

# Modelación física del vertedero y estructura de disipación, Dique Los Quiroga.

Monica Teresa Mattar<sup>1</sup>, Jose Francisco Pece Azar<sup>1</sup> & Ramon Edgardo del Valle Paz<sup>1</sup>

(1) *Departamento de Recursos Hídricos, Facultad de Ciencias Exactas y Tecnologías, Universidad Nacional de Santiago del Estero.*  
mmattar@unse.edu.ar

RESUMEN: en el presente se muestra los trabajos realizados para implementar un modelo físico del azud fijo y estructura de disipación del Dique Los Quiroga, en las instalaciones del IRHi, con el objeto de estudiar los parámetros hidráulicos de funcionamiento en los distintos escenarios posible (condiciones de proyecto, actuales y futuras).

## 1 INTRODUCCION

La provincia de Santiago del Estero, cuenta con una importante zona bajo riego, dividida en cinco distritos: La Banda, San Martín, Fernández, Jume Esquina y Robles, que cubren una superficie aproximada de 120.000 ha. La fuente de agua de este sistema es el Río Dulce, sobre el cual a unos 20 km al norte de la ciudad capital de la provincia, se emplaza el azud derivador Dique Los Quiroga (actualmente Azud Derivador Ing. Michaud), obra de Cabecera que comenzó a construirse en el año 1939 y fue habilitado en el año 1950, con capacidad para derivar hasta 100 m<sup>3</sup>/s a margen izquierda por un canal matriz.

En el año 1967 comienza a operar la Presa de Río Hondo, ubicada 40 km aguas arriba del Dique Los Quiroga, a la altura de la confluencia de los ríos Salí, Gastona, Marapa y Medina, con capacidad de regulación anual e interanual de los caudales. Así, este conjunto de obras que conforman el sistema de riego del río Dulce, se convierten en la infraestructura básica de un sistema productivo agrícola, crítico para el desarrollo económico de la provincia. El Dique está conformado por una Presa de Tierra en margen derecha de 1000 metros de longitud; a continuación, sobre el cauce principal se dispone una Presa Vertedora (denominada Azud Fijo) compuesta por 16 vanos de 20 metros cada uno y pilas de 1.80 metros lo que le otorga un ancho total de 320 metros, y sobre la margen izquierda, se encuentra la Cámara Desripiadora (o Descargador), la Cámara Desarenadora, la Toma del Canal Matriz, el Canal Matriz propiamente dicho el cual tiene una capacidad de 100 m<sup>3</sup>/s, y el Canal de Fuga que permite el retorno al río de los excedentes transportados por el Canal Matriz. Las Cámaras Desripiadora y Desarenadora conforman lo que se denomina Azud Móvil pues están dotadas de compuertas que permiten las

operaciones para la derivación de agua hacia el Canal Matriz y las tareas de limpieza (desripiadas y desarenadas) de las cámaras. El caudal de diseño original de la presa vertedora fue de 3.800 m<sup>3</sup>/s, siendo actualmente el máximo valor esperable de 2400 m<sup>3</sup>/s, que es el caudal máximo erogable por la presa Río Hondo. En la Figura 1 se muestra la localización del Dique.

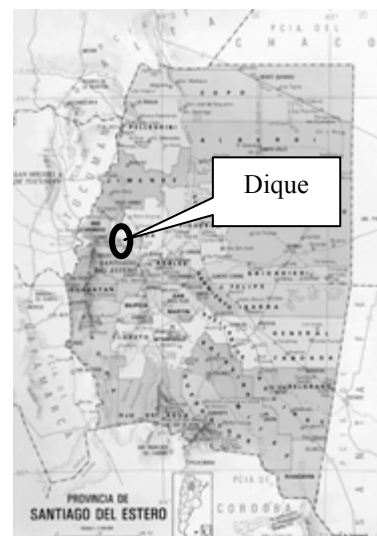


Figura 1. Localización del dique.

