



HIDRÁULICA FLUVIAL: PROCESOS DE EROSIÓN Y SEDIMENTACIÓN, OBRAS DE CONTROL Y GESTIÓN DE RÍOS
Hector Daniel Farías, José Daniel Brea, Carlos Marcelo García (Editores)

Memorias del Quinto Simposio Regional sobre HIDRÁULICA DE RÍOS
Santiago del Estero, Argentina. 2-4 Noviembre de 2011
ISBN 978-987-1780-05-1 (Libro + CD-ROM)

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

Raúl A. Lopardo y J. Daniel Bacchiega

Instituto Nacional del Agua
Autopista Ezeiza-Cañuelas Km 1,62 (1904), Ezeiza, Email: rlopardo@ina.gov.ar

RESUMEN

La investigación sobre hidrodinámica de enrocados en el INA surgió de los estudios sobre modelo físico del cierre del río Uruguay para la construcción de Salto Grande y tuvo un aporte sustantivo, pues generó la independencia tecnológica en ese tema, permitiendo que un equipo argentino pudiera desarrollar exitosamente en el país los estudios sobre modelo físico de cierre y desvío de cauces fluviales en proyectos de la envergadura de Salto Grande, Arroyito, Alicura, Corpus, Piedra del Águila y Yacyretá, sobre el que se efectúa un breve resumen. En la actualidad, el estudio sobre modelo de cierre del río Bio Bio 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 uso de materiales naturales y artificiales. Los estudios sobre modelo físico de construcción de ataguías bajo agua 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 construye.

ABSTRACT

The first motivation for the experimental research on rockfill hydrodynamics at the INA's Hydraulic Laboratory was the physical model study of the Uruguay River closure for Salto Grande Dam construction. The main importance of these basic experiments was the contribution to allow the technological independence in this subject, making possible for a local team the successful development in Argentina the physical model studies for the river closure and dam construction works for the main hydroelectric projects, as Salto Grande, Arroyito, Alicura, Corpus, Piedra del Águila y Yacyretá. For the last one a brief summary is presented. Nowadays, the physical model study of the Bio Bio River closure for the Angostura Dam construction in Chile, with a narrow stream course and complex hydrological conditions, demonstrates the validity of this kind of models and the necessity to have a long laboratory experience in model studies of river closures with natural and artificial materials. INA's model studies allowed not only provide safety conditions for this critical stage of the construction, but also contribute to reduce construction costs, suggesting the best materials for each discharge and cofferdam position.

PALABRAS CLAVE: Modelos físicos, cierres fluviales, enrocados, ataguías

INTRODUCCION

El cierre de un río para desviar su curso y poder desarrollar la construcción de una presa es uno de los puntos críticos que debe enfrentar el ingeniero en la construcción de una obra hidráulica. Para lograr un diseño y una estrategia de cierre y desvío en un curso fluvial debe determinarse 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.

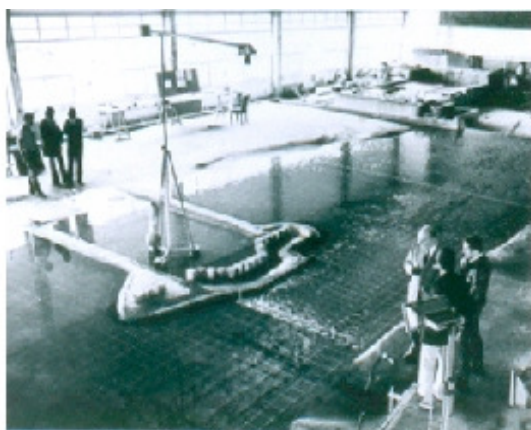
Los métodos de materialización son variados. Si no se toman en cuenta sistemas muy ingeniosos pero muy particulares (Bayard, 1964), pueden distinguirse dos sistemas de cierre por volcado de materiales sueltos: a) el corte por elevación progresiva de un macizo por capas horizontales (normal dump method) 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. Los materiales utilizados pueden ser diversos, tales como tierra, arena, enrocado, bloques de hormigón, tetrápodos o gaviones, puesto que la operación de cierre presenta muy disímiles condiciones hidráulicas y económicas en cada caso.

La cantidad de factores físicos y externos que inciden en este proceso es muy numerosa. La dificultad de prever con razonable seguridad la incidencia con que cada parámetro participará en el fenómeno y la necesidad de dotar al constructor de un plan de operaciones seguro y ajustado a las distintas condiciones naturales posibles justifican con rigor la necesidad de verificación y optimización de las estrategias elegidas mediante la técnica de modelación física en escalas apropiadas. Estos estudios tienen particular importancia para las empresas constructoras en cuanto a seguridad y economía. El estudio experimental de la "hidrodinámica de enrocados" requerida por cierres fluviales de grandes ríos se inició en la República Argentina a principios de 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.

