

# COMPARACIÓN DE MODELOS FÍSICOS EN LABORATORIO

*Data de aceite: 03/04/2023*

### **Víctor Manuel Ortiz Martínez**

Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Ingeniería  
Ciudad de México, México

### **Juan César Luna Bahena**

Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Ingeniería  
Ciudad de México, México

### **Jesús Gracia Sánchez**

Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Ingeniería  
Ciudad de México, México

### **José Luis Herrera Alanís**

Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Ingeniería  
Ciudad de México, México

### **Eliseo Carrizosa Elizondo**

Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Ingeniería  
Ciudad de México, México

### **Javier Osnaya Romero**

Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Ingeniería  
Ciudad de México, México

### **Víctor Franco**

Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Ingeniería  
Ciudad de México, México

**RESUMEN:** En el laboratorio de hidráulica fluvial del Instituto de Ingeniería, UNAM se realiza la modelación física de corrientes naturales y las obras hidráulicas que se emplazan, para estudiar el comportamiento y evolución de estas. El caso específico de este trabajo es la modelación del delta de un proyecto hidroeléctrico, en el cual se determinó las escalas de acuerdo al área disponible y la capacidad de bombeo. De acuerdo con las experiencias previas en otras modelaciones, requeríamos constatar que la pendiente calculada según las escalas, permitiría el transporte de sedimento, que es uno de los estudios objetivo de esta parte del trabajo. El modelo físico construido que se determinó sería un modelo distorsionado de fondo fijo.

**PALABRAS CLAVE:** Transporte de sedimentos, modelos físicos.

## LABORATORY COMPARISON OF PHYSICAL MODELS

**ABSTRACT:** In fluvial hydraulics laboratory of the Institute of Engineering, UNAM physical modeling of natural streams and water works are located, to study the behavior and evolution of these is performed. The specific case of this paper is

modeling the delta of a hydroelectric project, which scales according to the area available and the pumping capacity was determined. According to previous experiences in other modeling, it was required to see that the slope calculated according to the scales, allow sediment transport, which is one of the objectives of this part of labor studies. The built physical model was determined would be a fixed background distorted model.

**KEYWORDS:** Sediment transport, physical models.

## 1 | INTRODUCCIÓN

Uno de los trabajos de investigación en el Instituto de Ingeniería, UNAM, requirió de la construcción de un modelo físico con escala distorsionada de 1:120 (horizontal) y 1:22.5 (vertical). Las experiencias previas, permiten trabajar con material de origen volcánico (el cual tiene un  $D_{50}$  de 0.2 mm), con distorsión vertical de 6. El nuevo modelo referente a una obra de fondo de un proyecto hidroeléctrico llevo a preguntarse si las condiciones de topo-batimetría permitirían la distorsión de 6 y/o debía determinarse otra. Esto fue motivo para realizar unas pruebas de transporte de sedimentos, principalmente, en un canal de pendiente variable (geometría  $b = 0.2$  m y  $L = 5.0$  m), con la finalidad de corroborar y/o determinar la distorsión del nuevo modelo a escala de la Hidroeléctrica.

La ingeniería hidráulica se ha apoyado en modelos físicos para el estudio cualitativo de los fenómenos hidráulicos que generalmente son adversos en los ríos, alterando su morfología y con ello la salud del mismo. Es por ello, que la hidráulica hace uso de los modelos físicos, pues con estos se logra hacer la revisión del funcionamiento hidráulico de las obras hidráulicas y sus perturbaciones. Lo que trae consigo beneficios, pues esto permite realizar modificaciones a las obras hidráulicas, lo cual en costo es menor que, si se realiza en prototipo. Este trabajo resume las experiencias de laboratorio para el caso particular del delta de un proyecto hidroeléctrico, en el cual es de interés la ubicación de la formación del hombro, así como la distribución de las partículas (sedimento). Para comprobar que el material utilizado como sedimento, se transportaría con la pendiente calculada de 2%, iniciamos una serie de pruebas en un canal de pendiente variable, lo cual se detalla en la sección siguiente.

## 2 | MODELO FÍSICO

### Canal de Pendiente Variable

Como ya se describió brevemente, el proyecto final consistió en construir un modelo físico distorsionado con escala vertical de 1:22.5 y escala horizontal de 1:135 con distorsión de 6. Este modelo es utilizado para realizar las experiencias respecto a la ubicación del hombro (depósito de sedimento), para ello se determinó que el modelo sería distorsionado de fondo fijo, con un gasto máximo de 200 LPS.