### 1.1 Reacondicionamiento Integral del Dique.

Luego de casi 50 años de operación, el Dique presentó deterioros, en particular socavaciones y fisuras en diversas partes de la obra que exigieron tareas para su rehabilitación. Durante los años 1994 y 1995 la firma consultora Lahmeyer International elaboró los “Estudios de Ingeniería Definitivos” donde se propusieron soluciones a los daños presentes en las obras.

A partir de los resultados del estudio presentado, la provincia de Santiago del Estero elaboró el pliego del llamado a licitación para la ejecución

de las obras de reparación, y finalmente, en el marco del Programa de Desarrollo Provincial, ha llevado a cabo el Contrato denominado "Reacondicionamiento Integral del Dique Los Quiroga", Licitación Internacional (SUSEP - Los Quiroga) N°1/99. Las tareas fueron iniciadas en mayo de 2000 y finalizadas en octubre de 2001.

El Contrato de "Reacondicionamiento Integral del Dique Los Quiroga" consistió en el desarrollo de la Ingeniería de Detalle y el saneamiento de Hormigones, tanto de Pilas, Puente y Vertedero, fuertemente fisurados y agrietados, la consolidación de las Fundaciones de las estructuras de hormigón mediante Inyecciones y rellenos, restitución de la Escala de Peces, relleno bajo las losas de la solera y construcción de un Disipador de Energía con Gaviones y un muro colado aguas abajo, en la zona del lecho del río por donde escurren los caudales derivados, el reacondicionamiento de La Presa de Tierra y otras reparaciones que permitan la Operación Continua de todo el Conjunto y la Estabilidad de sus Estructuras. Asimismo se implementó un sistema de auscultación para el control de deformaciones, presiones neutras y caudales de filtración. En el marco del "Reacondicionamiento Integral del Dique Los Quiroga", se realizó la construcción de la estructura de Disipación de Energía mediante la utilización de gaviones.

Al cabo de los 90 días de operación del azud fijo con las obras ya terminadas, se realizó la inspección del sistema de gaviones ubicado aguas abajo del mismo (época de caudales bajo) y se observó que el sistema de gaviones presentaba roturas de la geogrilla por arrancamiento, rotura de la malla de acero galvanizada de los gaviones con eliminación parcial de bloques y, en ciertos sectores, una fuerte abrasión del acero galvanizado.

Se pudo apreciar también, por otra parte, asentamientos importantes de los por debajo de la cota de instalación, superando la capacidad de deformación del geotextil de base.

Con relación a la rotura de gaviones en la parte superior con fuga de agregados y la rotura de la geogrilla en amplios sectores, fue como consecuencia de la gran presencia de troncos y ramas, en épocas de aguas altas, que al engancharse con las mallas, éstas fueron sometidas a grandes esfuerzos localizados, produciendo los daños mencionados. No obstante, es necesario indicar que la flexibilidad del sistema de gaviones permitió minimizar las consecuencias del evento.

También, se pudo observar que para una erogación por sobre el azud fijo de un caudal inferior a 1.000 m<sup>3</sup>/s, el sistema presentaba una exposición importante a la erosión y abrasión y el pasaje de caudales próximos a los máximos esperables del orden de 2.400 m<sup>3</sup>/s provocaría tales roturas al sistema que conducirían inevitablemente a la implementación de un importante programa de mantenimiento permanente e inmediato a la ocurrencia de caudales de magnitud, como los mencionados con el riesgo de que, si no se cumpliría rigurosamente, los daños se magnificarían severamente.

Resultó conveniente entonces, modificar el diseño de la protección de la salida del azud, en vista de lo observado durante la operación del mismo, implementando un sistema de mayor resistencia a la alta erosión y abrasión actuante, que minimice las tareas de mantenimiento. Para ello, se decidió llevar a cabo una modelación física construido en el Laboratorio de Hidráulica del Instituto Nacional del Agua (INA) sito en Ezeiza, provincia de Buenos Aires, lo que permitió observar el fenómeno y los efectos de distintas soluciones alternativas.