La motivación inicial surgió de los estudios sobre modelo físico del cierre del río Uruguay para la construcción de la presa de Salto Grande, que abriera con su posibilidad de verificación entre prototipo y modelo varios temas de interés que se estudiaron sucesivamente (Lopardo et Al, 1975). 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, Yacuyretá, Piedra del Águila y Corpus.

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.



Fotografías 1 y 2: Modelo y prototipo de segunda etapa de desvío del río Uruguay en Salto Grande

MODELACIÓN FÍSICA DE ESCURRIMIENTOS A SUPERFICIE LIBRE

Para describir el escurrimiento unidimensional de un líquido a superficie libre, en régimen impermanente y gradualmente variado, es habitual el uso de la conocida ecuación de Saint-Venant:

$$V \frac{\partial V}{\partial s} + \frac{\partial V}{\partial t} = g i - g \frac{\partial h}{\partial s} - g j ,$$

donde i es la pendiente de la superficie libre (h/L) y j la pendiente de la línea de energía (J/L). A esa pérdida unitaria de energía puede estimársela mediante la expresión de Chézy:

$$j = U^2 / C^2 R ,$$

en la que " C " es el coeficiente de Chézy, lamentablemente no adimensional y " R " es el radio hidráulico, que se define como la relación entre el área de escurrimiento y el perímetro mojado del mismo. En caso de aplicarse escalas a la ecuación de Saint

Venant, habida cuenta de la expresión de Chézy, se obtienen las siguientes igualdades:

$$e_v^2/e_L = e_v/e_t = e_g \quad e_i = e_g \quad e_h/e_L = e_v^2/e_C^2 \quad e_L.$$

Si se admite la condición $e_g = 1$ y el modelo no es distorsionado ($e_i = 1$) resultan:

$$e_v^2 = e_L, \quad e_v = e_t, \quad e_h = e_L \quad \text{y} \quad e_v^2 = e_C^2 \quad e_L.$$

De la primera y la última igualdades se deduce fácilmente la necesidad de cumplir con la condición $e_C = 1$, es decir que los coeficientes dimensionales de Chézy deben ser los mismos en prototipo y en modelo. Para el uso práctico del coeficiente de Chézy se han propuesto numerosas fórmulas siendo la más utilizada, por su carácter monomio, la llamada expresión de Manning $C = R^{1/6}/n$, donde "n" es el coeficiente de rugosidad de Manning, que tampoco es adimensional. Aplicando escalas a la expresión anterior resulta $e_C = e_L^{1/6}/e_n$, y siendo $e_C = 1$ para cumplir con la semejanza dinámica, resulta una escala de coeficientes de rugosidad de Manning $e_n = e_L^{1/6}$.

Tomando el ejemplo de un modelo en escala 1:50 ($e_L = 50$), la escala de coeficientes de rugosidad de Manning sería $e_n = e_L^{1/6} = 1,92$, por lo que un curso fluvial que en la naturaleza tuviera un coeficiente $n_p = 0,025$ necesitaría ser simulado en modelo físico mediante un material que asegurara contar con $n_m = 0,013$, valor que es fácilmente obtenible con una superficie de hormigón. El caso analizado corresponde a un típico ejemplo de modelo de Froude sin distorsión, válido siempre que se puedan despreciar en prototipo y modelo los efectos viscosos y capilares.

SIMULACIÓN DEL FONDO MÓVIL EN LA BRECHA

La presencia de un lecho aluvial en un cauce fluvial involucra modificaciones trascendentes en el escurrimiento e implica un análisis especial del fenómeno de erosión y depósito de materiales sólidos por las corrientes líquidas. Naturalmente, la modelación física de los efectos hidráulicos vinculados a corrientes con fondos móviles requiere de una muy especial atención y plantea difíciles caminos de solución, en los que inexorablemente será necesario efectuar ciertos compromisos, de acuerdo con la naturaleza de los fenómenos y objetivos del estudio. En caso de modelos de cierres fluviales resulta necesario considerar la similitud del proceso de "iniciación de arrastre".

