

# **SIMULACIÓN DE UN CAUCE FLUVIAL PARA EL ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA SECCIÓN DE LAS PILAS DE LOS PUENTES EN PROCESOS DE EROSIÓN O SEDIMENTACIÓN**

**Vinicio Javier Pacheco Arciniegas**

Carrera de Ingeniería Civil  
Escuela Politécnica del Ejército

## **RESUMEN**

Una de las ramas de la hidráulica es la hidráulica fluvial, la cual básicamente estudia el comportamiento de los cauces de los ríos en épocas normales y en épocas de creciente. Uno de los ámbitos más importantes de esta rama de la ciencia es el estudio de los procesos erosivos o de sedimentación debido a factores externos como es la geometría de las pilas de los puentes las cuales se apoyan en los cauces de los ríos.

Con este proyecto y luego de la investigación científica se pretende conocer que secciones de las pilas de los puentes son los más recomendados tanto en ríos de llanura como en ríos de montaña.

## **ABSTRACT**

One branch of Hydraulic is the River Hydraulics, which basically studies the behavior of the riverbeds in normal times and in times of floods. One of the most important areas of this branch of science is the study of erosion and sedimentation due to external factors such as the geometry of the bridges' piles which are based on the riverbeds.

As a result of this project and after the scientific investigation I expect to know which sections of the bridges' piles are the most recommended, either in Lowland Rivers or in Mountain Rivers.

# **CAPÍTULO I: ASPECTOS TEÓRICOS EN MODELOS**

## **1.1. Introducción**

Para iniciar el análisis, primeramente es necesario el estudio del río y sus características. Difícilmente en un modelo podríamos reproducir las variaciones instantáneas del caudal líquido y del caudal sólido, de la sección transversal, de la pendiente y de todas y cada una de las características hidráulicas que un río posee. Por lo tanto nos fabricamos un río ideal, que es el que se estudia en un modelo, físico o matemático. Un modelo de simulación facilita notablemente el entendimiento del fenómeno en análisis así como la obtención de resultados más confiables para cálculos posteriores.

## **1.2. Similitud hidráulica**

Existe similitud física entre dos estructuras, cauce fluvial y modelo por ejemplo, cuando existe una correspondencia constante e inequívoca entre las variables del mismo tipo. Conseguir esta similitud entre el río y el modelo hidráulico es imposible, ya que no solo se debe lograr una escala en las propiedades geométricas si no en todas las fuerzas que intervienen en dicho fenómeno

Esto basado en la teoría de similitud, establecida por Kline: "Si dos sistemas obedecen al mismo grupo de ecuaciones y condiciones gobernantes, y si los valores de todos los parámetros y las condiciones se hacen idénticas, los dos sistemas deben de exhibir comportamientos similares con tal de que exista una solución única para el grupo de ecuaciones y condiciones".

### **1.2.1. Similitud geométrica**

Existe similitud geométrica cuando, de manera estricta, sea igual la relación de todas las longitudes homologas en dos sistemas.

### **1.2.2. Similitud cinemática**

Se garantiza la similitud cinemática en un flujo cuando las regiones donde ocurre tal flujo son geoméricamente similares.

### **1.2.3. Similitud dinámica**

La semejanza dinámica requiere que las masas y las fuerzas que actúan sobre las partículas de un fluido en el modelo y en el prototipo estén en proporción.

Una condición necesaria, pero no suficiente, para que se cumpla la semejanza dinámica es que deben cumplirse al mismo tiempo las semejanzas cinemática y geométrica. Sin embargo, no siempre es posible alcanzar las tres similitudes al mismo tiempo.

## **1.3. Condiciones de similitud**

En la modelación de sistemas a superficie libre, la gravedad, la viscosidad y la rugosidad del contorno son factores importantes, por

tanto, es necesario satisfacer simultáneamente las leyes de Froude y de Reynolds.

Se define que el criterio de similitud según Froude es el que rige el modelo.