En virtud de los resultados de la modelación, del análisis realizado y considerando los aspectos técnicos, económicos y constructivos, se optó por la solución que contempla:

- Incorporación de dientes de caída al final del vertedero.
- La modificación de la geometría del umbral dentado final, reemplazando los mismos por la construcción de un Muro Continuo al final de la losa de hormigón del cuenco disipador.
- Colocación de una losa sobre el manto de gaviones existentes, de 0.55 m de espesor.

## 2 DESARROLLO DEL MODELO

### 2.1 *Revision de antecedentes*

Rocha Felices (2003) dice que, cada vez que el ingeniero se enfrenta al problema de diseñar una estructura tiene que resolver armoniosamente un compromiso entre los aspectos de eficiencia, seguridad y costo, lo que implica establecer con un razonable grado de confianza la relación entre la estructura proyectada y el medio circundante. Los fenómenos hidráulicos, como expresión del mundo natural, son tan complejos que no es posible analizarlos y describirlos totalmente. Sólo podemos hacerlo parcialmente. Uno de los instrumentos más poderosos de que se dispone

para tratar de conocer y comprender el comportamiento del agua en la naturaleza y su interacción con las estructuras, se encuentra en la investigación mediante los modelos matemáticos y los modelos físicos. Ambos se complementan.

Así, una de las definiciones de “Modelos Físicos” que presenta la bibliografía es: “un modelo físico es la reproducción en escala reducida de un determinado fenómeno, ocurrido en un medio natural, llamado prototipo”.

Actualmente, es ampliamente aceptado el uso de la modelación física de estructuras hidráulicas, que tuvo sus inicios en los laboratorios fundados en Alemania, Laboratorio Hidráulico de Dresden y Laboratorio de Hidráulica de Karlsruhe.

La experimentación hidráulica comenzó a tener auge con la aparición de problemas complejos en los prototipos, que no podían ser analizados o resueltos mediante técnicas o algoritmos matemáticos, por lo que era necesario aplicar modernas técnicas de mediciones.

Obviamente los avances tecnológicos contribuyeron notablemente al progreso en la modelación física de estructuras hidráulicas, avanzando en los criterios de diseño e incorporando nuevos y sofisticados instrumentos de mediciones, con máxima precisión, que permiten medir y registrar variables de interés en los fenómenos hidráulicos.

En síntesis mediante un modelo físico, se trata de reproducir en un laboratorio (modelo) la estructura, río, canal, etc. que se tiene en la naturaleza (prototipo).

En el diseño y concepción de un modelo, es importante la selección adecuada del criterio de similitud o semejanza. Esto es que, los fenómenos hidráulicos ocurran en prototipo y modelo, de manera cualitativamente análoga y cuantitativamente proporcional.

Para que exista semejanza entre prototipo y modelo se debe verificar que: a cada punto del prototipo le corresponda un punto en el modelo (semejanza geométrica), que los desplazamientos de las partículas en el tiempo sean homologas en prototipo y modelo (semejanza mecánica) y que las fuerzas que actúan se reproduzcan en forma homologa (semejanza dinámica).

## 2.2 Tipos de Modelos

Modelos a fondo fijo: son los modelos que representan estructuras, canales o cauces naturales que no sufren variaciones en su lecho. Esto es que, debido a las características y tamaño

de las partículas que conforman su lecho, no se producen variaciones en la sección transversal, sin importar las características del flujo. Es decir los materiales del contorno no se mueven.

Modelos a fondo móvil: son los modelos que representan estructuras, canales o cauces naturales que sufren variaciones en su lecho. Esto es que, debido a las características y tamaño que conforman su lecho, se producen variaciones en la sección transversal, según las características del flujo. Es decir los materiales del contorno se mueven.

Como el presente proyecto se refiere a la modelación física del vertedero fijo del Dique Los Quiroga, nos encontramos dentro de lo que se define Modelo a Fondo Fijo.