El arrastre de una partícula en un lecho fluvial sometidas a la acción de una corriente depende de numerosas variables, fundamentalmente de las características del material sólido, de la naturaleza del fluido, de las características dinámicas del escurrimiento y de las fuerzas de masa actuantes sobre las partículas: a) las características del material del lecho, a priori complicada, pueden ser representadas por tamaños característicos de la curva granulométrica, por ejemplo un diámetro representativo d_s , b) la naturaleza del fluido, dada por su capacidad de difundir cantidad de movimiento, está interpretada con la mal llamada "viscosidad cinemática" ν , c) las características dinámicas del escurrimiento, en cuanto a su acción sobre el lecho fluvial, pueden resumirse en dos variables fundamentales: el tirante h la velocidad de corte sobre el lecho v_* definida como $v_* = \sqrt{(\tau_o/\rho)}$, donde "i" es la pendiente del escurrimiento y d) las fuerzas de masa, acciones externas de atracción que pueden considerarse aplicadas en el centro de gravedad de las partículas actuantes, se resumen

en la llamada “gravedad relativa” g ($s-1$), siendo $s = \rho_s/\rho$ la relación entre masas específicas del sólido y del líquido, que aparece sistemáticamente como variable representativa en los casos de flujos a dos fases, teniendo en consideración el peso sumergido.

Luego, aplicando análisis dimensional, la función que interpreta el fenómeno de iniciación de arrastre de partículas sólidas de un lecho fluvial podría ser expresada por:

$$\Phi [Y, R_*, d_s/h, s] = 0,$$

donde $Y = v_*^2 / [g (s-1) d_s]$ y el parámetro $R_* = d_s v_*/\nu$.

El “parámetro de movilidad del grano” Y es de singular importancia pues involucra las acciones externas sobre la masa del grano sólido sumergido y tiene la estructura de un “número de Froude de corte del grano”. El parámetro R_* se denomina habitualmente “número de Reynolds de corte del grano” y tiene en cuenta la influencia de la capa límite en el fenómeno de arrastre, dejando de ser relevante cuando las fuerzas viscosas a ese nivel pueden despreciarse. De acuerdo con la tradicional curva de Shields, la influencia de este parámetro sólo puede ser despreciada a partir de $R_{*p} > R_{*m} > 70$, pues a partir de ese orden de magnitud el parámetro de movilidad Y permanece razonablemente constante. La relación d_s/h , que corresponde al tercer parámetro adimensional del fenómeno, indica que la escala de diámetros debe ser la misma que la de alturas líquidas (escala de longitudes verticales), es decir $e_{ds} = e_h$. Es conocido en hidráulica fluvial que las formas de fondo (por ejemplo la altura y forma de los rizos en un lecho móvil) dependen fuertemente de la relación tirante-diámetro (h/d_s). En consecuencia, el incumplimiento de esa condición trae aparejada una distorsión en las formas de fondo del modelo, sean dunas, rizos o bancos de sedimentos, que tiene particular incidencia en las condiciones de resistencia al escurrimiento. El parámetro adimensional “ s ”, que surge de la relación entre masas específicas de sólido y líquido, debe tenerse presente que involucra los efectos de inercia en el escurrimiento. En efecto, si en un modelo físico se prevé la aparición de fuertes aceleraciones o deceleraciones del flujo, será preferible mantener en él la misma relación “ s ” que corresponde al prototipo, es decir que tiene que haber una única escala de densidades.

En caso de cierres fluviales con escalas generosas, será posible asegurar la condición de irrelevancia del número de Reynolds de corte del grano $R_{*p} > R_{*m} > 70$, pero será inevitable hacer cumplir la igualdad de los otros tres parámetros adimensionales de modo que necesariamente resulta $e_{v*} = e_h^{1/2}$. En estos modelos en particular, se representa el material del lecho del río (en general grava) con material granular del mismo peso específico en el modelo (arena) cuya curva granulométrica corresponda a la disminución proveniente de la escala de longitudes del modelo ($e_{ds}=e_L$), pues el modelo de obras no será distorsionado. En caso de cumplirse todas las hipótesis mencionadas, los resultados finales de erosión y deposición obtenidos en el modelo serán válidos tanto en cuanto a sus valores finales como en sus resultados transitorios. En estos modelos es habitual un material de lecho en modelo de diámetro razonablemente constante (arena uniforme), cumpliendo con la condición de igualdad de escalas de diámetros y longitudes para el valor de d_s (d_{50}).

Es importante destacar que los modelos a fondo móvil, además de cumplir con la ley de Froude y la de simulación de iniciación de arrastre, deben satisfacer las reglas de

semejanza de las pérdidas de energía por rugosidad del cauce. Los efectos del rozamiento del flujo sobre el lecho son generados por algunas causas de distinto origen: la variación de las condiciones geomorfológicas del cauce, tales como presencia de meandros, brazos, cambios de sección, etc., la presencia de formas de fondo (dunas, rizos, barras, etc.) y la rugosidad propia de la altura de los granos componentes del lecho del río. Para reproducir las pérdidas de carga del prototipo, el modelo debe respetar la ley de similitud de rozamiento, pudiendo aplicarse a tal efecto $n = d_{90}^{1/6}/\xi$, siendo d_{90} el diámetro del grano equivalente al tamaño de la malla del tamiz que permite el pasaje del 90% de la muestra y ξ una constante que tiene distintos valores según diferentes investigadores. Sin entrar en debate en cuanto al valor numérico de la constante, queda claro que a efectos del análisis de similitud la escala de ξ debe ser unitaria. Como $e_n = e_L^{1/6}$, en definitiva se obtiene que $e_{d90} = e_L$, es decir que debe mantenerse la igualdad de escalas de diámetros d_{50} y d_{90} con la escala de longitudes.