Se diseñaron dos series de pruebas de laboratorio, la primera consistía en corroborar

la presencia de transporte de sedimentos con dos tipos de arenas una de origen volcánico y una segunda con arena basáltica (azul) con peso específico de 2350 kg/m<sup>3</sup> y 2650 kg/m<sup>3</sup>, respectivamente. Con la arena de origen volcánico se realizaron experiencias con diferentes pendientes y un gasto constante de 5 LPS. Finalmente se determinó que, para apreciar mejor el fenómeno de transporte de sedimento, se requería de hacer un contraste de tonos en el material, por lo que se realizó una prueba más, en la cual se utilizó arena volcánica (color oscuro) y arena de playa (color claro). Se apreció mejor el movimiento del sedimento, pudiendo obtener una secuencia de imágenes del transporte (ver Figura 1 y 2)

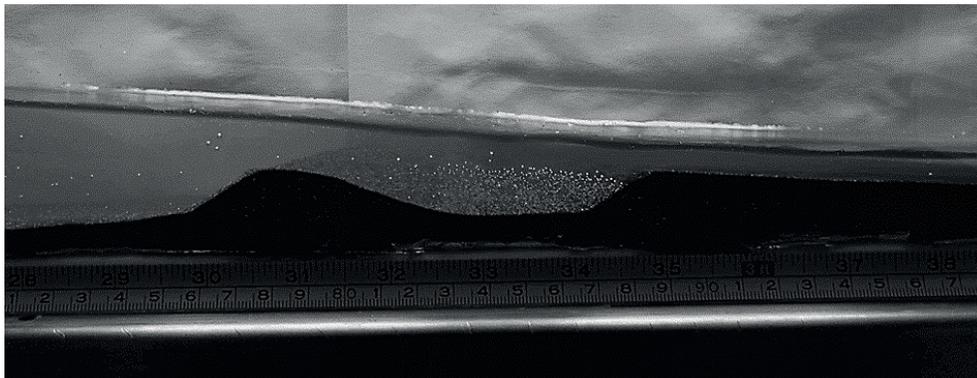


Figura 1.- Inicio de la formación del hombro (canal de pendiente variable)

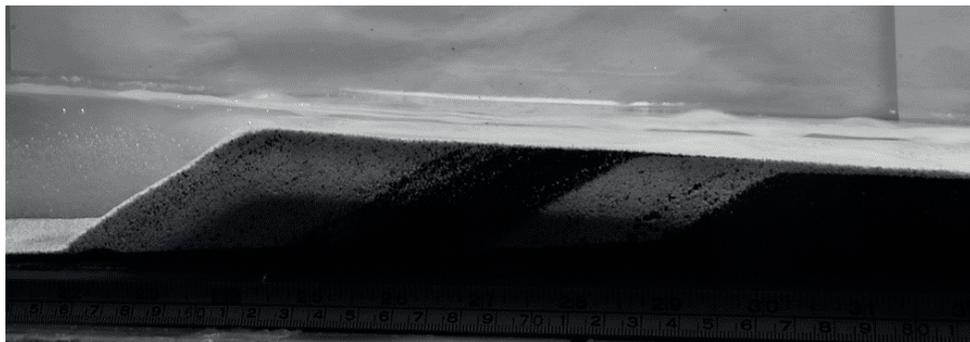


Figura 2.- Formación del hombro.

Estas experiencias en el laboratorio, permitió la comprobación de la pendiente calculada, utilizando la ecuación [1] de escalas de pendiente para modelos fluviales distorsionados (Maza 1969). En las pruebas para los materiales utilizados el sedimento grueso se depositó en la misma región de formación del hombro. El cálculo de la pendiente para el delta es la siguiente:

$$S_e = \frac{H_e}{L_e} \quad [1]$$

Sustituyendo datos:

$$S_e = \frac{22.5}{135} = 0.166$$

Finalmente se determina la pendiente del 2%

### 3 | MODELO FÍSICO DEL DELTA

La segunda serie de pruebas es operar el modelo del delta (Figura 3). Las experiencias son dos, pues son los materiales de arena negra (volcánica) y arena azul (basalto), para determinar en qué parte del delta se depositarán las partículas gruesas. Inicialmente se pensó en lavar la arena con la finalidad de observar cual era el comportamiento, pero se apreció que era necesario la presencia de finos, por lo que para ambos casos de arena se operó con las partículas traídas de las minas.