## 2.3 Semejanzas que deben cumplirse

Semejanza geométrica: existe cuando entre modelo y prototipo hay igualdad de ángulos y proporcionalidad de lados homólogos.

$$\mathcal{E}_v = \mathcal{E}_L^3 \quad (1)$$

Donde:

$\mathcal{E}_v$  = escala de volumen

$\mathcal{E}_L$  = escala de longitud

Semejanza cinemática: existe cuando la trayectoria de los puntos homólogos sea geoméricamente semejante y que los tiempos empleados por las partículas en recorrer distancias homologas, estén en relación constante (escala de tiempo).

$$\mathcal{E}_v = \frac{\mathcal{E}_L}{\mathcal{E}_t} \quad (2)$$

Semejanza dinámica: existe cuando se cumplen las dos condiciones anteriores, sumado a que el total de las fuerzas actuantes (activas y de inercia) mantengan una única relación de intensidades, llamada escala de fuerzas.

$$\mathcal{E}_v = \mathcal{E}_\rho \mathcal{E}_L^3 \mathcal{E}_t^{-2}$$

Es decir que, las escalas no pueden ser elegidas arbitrariamente. La escala de fuerza es inamovible, elegidas las de longitudes, tiempo y masa específica, del modelo y prototipo

## 2.4 Metodología

El flujo sobre vertedero se encuentra bajo la presión atmosférica, lo que se conoce como flujo

a superficie libre. Las fuerzas que inducen el movimiento son las gravitacionales, lo que implica que la ley de semejanza de Froude, tiene una importancia relevante. También existen las fuerzas viscosas entre otras. Los modelos de este tipo de fenómeno, se denominan Modelos Froudianos.

Las diferentes escalas a aplicar en los Modelos Froudianos, se resumen en la Tabla 1.

Tabla 1. Escalas de modelos Froudianos.

Escala de longitud	$\epsilon_L$
Escala de tiempo	$\epsilon_t = (\epsilon_L)^{0.5}$
Escala de velocidad	$\epsilon_v = (\epsilon_L)^{0.5}$
Escala de aceleración	$\epsilon_g = 1$
Escala de gastos	$\epsilon_Q = (\epsilon_L)^{2.5}$

### 2.5 Condiciones del laboratorio

En el laboratorio de Hidráulica, se cuenta con un canal metálico vidriado de 11,00 m de longitud y una sección transversal de 0,80 x 0,80 m., como se muestra en la Figura 2.



Figura 2. Canal para modelación

Por otra parte, el sistema de bombeo son tres bombas centrífugas, como se muestra en la Figura 3.



Figura 3. Sistema de bombeo.

### 2.6 Determinación de la escala más conveniente

La modelación se realiza para un rango de caudales máximos entre 500 y 1500 m<sup>3</sup>/seg. Las dimensiones del prototipo son: ancho del

vertedero (Bp) 320 m, y altura de carga por encima del mismo (Hp), 4 m.

Por otra parte, los datos de la sección del canal rectangular donde se realizara la modelación, es: altura del canal (Hm), 0.70 m, ancho del canal (Bm), 0.80 m y capacidad de bombeo (Qm) igual a 0.100 m<sup>3</sup>/seg.

Con los valores del Numero de Reynolds calculados para los caudales de erogación del prototipo, y adoptando un Rlim=10<sup>5</sup>, se determinaron las mínimas escalas de longitud. En la Tabla 2, se resumen los valores de escala de longitud, para las diferentes alturas de carga, las que están en función del caudal, teniendo en cuenta la el numero de Reynolds limite, y las condiciones impuestas por el laboratorio.

Tabla 2. Escala de longitud

Qpp [m <sup>3</sup> /seg.]	Qm [m <sup>3</sup> /seg.]	1/ε <sub>L</sub>
8.828	0.100	6.00
19.635	0.100	8,26
31.942	0.100	10.04

Se adopto la escala  $\epsilon_L = 1 : 10$

### 2.7 Material del Modelo

Considerando un coeficiente de rugosidad absoluta k del prototipo igual a 1mm, la rugosidad del material del modelo, viene dada por:

$$\epsilon_L = \frac{k_m}{k_p} \Rightarrow k_m = \epsilon_L * k_p = 0,10\text{mm}$$

En primera instancia se asumió como material para el modelo, el acero. Por cuestiones económicas y de practicidad, se adoptó como material para la estructura del modelo fibrofacil revestido con melamina para evitar el humedecimiento del mismo. Para la superficie de contacto del modelo con el agua, se adoptó un contrachapado fenólico que cumple acabadamente con las condiciones de rugosidad impuestas por el cálculo.