#### **1.4. Escala de modelos hidráulicos**

En la selección de las escalas intervienen numerosos factores. De un lado están las exigencias teóricas que nacen en el parámetro característico de la información, y, de otro, las circunstancias de tipo práctico vinculadas al laboratorio y a los objetivos de la investigación.

#### **1.5. Efectos de escala**

Resultado principal de las escalas escogidas, del tamaño y otras características del modelo, suele ocurrir que en el modelo aparezcan ciertos fenómenos que no corresponden a los que se presentan en la naturaleza. Al respecto hay que tener cuidado, por ejemplo, con los fenómenos originados en la tensión superficial, propia del modelo y no del prototipo.

#### **1.6. Tipos de modelos hidráulicos**

Los hidráulicos a escala pueden dividirse en no distorsionados y distorsionados. En los modelos hidráulicos no distorsionados se ocupa una escala única para todas las dimensiones.

Por otro lado se puede realizar los mismos análisis sobre un modelo con escala distorsionada que consisten en modelos con una diferente escala para cada dimensión.

##### **1.6.1. Modelo de fondo móvil**

El objetivo del modelo es por un lado las magnitudes hidráulicas y por el otro el comportamiento del fondo erosionable: erosiones, sedimentaciones, etc. En los modelos de obras locales en lecho móvil, de corta extensión y realizados para el estudio de fenómenos locales de la superficie libre y sobre todo del lecho, tal como la erosión local, se debe reproducir correctamente la geometría y emplear criterios de semejanza respecto al sedimento.

##### **1.6.2. Modelo de fondo fijo**

En los modelos de estructuras hidráulicas, es decir, de obras de corta extensión, emplazadas en los ríos y estudiadas en sus características hidráulicas. Los modelos de lecho fijo o modelos hidráulicos de ríos, en sentido estricto, son de contornos o lecho fijo, no erosionable, y reproducen un tramo extenso del río. El objetivo del modelo es el estudio de las magnitudes hidráulicas: calados, velocidades, superficie inundada, etc.

## **CAPÍTULO II: PLANTEAMIENTO Y CONSTRUCCIÓN DEL MODELO**

### **2.1. Introducción**

En la hidráulica una de las ramas de estudio primordial es la hidráulica fluvial, uno de los ámbitos más importantes de esta rama de la ciencia es el estudio de los procesos erosivos o de sedimentación debido a factores externos introducidos por el hombre como es la geometría de las pilas de los puentes las cuales se apoyan en los cauces de los ríos.

### **2.2. Necesidad del modelo hidráulico**

Para iniciar cualquier estudio es necesario tomar en cuenta la importancia que tiene la estructura de análisis, su costo, su configuración y ver las posibles consecuencias que su falla provocaría; se debe entonces pensar en una investigación en modelo.

Otro punto importante para una investigación en modelo se da cuando el diseño presenta deficiencias en su base teórica, es insuficiente o no existe en su totalidad; esto es algo que se da regularmente.

### **2.3. Información requerida para el estudio del modelo**

Para la elaboración del presente modelo de simulación de cauce fluvial se tomaron en consideración algunos aspectos, principalmente la sección del cauce donde se desarrollarán los diferentes ensayos.

### **2.4. Similitud y selección de escala del modelo**

Se tomaron en cuenta recomendaciones de expertos, docentes, además de recopilaciones bibliográficas, artículos y se determinó que un modelo con escala de 1:18 es la mejor alternativa para el desarrollo del presente proyecto.

### **2.5. Selección del material**

Basado en modelos similares, en la disponibilidad del material, su fácil instalación y de ser el caso, su reparación inmediata, se ha definido como material principal para la elaboración del modelo hidráulico al acrílico transparente.

### **2.6. Materiales de construcción**

Elementos fijos como el canal que simula el cauce, y móviles como las columnas, fueron construidas con acrílico transparente. Las tuberías, accesorios como codos, universales, adaptadores, reducciones, acoples son de PVC, las instalaciones eléctricas aislados con una capa uniforme de material termoplástico (PVC) resistente a la humedad.