Habiéndose analizado el diámetro medio y el diámetro d_{90} , que tiene en cuenta los mayores granos, falta definir algunos aspectos de la porción más fina de la muestra. En tal sentido, es interesante destacar que el diámetro mínimo d_{\min} de la curva granulométrica representada en el modelo debe satisfacer una condición tal que garantice la imposibilidad de generación de rizos parásitos. En efecto, si bien en el prototipo para materiales sueltos pueden no haber formación de rizos, la disminución de dimensiones de la muestra en el modelo esté en condiciones de producirlos, alterando notoriamente las formas de fondo y aumentando la rugosidad del cauce fuera de escala. Para asegurar que tal fenómeno no se produzca, es necesario en general cumplir con la condición siguiente $d_{\min} \geq 15 \mathbf{D}^{*1/3}$, donde $\mathbf{D}^* = v^2/(\rho_s g)$.

ALGUNAS EXPERIENCIAS DE MODELOS DE CIERRES

Así como el estudio de Salto Grande resultó determinante para la definición de cierre por avance lateral con materiales estables en un río de cauce rocoso, prácticamente no erosionable, los cierres de obras sobre el Limay tuvieron que tener en consideración el proceso de cierre lateral sobre lecho erosionable en la brecha.



Fotografías 3 y 4: Modelo y prototipo del desvío del río Limay en Piedra del Águila

En las fotografías N° 3 y N° 4 se puede observar el detalle del modelo físico en escala 1:60 del cierre de la brecha final para el desvío del río Limay en Piedra del

Águila. Las escalas entre 1:60 y 1:65 que fueron también utilizadas previamente para los estudios de desvío del río Limay en Alicura y posteriormente para el modelo de la presa de Michihuao (aún no construida) fueron seleccionadas en virtud de las características del material del lecho del río y evitar la presencia en el modelo de material muy fino, como ocurriera en el modelo del desvío de 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.

EL CIERRE DEL PARANÁ EN YACYRETÁ

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 para la construcción de la presa. La construcción de la presa requería del cierre de 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 m³/s en ese emplazamiento y la crecida decamilenaria es del orden de 95.000 m³/s. Es una zona de bajas pendientes y anchos cauces, típica de los grandes ríos de llanura (Figura 1).

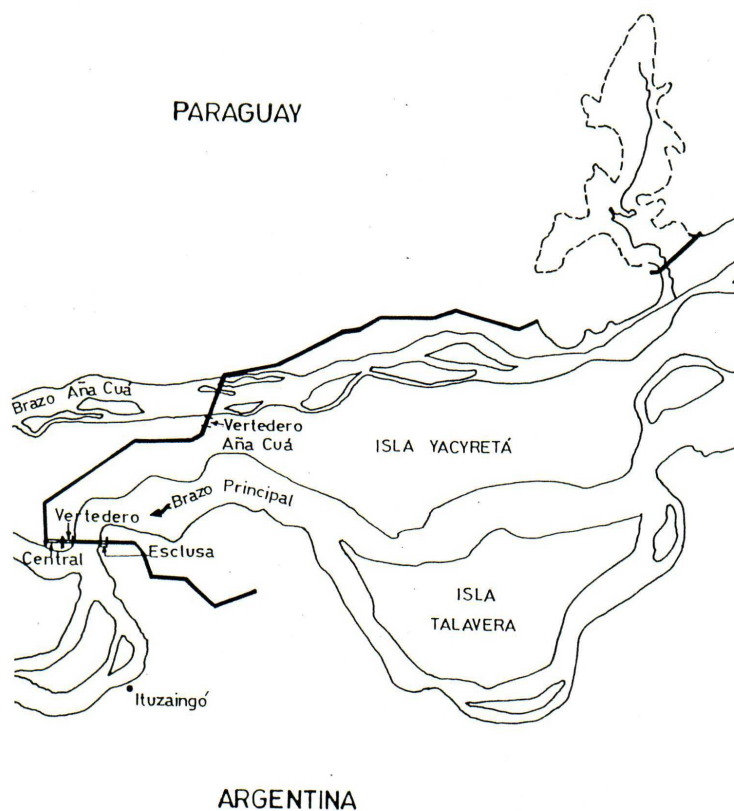


Figura 1: Esquema de disposición de obras de Yacyretá en Brazo Principal y Aña Cuá