Para evitar la alteración de los hombros y depósitos de los diferentes diámetros de partículas se resolvió con la adecuación de una compuerta con válvulas que permitieron inhibir el incremento en la velocidad del flujo y con ello también mitigar los efectos de rasgamiento en los hombros. Mientras que en el sistema de derivación al modelo está pensado para poder cortar de manera súbita el paso de flujo y así poder descargar de manera paulatina el cauce del delta.

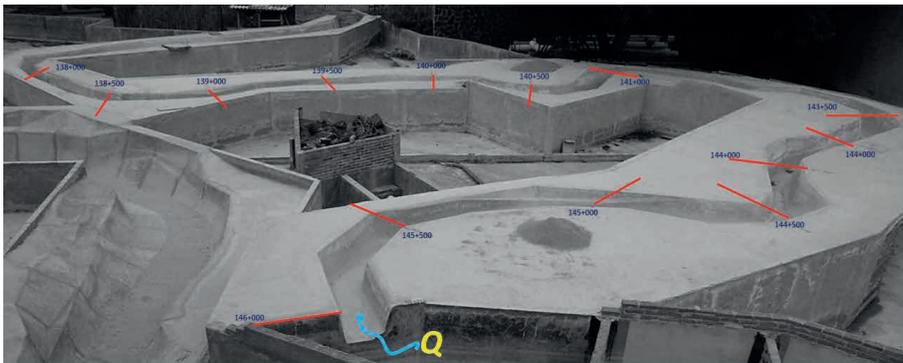


Figura 3 Modelo Físico del Delta de un Proyecto hidroeléctrico.

El caudal líquido en prototipo fue de 2180 m<sup>3</sup>/s, en el caso de la arena negra, una hora de operación de avenida, mientras que el volumen sólido equivale a 213,642.6 m<sup>3</sup>, después de concluida la operación se observó la formación de dos hombros entre los cadenamientos; *hombro 1*: 140+700 a 140+500 y, *hombro 2*: 140+300 a 140+100. La figura 4, muestra gráficamente la ubicación de los hombros para estas condiciones. En general la retención de los sólidos se presentó en esta zona, lo que se puede observar en las curvas que acompañan esta figura.

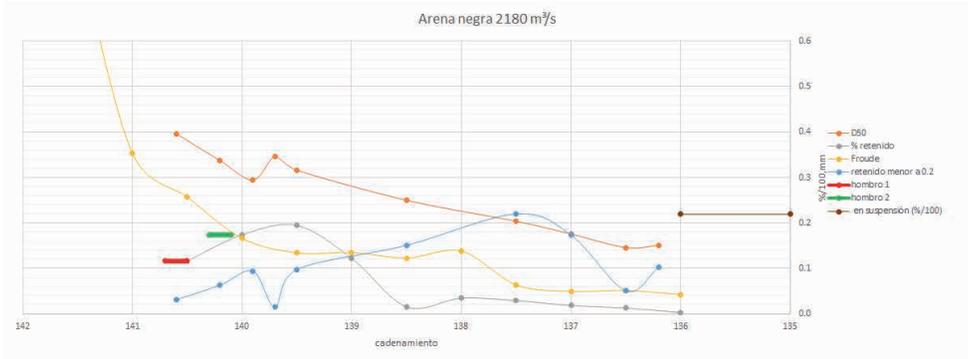


Figura 4 Formación de los hombros en el Delta (rojo y verde), arena negra.

Para el caso de la arena azul, el volumen solido es el mismo que en la anterior experiencia de 213,642.6 m<sup>3</sup>. Mientras que el caudal en prototipo equivale a 2389 m<sup>3</sup>/s. se observa la formación de dos hombros ubicados en el cadenamiento, hombro 1: 141+100 a 140+500 y, hombro 2: 140+400 a 140+000. Aunque se ubica 400 metros aguas arriba de las anteriores condiciones de material, se considera que el comportamiento de estos materiales no difiere de manera importante. En la figura 5 se observa la ubicación de los hombros, así como, las curvas de retención de las partículas. En las Figura 6 (a y b) se observa la ubicación de los hombros, aunque aguas abajo del delta se depositaron finos, al realizar la extracción de muestras para cribarlas, se encontró que también se retuvieron finos en la zona de los hombros.