### **2.7. Descripción general del modelo**

El modelo consta de una mesa de dos niveles, en el nivel inferior se encuentra el tanque de almacenamiento de agua, una bomba de 1 ½ hp, instalaciones y tuberías. En el segundo nivel se halla el modelo en acrílico, con sus respectivos elementos.

## 2.8. Instalaciones auxiliares

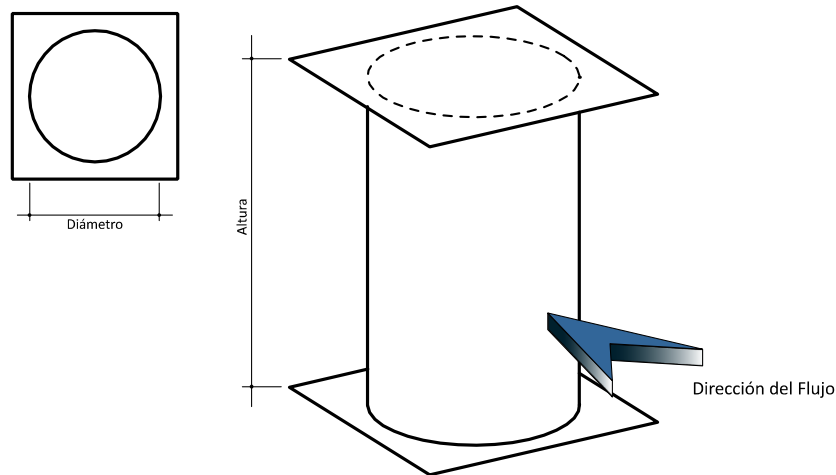
El modelo también dispone de instalaciones auxiliares como son la instalación eléctrica para la bomba, y una llave de desfogue para eventuales limpiezas y mantenimiento del modelo.

## CAPÍTULO III: PRÁCTICAS DE LABORATORIO

### 3.1. Práctica No. 1

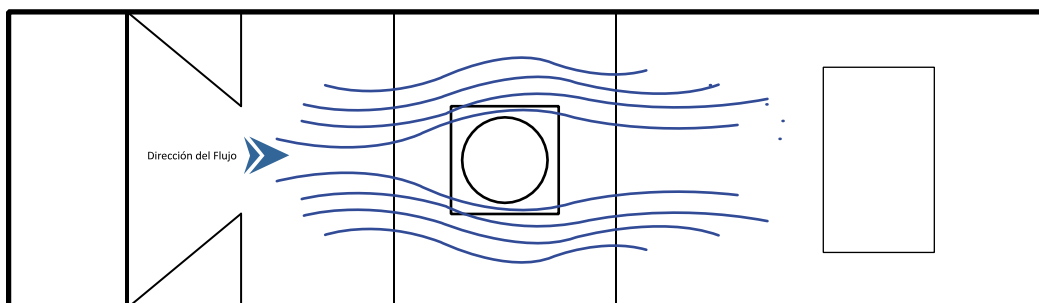
#### 3.1.1. Pilas circulares

Para esta práctica se emplea la columna con sección circular, con las siguientes características: Diámetro: 11.5 cm, Altura: 30 cm



- Para comenzar la práctica poner en funcionamiento el modelo con los elementos y accesorios. Medir la longitud del tramo a analizar, L.
- Establecida la condición de trabajo, calcular área de la sección del canal, velocidad del flujo, tiempo y caudal.
- Para el caudal establecido, ubicar la columna con la sección a analizar, en este caso circular, y observar el fenómeno que se presenta sobre este tipo de columna.