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 $30.000 \text{ m}^3/\text{s}$. 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 cuatro modelos matemáticos y cinco modelos físicos para definir la estrategia de cierre del río más adecuada. Si bien esos estudios fueron verificados para la crecida de diseño $Q_p=30.000 \text{ m}^3/\text{s}$, se realizaron ensayos para optimizar las condiciones de cierre para caudales en prototipo de $23.000 \text{ m}^3/\text{s}$, $16.000 \text{ m}^3/\text{s}$ y $10.000 \text{ m}^3/\text{s}$. 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 de cada uno de los modelos físicos. Otros modelos, incluyendo algunos de 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 (end dump method), método de recrecimiento uniforme desde el lecho (normal dump method) y una combinación de los dos anteriores.

El INA desarrolló los estudios en un modelo general del Brazo Principal, en escala $1:115$, de cuarenta metros de ancho por sesenta de largo. Ese modelo fue complementado por un modelo de detalle a escala $1:45$ en el que se analizaron las variantes posibles para la última etapa de brecha. La estrategia basada en avance lateral para una brecha final de 1.000 metros de longitud contempló un aporte de enrocados tal que no descendiera de 33 m^3 por minuto, siempre para un tamaño máximo de material de diámetro equivalente $d_s < 0,80$ m. Siguiendo la misma estrategia de cierre se estudió la posibilidad de efectuar la etapa final de cierre de la brecha con materiales artificiales, utilizando cubos de hormigón en lugar de enrocados naturales. Esa metodología no arrojó resultados satisfactorios porque el cierre no se garantizaba para el caudal de diseño $Q_p=30.000 \text{ m}^3/\text{s}$, y sólo era posible en el caso de $Q_p=23.000 \text{ m}^3/\text{s}$ si se utilizaban cubos de $2,64$ m de lado. El método combinado consistió en la construcción de una ataguía sumergida para posteriormente, sobre ella (sin erosión apreciable del lecho) efectuar el cierre por avance lateral.- Fueron ensayadas diversas alternativas, considerando diferentes alturas de la ataguía sumergida, distintos tipos de material de volcado, el cierre con un pico de crecida de $44.000 \text{ m}^3/\text{s}$, cierre con una parte de presa intermedia, etc. La alternativa resultó exitosa para caudales hasta $30.000 \text{ m}^3/\text{s}$ pero sólo con rip rap de diámetro $d_s = 0,92$ m y para $23.000 \text{ m}^3/\text{s}$ con rocas de tamaño $d_s = 0,57$ m, siempre menores que los utilizados para el sistema de avance lateral.

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 (Fotografías N° 5 y N° 6).

También fue cerrado oportunamente el Brazo Aña Cuá pero utilizando el sistema combinado con ataguía sumergida, para una situación realmente crítica, muy cercana al caudal de diseño máximo de las etapas constructivas, obteniéndose una excelente correlación entre resultados de comportamiento de enrocados y lecho entre el modelo físico y el prototipo a escala natural (Lopardo, R.A., De Lío, J.C., Bacchiega, J.D. & Fattor, C.A., 2001).



Fotografías 5 y 6: Modelo y prototipo de parte final del cierre del Brazo Principal en Yacyretá

EL CIERRE DEL RÍO BIO BIO EN CHILE

El estudio del cierre del río Bío Bío, para la construcción de la Central Hidroeléctrica Angostura tuvo, como desafío particular, encontrar una estrategia compatible con la necesidad de desviar el río en un período de aguas altas. Esta circunstancia implicaba que el cierre se efectuaría con caudales de $800 \text{ m}^3/\text{s}$, debiendo verificarse, vez logrado el desvío del río y la impermeabilización de la ataguía, un adecuado funcionamiento para caudales máximos de hasta $4100 \text{ m}^3/\text{s}$. El estudio, de reciente realización, fue desarrollado por el INA para la empresa que proyecta el aprovechamiento y lo operará en el transcurso de su vida útil.

El río Bío Bío, en la sección del cierre, escurre sobre un cause rocoso, sumamente encajonado, que admite la materialización de obras rígidas sobre ambas márgenes, las cuales pueden construirse sin interferencia del flujo en un período de aguas bajas. Es por ello que se planteó, como estrategia general de cierre, la implantación de dos muros laterales de hormigón que contienen en su coronamiento sendos vertederos de pared gruesa. Estos vertederos, en la etapa definitiva de cierre, permitirán limitar los niveles aguas arriba con caudales asociados a tiempos de retorno de 10 años. De los $4100 \text{ m}^3/\text{s}$ que conforma esta crecida en su caudal máximo, aproximadamente $1700 \text{ m}^3/\text{s}$ serán derivados por los vertederos marginales y el resto evacuados por un conducto en túnel lateral, dispuesto sobre la margen izquierda y con una sección herradura de 14,40 m de diámetro característico.