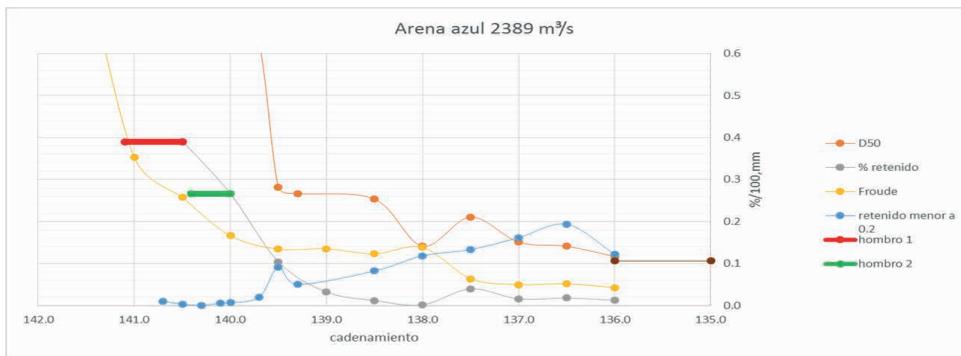


Figura 5 Formación de los hombros en el Delta (rojo y verde), arena azul.

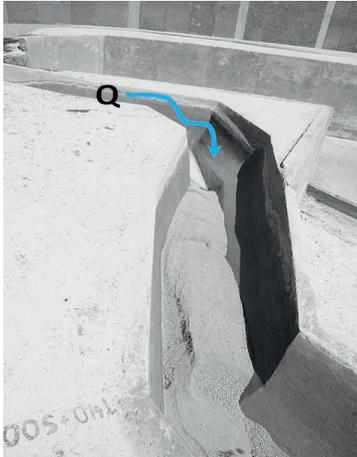


Figura 6a Hombro 1

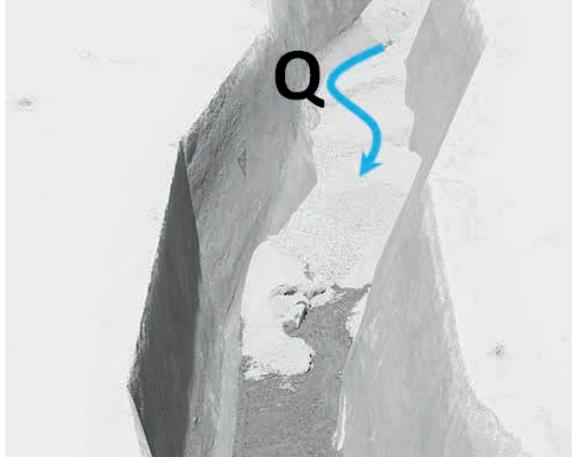


Figura 6b Hombro 2

#### 4 | CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Las experiencias desarrolladas en laboratorio permitieron conocer la ubicación de depósito de sedimentos gruesos, por ende, la formación de los hombros. Se pudo constatar que el tipo de material no tiene mayor influencia en el comportamiento del transporte, pues los depósitos fueron prácticamente en los mismos cadenamientos. Aunque se presentaron alteraciones de pequeños rasgamientos en los hombros, debidos al escurrimiento del agua que saturó las arenas, no fue significativo, por lo que se da por ciertos los datos arrojados de las muestras tomadas en cada hombro y además de los finos depositados a lo largo del modelo físico del delta.

Basándose en los resultados obtenidos en el modelo físico, se puede aseverar que el azolve en la cortina puede ser resuelto con la operación de la obra de toma, es decir, pensar en una obra de fondo sería muy aventurado, por los costos de esta, además que los resultados de las muestras que se tomaron y cribaron sugieren que la cantidad importante para conservar la salud del cauce, son las partículas gruesas, y estas se quedan en la cola o delta del embalse.

#### REFERENCIAS

**US bureau of Reclamation** "Hydraulic Design Criteria", USA

**Chow, V.T.** (1959). Open Channel Hydraulics. McGraw-Hills Kogakusha, LTD, USA.

**Maza, J. A.** (1969). Modelos Fluviales, Instituto de Ingeniería, UNAM. México

**Sotelo, A.S.** (2008). Hidráulica General, LIMUSA, México.

Sotelo, A.S. (2002) Hidráulica de Canales, Facultad de Ingeniería, UNAM. México.

**Manual de Diseño de Obras Civiles, Hidrotecnia. “A.2.16. Sedimentación en embalses y desarenadores” CFE**