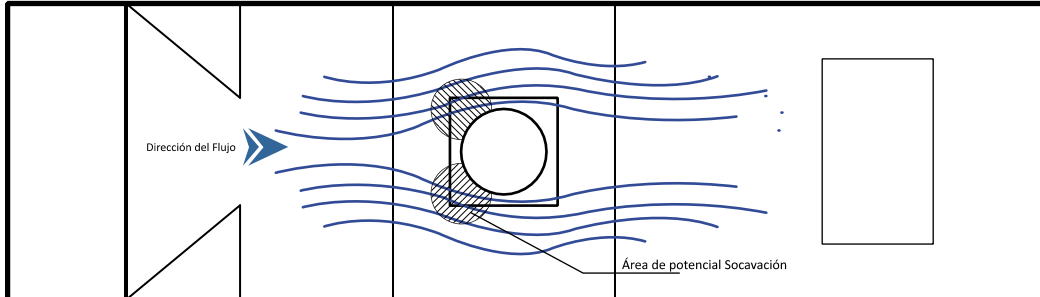
#### 3.1.2. Líneas de flujo



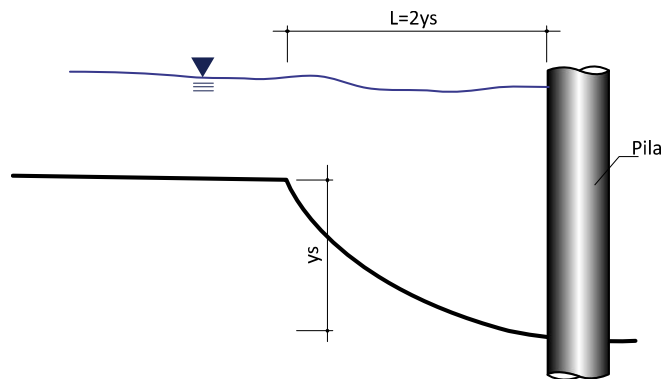
La forma circular de la columna permite que se formen líneas de flujo muy similares a las mostradas en el gráfico

### 3.1.3. Áreas de potencial socavación

No existe definida una fórmula para calcular con exactitud el área de potencial socavación, sin embargo por la forma espiral de los vórtices que se forman al contacto con las paredes de la pila, se asume que el área tiene forma elíptica tendiendo a circular.



Según el Dr. Ing. Arturo Roche Felices, en su publicación de enero del año 2010, titulada “Erosión en Pilares y Estribos de Puentes”, la extensión que alcanza en planta, la potencial socavación se puede definir como dos veces la profundidad máxima de socavación en la pila analizada.



### 3.1.4. Toma de datos

La nomenclatura empleada para la toma de datos y cálculos se presenta a continuación:

- A: Ancho del Canal [m]
- L1: Longitud de Análisis [m]
- g: gravedad [9.81 m/seg<sup>2</sup>]
- ys: profundidad de socavación local [m]
- h: profundidad del flujo directamente aguas arriba de la pila
- k1: factor de corrección que tiene en cuenta la forma de la pila
- k2: factor de corrección tiene en cuenta el ángulo de ataque del flujo
- k3: factor de corrección por la forma del lecho
- k4: factor de corrección por acorazamiento del sedimento del lecho
- D: ancho de la pila [m]
- L: longitud de la pila [m]
- Fr: número de Froude en sección directamente aguas arriba de la pila
- V: velocidad media flujo directamente aguas arriba de la pila [m/s]

### Cálculo de Profundidad de Socavación

Se realizaron cálculos de profundidad de socavación con tres diferentes fórmulas; Shen, Laursen y con la fórmula de Colorado State University (CSU),

$$\text{Shen} = 1.17(D)^{0.62} \cdot V^{0.62}$$

$$\text{Laursen} = 1.11(D)^{0.5} \cdot h^{0.5}$$

, se ha preferido trabajar con los resultados de Colorado State University (CSU)

$$\frac{y_s}{h} = 2 \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_4 \cdot \left(\frac{D}{h}\right)^{0.65} \cdot Fr^{0.43}$$

