Lopardo, R.A. & Zarate, F.J., 1975), se demostró y cuantificó la influencia del ritmo de volcado sobre la factibilidad de cierres (Lopardo, R.A. 1976) y se propusieron fórmulas empíricas sencillas para cálculos aproximados (Lopardo, R.A. 1976 b). Por otra parte, el aporte sustantivo de estos estudios experimentales resultó más importante que las publicaciones, pues generó la independencia tecnológica en ese tema, permitiendo que un equipo de investigación argentino adquiriera el conocimiento, la experiencia y el prestigio necesarios para poder desarrollar exitosamente en el país los estudios sobre modelo físico tendientes a verificar y optimizar estrategias y metodologías de cierre y desvío de cauces fluviales en proyectos de la envergadura de Salto Grande, Arroyito, Alicura, Yacyretá, Piedra del Águila y Corpus.

En la actualidad, el estudio sobre modelo de cierre del río Bío Bío para la construcción de la presa de Angostura, en Chile, con un cauce estrecho y complejas condiciones hidrológicas demuestra la vigencia de esta especialidad y la importancia de la experiencia acumulada en el laboratorio con ejemplos de los dos tipos de cierre mencionados y con uso de materiales naturales y artificiales. Así pudo determinarse que aún mediante el uso de grandes macizos de hormigón prefabricados el cierre del cauce para caudales importantes no era factible, recomendándose el cierre con enrocado en estiaje.

### Cierres sobre el Uruguay, Limay y Paraná

Las fotografías N° 1 y N° 2 ilustran acerca de la comparación prototipo-modelo (una actividad iniciada en el país con este proyecto) de la segunda etapa de desvío del río Uruguay durante la construcción de la presa de Salto Grande. La empresa constructora obtuvo importantes beneficios en tiempo y costo verificando en el modelo físico la posibilidad de utilización de diferentes tamaños de protección para diferentes lugares geométricos de las ataguías y para caudales menores a los de diseño, según fuera el desarrollo de los trabajos en obra. El modelo general de la obra fue reproducido en escala 1:125 pero se desarrollaron estudios de detalle en modelo físico a escala 1:50, fundamentalmente respecto del comportamiento del vertedero a cota de cresta rebajada, en tercera etapa de desvío. El modelo también demostró en este caso la necesidad de disminuir la cota de esa cresta rebajada, a efectos de garantizar el cierre de la última etapa con materiales sueltos disponibles en la zona de obra.



Figura N° 1. Modelo del río Uruguay en Salto Grande



Figura N° 2. Cierredel río Uruguay en Salto Grande

Las escalas entre 1:60 y 1:65 fueron seleccionadas para los estudios sobre modelo de desvío del río Limay en Alicura,

Piedra del Águila, y posteriormente para el modelo de la presa de Michihuao (aún no construida) en virtud de las características del material del lecho del río y evitar la presencia en el modelo de material muy fino.

Este problema se detectó en un estudio anterior a los mencionados, correspondiente a la presa compensadora de El Chocón en Arroyito, sobre el mismo cauce del Limay donde la escala 1:100 presentó algunas dificultades de simulación de rugosidad del lecho por presencia de rizos parásitos inducidos en el modelo.

Probablemente la experiencia más importante del Laboratorio de Hidráulica en el tema de cierre de ríos y etapas constructivas de grandes obras fue la vinculada con la presa de Yacyretá. En efecto, en colaboración estrecha con el consorcio de firmas constructoras se definieron tras más de dos años de estudios, las estrategias fundamentales para desviar sucesivamente los dos brazos del río Paraná, el denominado Brazo Principal, con el 70% de caudal del río, y el Brazo Aña Cuá, con aporte del 30% restante. El río Paraná tiene un caudal medio de 14.800 m<sup>3</sup>/s en ese emplazamiento y la crecida máxima probable es del orden de 95.000 m<sup>3</sup>/s. Es una zona de bajas pendientes y anchos cauces, típica de los grandes ríos de llanura. El Brazo Principal tiene un lecho de espesor importante conformado por arenas finas (de diámetro representativo  $d_s = 0,3$  mm) y el Brazo Aña Cuá con una delgada capa rocosa sobre un gran manto de arena. El caudal de diseño de las obras de desvío se fijó en 30.000 m<sup>3</sup>/s.