Esta conformación de cierre permite la generación de una brecha central que, previo a la maniobra de cierre, tiene una longitud de 35 m. Durante esta maniobra, prevista para el mes de julio con un caudal medio máximo de $800 \text{ m}^3/\text{s}$, se generarán en la brecha velocidades tales que impiden considerar la materialización de una ataguía con bloques de roca. Es por ello que se planteó la opción de utilizar tetrápodos de hormigón de 30 tn de peso, dispuestos según una metodología de colocación que fue analizada y optimizada en un modelo físico bidimensional en escala 1:50 y verificada finalmente en un modelo general en escala 1:80.

La estrategia de cierre consistió en colocar los elementos tetrápodos por unidad desde un cable superior, verificándose en cada caso, previo a la incorporación de un nuevo elemento, la estabilidad del anterior. Los bloques, colocados desde aguas arriba hacia aguas abajo, permitían conformar sectores de ataguía que progresivamente iban cerrando la brecha con un avance lateral desde una de las márgenes. La cota inicial prevista para esta fase del cierre era la que permitía generar un nivel aguas arriba compatible con la descarga a través del desvío del caudal máximo de diseño. De esta forma se conformó un terraplén inicial de cierre con una sección cuasi trapezoidal y taludes inclinados 1V:1H.

Una vez alcanzada la cota de resguardo para la crecida de diseño del cierre, se procedió a verificar el caudal de filtración, el cual resultó elevado dada la relación de vacíos obtenida por el terraplén de tetrápodos. Del caudal total de $800 \text{ m}^3/\text{s}$, se obtuvo al final de la fase de cierre un caudal de filtración de $300 \text{ m}^3/\text{s}$, con una tasa de pérdida de elementos por arrastre inferior al 10 %. Concluida esta etapa, debían verificarse dos condiciones:

- i) Desarrollar la ataguía hasta su cota superior definitiva, garantizando que al culminar la misma, la estructura resultara estable frente a la crecida máxima de verificación de $4100 \text{ m}^3/\text{s}$.
- ii) Completar la estructura a partir de la impermeabilización del espaldón aguas arriba con material granular graduado, con una base conformada por un material con un $D_{50} = 300 \text{ mm}$.



Fotografía 7: Modelo físico del cierre del río Bío Bío – Fase inicial con tetrápodos de 30 tn y Caudal de $800 \text{ m}^3/\text{s}$

En la fotografía anterior se observan los vertederos laterales y la estructura central de tetrápodos con un caudal desviado de $800 \text{ m}^3/\text{s}$, sin la cortina de

impermeabilización aguas arriba. A partir de lo observado en el modelo, la conformación de la primera etapa de cierre resultaba factible, aún cuando el nivel de filtración fuera elevado inicialmente. Sin embargo, la verificación de la condición indicada en i) no resultó satisfactoria, dado que inexorablemente se producía la falla del terraplén de tetrápodos en caso de registrarse crecidas máximas de superiores a los 2500 m³/s.



Fotografías 8 y 9: Cierre Bío Bío – Colapso del terraplén para $Q= 2500 \text{ m}^3/\text{s}$.

La opción para garantizar la estabilidad de la estructura quedó confinada a culminar, en un corto período, el proceso de impermeabilización del talud aguas arriba. Mediante la conformación de un espaldón con material fino, adecuadamente graduado, se logró la completa impermeabilización del terraplén, el cual admitiría el paso de una crecida de hasta 4100 m³/s.



Fotografías 10 y 11: Cierre Bío Bío – Fase final de cierre – Q de verificación = $4100 \text{ m}^3/\text{s}$.

En las fotografías anteriores se observa la estructura funcionando con un caudal máximo de 4100 m³/s que cuenta con un período de retorno, para el mes de julio, de 10 años. Esta circunstancia, según el criterio expuesto por el proyectista de la obra determinaba que funcionando los vertederos laterales se salvaguardara la estructura de cierre, limitándose los niveles máximos registrados aguas arriba, aún a costa de la pérdida parcial de la zona de trabajo protegida por la estructura de cierre.