### Cálculo de Extensión de la Socavación

$$L_s = 2 \cdot y_s$$

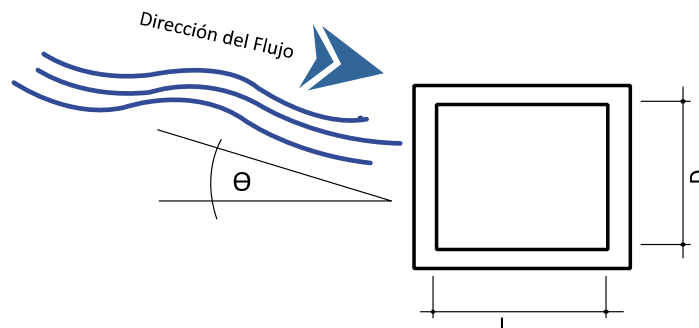
Los factores de corrección  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$  y  $k_4$  son exclusivamente para el cálculo de la profundidad de socavación local en la pila de sección planteada.

El factor de corrección  $k_1$  se refiere a la influencia de la forma de la sección transversal del pilar en la socavación producida. La más frecuente es la sección circular para la que  $k_1$  es igual a 1.

Forma de la Pila	$k_1$
Circular	1
Cuadrada	1.1
Triangular	0.9
Hexagonal	1.1

El factor de corrección  $k_2$  es muy importante y se refiere a la influencia del ángulo de ataque de la corriente. Esta influencia no se da en las secciones circulares, puesto que son simétricas en todas direcciones.

En los pilares de sección rectangular, la influencia del ángulo de ataque en la socavación puede ser muy fuerte en la medida en la que el ángulo sea mayor y en la que lo sea la relación entre la longitud  $L$  del pilar a lo largo de la corriente y el ancho  $D$  del pilar, transversal a la corriente.



$$k_2 = \left( \cos \theta + \frac{L}{D} \sin \theta \right)^{0.65}$$

Ángulo de ataque	L/D = 4	L/D = 8	L/D = 12
0°	1	1	1
15°	1.5	2	2.5
30°	2	2.75	3.5
45°	2.3	3.3	4.3
90°	2.5	3.9	5

Si L/D es mayor que 12, se usan los valores correspondientes a L/D= 12 como máximos.

El factor de corrección k3 se refiere a la condición del lecho, específicamente a la fase del transporte sólido por influencia de las dunas. Cuando el transporte de fondo es inexistente o se produce con un lecho plano, o con dunas de pequeña altura, comprendida entre 0,60 y 3 m el valor de k3 es igual a 1,1. El factor de corrección k4 disminuye la profundidad de socavación por acorazamiento del hueco de socavación para materiales del lecho con D50 mayor o igual que 2 mm o D95 mayor o igual que 20 mm ( $D50 \geq 0.002 \text{ m}$  o  $D95 \geq 0.02 \text{ m}$ ). El factor de corrección k4 es igual o menor que 1. En una situación extrema puede ser tan bajo como 0.4.

### 3.1.5. Interpretación de resultados

#### DATOS

Simulador Cauce Fluvial  
 y: 0.0325 m  
 A: 0.4 m  
 L1: 0.46 m

#### CALCULOS

CALCULO DE TIEMPO  
 Tiempo en recorrer una partícula una L=0.46 m 2.55267 seg

#### Columna

D: 0.115 m  
 k1: 1  
 k2: 1  
 k3: 1.1  
 k4: 1

#### CALCULO DE CAUDAL

Área Sección Canal: 0.013 m<sup>2</sup>  
 Velocidad: 0.1802 m/seg  
 CAUDAL: 0.00234 m<sup>3</sup>/seg  
 2.34265 lt/seg  
 FROUDE: 0.31914

#### Medición de Tiempo (seg)

UBICACION  
 Izquierdo Centro Derecho  
 3.08 2.25 2.08  
 3.48 2.70 2.15  
 3.51 2.13 2.34  
 3.09 2.58 2.05  
 2.44 2.10 2.31

#### CALCULO DE PROFUNDIDAD DE SOCAVACION [ys]

Formula de Shen 0.106 m  
 Formula de Laursen 0.068 m  
 Formula de Colorado State University (CSU) **0.099 m**

#### CALCULO DE EXTENSION DE LA SOCAVACION [Ls]

Formula Dr. Ing. Arturo Roche Felices **0.199 m**



Después de haber realizado los cálculos necesarios, se observa que la profundidad de socavación máxima es de 0.099 m según CSU. La Extensión de la Socavación es de 0.199 m.