Entre las más importantes restricciones para la definición de la estrategia debe destacarse que las características de los materiales utilizables en la zona de la obra eran tales que el cierre debía realizarse con un tamaño máximo de enrocados de 0,80 m. Por otra parte, el ancho inicial de la brecha final sobre el Brazo Principal se fijó en 1.000 metros. Fueron necesarios varios estudios desarrollados en modelos matemáticos y modelos físicos para definir la estrategia de cierre del río más adecuada. Si bien esos estudios fueron verificados para la crecida de diseño  $Q_p = 30.000$  m<sup>3</sup>/s, se realizaron ensayos para optimizar las condiciones de cierre para caudales en prototipo de 23.000 m<sup>3</sup>/s, 16.000 m<sup>3</sup>/s y 10.000 m<sup>3</sup>/s. Se implementó un modelo matemático general de la zona, incluyendo ambos brazos, a efectos de establecer correctas condiciones de borde a los modelos físicos de cada uno de los mismos. De esta forma, se definieron los objetivos particulares de cada uno de los cinco modelos físicos. Otros modelos matemáticos, incluyendo detalles, se utilizaron para definir otras posibilidades alternativas de cierre. En realidad, se analizaron las tres posibles alternativas para este caso: método por avance lateral de ataguía, método de recrecimiento uniforme desde el lecho (normal dump method) y una combinación de los dos anteriores.

Finalmente, durante la etapa final del cierre de la brecha de un kilómetro, se verificó el cierre mediante la técnica de "recrecimiento constante desde el lecho", utilizando una cinta transportadora de 1,60 m de ancho y un sistema de distribución de enrocados que garantizaba la elevación de la ataguía de manera absolutamente uniforme en todo el ancho de brecha. La capacidad de transporte de la cinta era de 2.000 toneladas por hora y era capaz de llevar hasta 400 Kgr con diámetros de 0,9 m. La empresa adoptó finalmente este criterio y materializó el cierre dentro de las condiciones que especificaba el modelo físico. (Lopardo et al. 2001).

Sólo en el caso del cierre del Paraná en Yacyretá se permitió la pérdida de material volcado por arrastre del flujo. Sin embargo, en todos los casos se ha simulado en escala el ritmo de aporte del material (volcado de camiones y empuje por bulldozer) siguiendo el criterio de semejanza de la cadencia de aporte (Lopardo, 1976 b).

## Algunas expresiones de cálculo

Dentro de las investigaciones básicas desarrolladas en los comienzos de estas investigaciones se menciona el cálculo del diámetro estable para un talud de enrocado:

$$\frac{U}{\sqrt{g \cdot (s-1) \cdot D}} = 1.3 \cdot \left(\frac{h}{D}\right)^{\frac{1}{6}} \cdot \left(1 - \left(\frac{\sin \theta}{\sin \phi}\right)^2\right)^{\frac{1}{4}}$$

Donde  $U$  es la velocidad media,  $s$  la relación de pesos específicos entre roca y agua,  $h$  el tirante,  $D$  el diámetro estable,  $\theta$  el ángulo del talud y  $\phi$  el ángulo de reposo del material. Esta expresión tiene su caso particular sobre "talud nulo", que es cresta de ataguía horizontal.

Además, se ha desarrollado la metodología de cálculo para predecir la pérdida de volumen de enrocado  $\Delta W/W$  respecto del arrojado en cierre por avance, en función del número de Froude de enrocado  $F_G$  (primer término de la ecuación anterior) y de la cadencia de aporte  $X$ , definido como:

$$X = \frac{C_\Omega}{\sqrt{g \cdot (s-1)}}$$

donde  $C_\Omega$  es el volumen por unidad de tiempo depositado  $C$  dividido por el área transversal de ataguía  $C_\Omega = C/\Omega$  (s-1).

## Conclusiones

La dificultad de prever con certeza la influencia de los diversos parámetros que intervienen en este proceso físico justifica con rigor los estudios en modelo reducido, cuando los caudales tengan cierta importancia o el desnivel final supere un metro y medio.

Los estudios sobre modelo físico de construcción de ataguías bajo agua desarrollados en el INA han permitido no sólo dar condiciones de seguridad en esta etapa crítica de la construcción de grandes presas, sino además en la mayoría de los casos han conseguido reducir los costos de obra, utilizando materiales adecuados para cada caudal en diferentes puntos de la ataguía que se desarrolla.

## Referencias Bibliográficas

- Lopardo, R.A. & Zarate, F.J., 1975:** "Sur l'entraînement d'enrochements pendant les opérations de fermeture d'un fleuve", *Proceedings XVI IAHR Congress*, São Paulo, Brasil, Vol. 2, pág. 307-314.
- Lopardo, R.A. 1976:** "Hipótesis de interpretación del ritmo de aporte en un cierre fluvial", *Anales del VII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, IAHR*, Santiago, Chile, Vol. I, pp. 419-428.
- Lopardo, R.A., 1976 b:** "Stabilité d'enrochements pour angle de talus nul", *Electricité de France*, Rapport E-43-76-12, Chatou, Francia.
- Lopardo, R.A., De Lío, J.C., Bacchiega, J.D. & Fattor, C.A., 2001:** "Hydraulic aspects related to Yacyretá hydroelectric development", *Proceedings of Special Seminar SS2 "Key hydraulic issues of huge-water projects"*, XXIX IAHR Congress, Beijing, China, pág. 22-31.