Si bien el proceso de optimización desarrollado permitió alcanzar una estrategia de cierre compatible con las condiciones de diseño y verificación inicialmente planteada, los riesgos de que se produzca el colapso de la estructura central cuando aún

no se haya culminado el proceso de impermeabilización, determinó que el proyectista optara por esperar la ejecución del cierre en un período de aguas bajas. El cambio del período de cierre eliminó gran parte de las complejidades planteadas, reduciéndose la estrategia a la conformación de una ataguía de material de enrocado, con un diámetro característico de base de 1,38 m, y capas sucesivas de material granular de $D_{50} = 1,05$ m y $D_{50} = 0,30$ m, tal como se muestra en la siguiente figura.

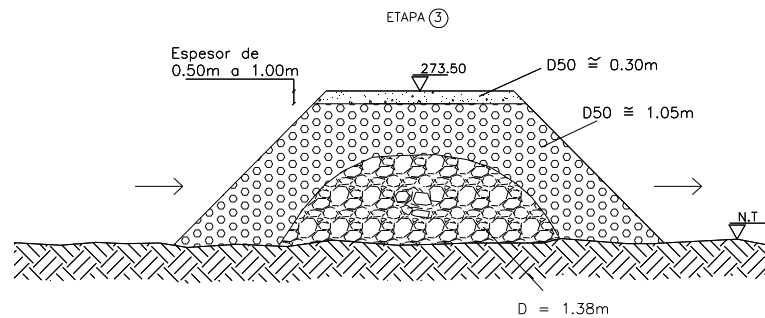


Figura 2: Esquema terraplén de cierre para el río Bío Bío en aguas bajas.

El cierre se logra en esta fase con un caudal de diseño de $400 \text{ m}^3/\text{s}$ y uno de verificación de $600 \text{ m}^3/\text{s}$, avanzándose desde una de las márgenes en cuatro fases sucesivas. Esta estrategia fue finalmente adoptada para el diseño definitivo, previéndose la ejecución del mismo en el mes de diciembre de 2011.



Fotografías 12, 13, 14 y 15: Cierre Bío Bío en aguas bajas – $Q_{\text{diseño}} = 400 \text{ m}^3/\text{s}$

ALGUNAS EXPRESIONES DE CÁLCULO

Dentro de las investigaciones básicas desarrolladas en los comienzos de estas experiencias sobre modelo es posible mencionar aquella que permite el cálculo preliminar del diámetro estable para un talud de enrocado (Lopardo, 1976b):

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

donde U es la velocidad media, s la relación de pesos específicos entre roca y agua, h el tirante, D el diámetro estable, θ el ángulo del talud y ϕ el ángulo de reposo del material. Esta expresión tiene su caso particular sobre “talud nulo”, que es cresta de ataguía horizontal. Esta expresión fue utilizada para pre dimensionar el enrocado de protección de ataguías fijas, por ejemplo para el caso de las etapas constructivas de Alicura.

Además, se ha desarrollado la metodología de cálculo para predecir (en forma aproximada) 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 (Lopardo, 1976a):

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

donde C_{Ω} es el volumen W por unidad de tiempo depositado dividido por el área transversal de ataguía $C_{\Omega} = W / [\Omega (s-1)]$.

Para el caso de pre dimensionado de enrocados para cierres por avance con material estable, se efectuaron experiencias tendientes a completar los trabajos de Izbash y sus colaboradores (Izbash, S. y Khaldre, 1970), llegándose a proponer una expresión que tiene en cuenta el número de Froude crítico de enrocado, definido como:

$$F_{gc} = V_c / [g(s-1) D_s]^{0.5},$$

donde V_c es la velocidad crítica de arrastre y D_s el diámetro representativo estable del enrocado. Esa expresión

$$H/D_s = (s-1) [F_{gc} / (F(\Delta H/H))]^2,$$

siendo ΔH el salto que se produce por efecto del cierre y H la energía propia aguas arriba del mismo, puede ser simplificada para el cálculo en:

$D_s = \beta H$, con $\beta = \beta (\Delta H/H, \phi)$, que se presenta en la figura 2, donde ϕ es un coeficiente que depende de la forma del material volcado (aristas vivas o redondeado).