El mismo procedimiento de cálculo se realizó para cada una de las secciones de columnas, por tratarse de un artículo técnico se omite el procedimiento de cálculo por ser repetitivo. Se presenta un resumen de los datos obtenidos para facilidad de comparación y análisis. Se ordenaron los resultados de acuerdo al tipo de sección de la pila.

<b>SECCION PILA</b>	<b>PROFUNDIDAD SOCAVACION [m]</b>	<b>EXTENSION DE SOCAVACION [m]</b>
CIRCULAR	0.099	0.199
CUADRADA	0.109	0.219
TRIANGULAR [Pared]	0.109	0.219
TRIANGULAR [Vértice]	0.090	0.179
HEXAGONAL [Pared]	0.113	0.225
HEXAGONAL [Vértice]	0.084	0.168

Como se puede apreciar, las secciones triangular y hexagonal, cuando están con un vértice en línea con el flujo, causan menos daño que las demás secciones analizadas, inclusive la sección circular, que aparentemente por no tener aristas suponía ser la más óptima.

## **CAPÍTULO IV: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **4.1. Conclusiones**

- La modelación física constituye una herramienta valiosa para la obtención de una solución práctica a la elaboración del diseño definitivo de obras de importancia como puentes. Los métodos numéricos plantean soluciones con modelos matemáticos idealizados, realizando simplificaciones importantes, que a su vez causan efectos que deben ser valorados mediante ensayos experimentales, a través de modelos físicos a escala reducida.
- El ángulo de ataque del flujo a la pila resulta importante en las pilas con sección diferente a la circular, sin embargo se debe analizar este factor para fases de diseño y construcción.

### **4.2. Recomendaciones**

- Es recomendable que se analicen los posibles problemas a presentarse en un simulador, de manera que se prevean y se tomen correcciones de ser el caso, en una etapa que no represente pérdidas económicas mayores y se complemente la bibliografía con la experimentación en un modelo reducido.
- Las formas de las pilas analizadas son un punto de partida para el futuro análisis de formas de secciones combinadas o experimentales, que en tamaño no resultaría costoso y se apreciarían los posibles fenómenos de manera más didáctica y clara.

## BIBLIOGRAFÍA

- Hidráulica de los Canales Abiertos, Ben Te Chow, editorial Mc Graw Hill, 1982, Cap. 15.
- Obras Hidráulicas, José Zurita Ruiz, Ediciones CEAC, 1985, Cap. 4.
- Schlag, Albert. Hidráulica. Primera Edición, México: Editorial Limusa S.A., 1977.
- Domínguez, Javier. Introducción a la Hidráulica Fluvial. Capítulo 12 Modelos Fluviales. Facultad de Ingeniería Civil. Universidad Nacional de Ingeniería. Lima, 1998.
- LINSLEY, Ray y FRANZINI, Joseph. Ingeniería de los Recursos Hidráulicos. Primera Edición, México: Editorial Continental, 1980.
- Introducción a la Hidráulica Fluvial, Arturo Rocha Felices, Primera Edición Noviembre 1998, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Ingeniería
- Ingeniería de Ríos, Juan P. Martin Vide, Universitat Politècnica de Catalunya, Edicions UPC, S.L.
- Los Modelos como herramienta valiosa para el Diseño Hidráulico, Rocha Felices Arturo. (2003).
- Publicación Año 2010, Erosión en pilares y estribos de puentes, Dr. Ing. Arturo Rocha Felices.



### Vista General del Simulador Hidráulico

Se aprecia en su totalidad y en funcionamiento el simulador de cauce fluvial en las instalaciones del laboratorio de la Escuela Politécnica del Ejército.