### 2.8 Estructura del modelo

La estructura soporte de modelo del azud propiamente dicha, que se muestra en la Figura 4, esta conformada por cuatro costillas que conforman el perfil hidráulico del prototipo, donde se pegara el material superficial. Estas costillas se vincularon mediante montantes del

mismo material, atornillados para lograr rigidizar el conjunto.



Figura 4. Esqueleto del azud.

Asimismo, la estructura completa, azud y estructura de disipación, se fijo al canal vidriado con el empleo de sellador siliconado

Por otra parte, el revestimiento de toda la estructura, es decir la superficie de contacto con el agua, fue un contrachapado fenólico, como puede verse en la Figura 5.



Figura 5. Esqueleto y revestimiento.

### 2.9 Sistema de bombeo

Una vez definidos los caudales necesarios para el modelo ( $Q_m$ ), resulto que la capacidad de bombeo del laboratorio prevista (Figura 3) era insuficiente para modelar el rango de caudales del prototipo propuesto. Además, por otra parte, se observo que el montaje de estas bombas,

generaban demasiadas complicaciones y un excesivo costo para los resultados que se podrían obtener de las experiencias realizadas en esas condiciones. Por estos motivos se decidió adquirir una única electrobomba sumergible centrífuga de eje vertical, modelo: DWG 550ET - 7.5 hp - 380 V con capacidad para producir los caudales necesarios previstos originalmente. La misma se puede ver montada en la cisterna, en la Figura 6.



Figura 6. Electrobomba sumergible.

### 2.10 Montaje del Instrumental para medición

Para la medición de tirantes se construyo un carro como se muestra en la Figura 7, donde las escalas y grillas de referencia a emplear, serán del tipo autoadhesivas que ya se adquirieron y están listas para su montaje

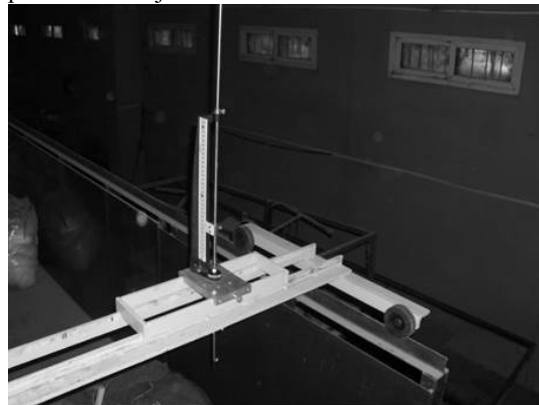


Figura 7. Carro para instrumental.

## 3 CONCLUSIONES

Actualmente se esta terminando de pintar la cisterna, a los fines de evitar posibles perdidas y/o filtraciones

Una vez cumplido con esta tarea, se comenzaran a realizar las mediciones de tirantes, tirantes conjugados, resalto hidraulic, etc, para caracterizar el flujo y corroborar los datos

medidos en el modelo, con las eventuales mediciones realizadas de los parámetros por la UER.

#### 4 REFERENCIAS

Milla C, A Lopez, A Aguilar. *Modelación física del flujo sobre un vertedero de cresta controlada, caso: vertedor de la presa "El Naranjo"-México.* Anales del XXII Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Venezuela. 2006

Fernandez Bono, J.F; F.J Valles Moran. *Criterios metodológicos de adaptación del diseño de cuencos de disipación de energía a pie de presa*

*con resalto hidráulico, a caudales superiores a los de diseño.* Anales del XXII Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Venezuela. 2006.

Magistocchi L.M., P. Infante, A. Lerda, P Espina. *Investigación y desarrollo de compuertas de caudal constante para la regulación automática de aguas.* Memorias del XX Congreso Nacional del Agua. Edición CD. Mendoza. 2005.

Bureau of Reclamation. *Proyecto de pequeñas presas.* Editorial Dossat. Madrid. 1970.