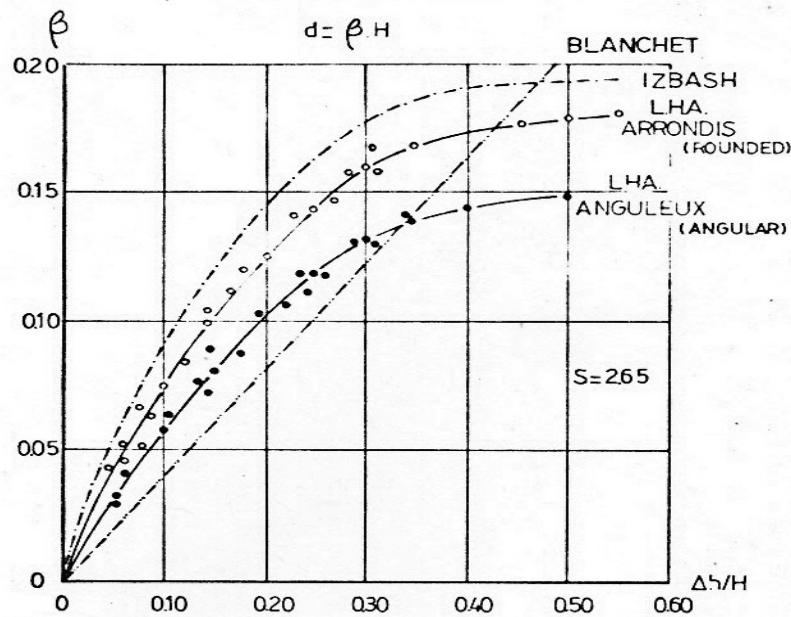


Figura N° 3: Enrocados estables para cierres por avance (Lopardo y Zárate, 1975)

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 (Blanchet, 1964).

Los modelos físicos permiten no sólo determinar los tamaños medios de enrocado necesarios para efectuar una operación de cierre, sino que pueden ilustrar acerca de la influencia de la distribución granulométrica del material utilizado (Lopardo y Zárate, 1975), la influencia de la forma de volcado (Blanchet, 1964) pues por ejemplo en cierres por avance es recomendable amontonar las rocas que llegan por camión en el extremo del espigón en conjuntos de 10 a 20 metros cúbicos y luego empujarlos al agua en la brecha mediante bulldozer, la influencia del ritmo de aporte del material volcado, (Lopardo, 1976a) de interés cuando el material volcado no es totalmente estable, la influencia de utilizar espigones múltiples para dividir el salto (que pueden ser negativos si uno de ellos concentra en un momento el salto total, para el que será inestable), la influencia de ubicación de la brecha final y la influencia de la erosión del lecho en la sección de la brecha (determinada por la relación entre números de Froude del grano del lecho y del enrocado).

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.

LISTA DE SÍMBOLOS

C:	coeficiente de Chézy
C_{Ω} :	cadencia de aporte de material volcado
D_s :	diámetro representativo del material del lecho
D_s :	diámetro representativo estable del enrocado
e_L :	escala de longitudes
f:	coeficiente de fricción
F_{gc} :	número de Froude crítico de enrocado
h:	tirante de agua
ΔH :	salto que se produce por efecto del cierre.
i:	pendiente de la superficie libre
j:	pendiente de la línea de energía
n:	coeficiente de Manning
v:	viscosidad cinemática
Ω :	sección transversal de ataguía
Q:	gasto líquido
R:	el radio hidráulico
R :	número de Reynolds
R* :	número de Reynolds de corte del sedimento
ρ :	masa específica
s:	relación de pesos específicos entre el material sólido y el agua
τ_o :	tensión de corte sobre el lecho
V:	velocidad
v^* :	velocidad de corte
Y:	parámetro de movilidad del sedimento

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Blanchet, C., 1964:** "Les grands principes de coupure des écoulements fluviaux et maritimes", *La Houille Blanche*, N° 4, pp 455-462.
- Bayard, P., 1964 :** "Fermetures fluviales sur le Rhône", *La Houille Blanche*, N° 4, pp 463-472.
- Izbash, S.V. y Khaldre, K.Y., 1970:** "Hydraulics of river channel closure", Butherwords, London..
- Lopardo, R.A. & Zarate, F.J., 1975:** "Sur l'entrainement d'enrochements pendant les operations de fermeture d'un fleuve", *Proceedings XVI IAHR Congress*, São Paulo, Brasil, Vol. 2, pág. 307-314.
- Lopardo, R.A. 1976 a:** "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 Especial SS2 "Key hydraulic issues of huge-water projects"*, *XXIX IAHR Congress*, Beijing, China pp. 22-31.



Instituto de Recursos Hídricos



Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías



Universidad Nacional de Santiago del Estero



Instituto Nacional del Agua



Subsecretaría de Recursos Hídricos



Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica



Gobierno Provincial de Santiago del Estero



Ministerio de la Producción



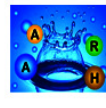
Secretaría del Agua



Secretaría de Desarrollo Científico y Tecnológico



Consejo Profesional de Ingeniería y Arquitectura



Asociación Argentina de Recursos Hídricos



Asoc. Internacional de Investigación Hidroambiental



Comisión Regional del Río Bermejo



CORPORACION ARGENTINA TECNOLÓGICA s.a. INGENIERIA CIVIL E HIDRAULICA

