

# EROSIÓN LOCAL EN PILAS DE PUENTE: LOS PROCESOS Y SU MITIGACIÓN. APLICACIÓN AL PABELLÓN PUENTE DE LA EXPO 2008 DE ZARAGOZA

Bateman, A. <sup>1</sup>, Martín-Vide, Juan P. <sup>1</sup>

<sup>1</sup>Departament d'Enginyeria Hidràulica, Marítima i Ambiental  
e-mail: [juan.pedro.martin@upc.edu](mailto:juan.pedro.martin@upc.edu), [allen.bateman@upc.edu](mailto:allen.bateman@upc.edu)

**Paraules Clau:** Puente, Erosión local, Socavación, Pila, Estribo, Modelo físico, Expo 2008.

**Resum:** Se exponen los avances en el estudio de la erosión local en pilas de puente gracias a la experimentación en modelos a escala reducida en laboratorio. Se describe la evolución temporal, las características de la erosión local en pilas de base cuadrada y circular, la influencia de las presiones no hidrostáticas, así como también la protección que ha de utilizarse para mitigar la erosión. Desde el punto de vista de la ingeniería el uso de modelos reducidos es imprescindible debido a la complejidad de los fenómenos que intervienen. Se presenta la aplicación a la evaluación del riesgo de erosión fluvial en una pila compleja de gran anchura, construida en el cauce del río Ebro en Zaragoza. Se describe el problema de erosión local, las características del modelo físico ensayado y los mantos de escollera que consiguen detener la erosión, así como la ejecución y auscultación de esta protección.

## 1. INTRODUCCIÓN

Los procesos erosivos en pilas de puente y estribos son fenómenos de gran complejidad y requiere del estudio continuo para poder profundizar en su entendimiento. El proceso de erosión se basa en varios conceptos, el primero de ellos es el arrastre de las partículas de sedimento por el flujo de agua, la creación de vórtices activos debido al choque del agua contra la superficie de la pila, el derrumbe del material en la zona de formación del foso como un fenómeno independiente del arrastre pero que puede verse comprometida por él, la distribución de presiones no hidrostáticas en el lecho alrededor de la estructura [1], la geometría de las pilas, el tipo y granulometría del lecho, y otros aspectos relacionados con la morfología del cauce.

Es muy difícil acceder a un conjunto de ensayos experimentales completos y caracterizados por los mismos efectos hidrodinámicos. Cada trabajo experimental se basa en la infraestructura que cada laboratorio utiliza, el material disponible, la metodología de trabajo sobre todo en lo que se refiere al tiempo de ensayo, y otros factores que hacen que los ensayos sean de difícil comparación entre sí. Sin embargo, sería interesante a nivel global el rescate y el almacenamiento a forma de biblioteca de todos los ensayos realizados por los diferentes investigadores a todo lo largo y ancho del mundo científico. Tratar de mantener la coherencia de unos ensayos con otros manteniendo la metodología de trabajo permite sistematizar mejor el conocimiento de estos fenómenos. El desarrollo de nuevos ensayos permitirá conocer mejor este tipo de fenómenos aunque los ensayos sean repetitivos, los nuevos ensayos suman nuevos datos que ayudan a su comprensión. No es fácil dar con un buen modelo pues siempre se encuentran fenómenos adicionales que influyen en la evolución y desarrollo de la erosión

local. Por ello cabe destacar que la ejecución de nuevos ensayos en los que se ponga en marcha toda la técnica de medición, es fundamental en el desarrollo de nuevos modelos conceptuales.

Las nuevas técnicas utilizadas, como es el uso de cámaras digitales que permiten de forma más sencilla acceder a fotogramas con una gran calidad y cantidad de información, iluminación láser, sensores de ultrasonido, medición de velocidades, y otras técnicas dan como resultado una base de datos de gran importancia para que en un futuro no muy lejano para que los modelos numéricos puedan ser validados y calibrados.

La distribución no hidrostática de presiones es uno de los factores que afectan directamente al inicio del movimiento de la protección de escollera que se coloca alrededor de las pilas de puente. Este artículo se dedica a la comparación del inicio de movimiento que ocurre en pilas de base circular y cuadrada. Para este objetivo se realizaron un total de 30 ensayos con diferentes dimensiones de pilas y diámetro de escollera. Estos ensayos se realizaron en el canal de alta pendiente del Laboratorio de Morfodinámica Fluvial del Grupo de Investigación en Transporte de sedimentos (GITS-UPC) del Departamento de Ingeniería Hidráulica. Se realiza la comparación con otros autores para extraer conclusiones y confirmar hipótesis de trabajo. La distribución no hidrostática de presiones en la superficie del lecho es de vital importancia para distinguir el comportamiento de los procesos de transporte de material. La principal idea se centra en encontrar el inicio de movimiento de la escollera de protección.

## 2. INSTALACIÓN EXPERIMENTAL Y MÉTODO DE TRABAJO

Los ensayos se han realizado en el Laboratorio Morfodinámica Fluvial-GITS de la UPC. El canal utilizado, ver esquema es de 2.5 m de anchura y comporta una zanja de 0.5 m de profundidad y 2.5 m de longitud, ésta zanja se ha llenado con arena silíceica de diámetro  $D_{50}=1.65\text{mm}$ . La longitud total es de 9 metros, dividida en tres tramos de longitud aproximadamente igual. La pendiente media del canal es del orden 0.6%. La geometría de las pilas utilizadas fue de 4, 5, 6, y 9 cm de diámetro y 60 cm de altura. También se han realizado ensayos en el SAFL (Saint Anthony Falls Laboratory) que completan una serie de datos de gran valor en el desarrollo de ésta investigación.

Figura 1. Esquema del canal utilizado

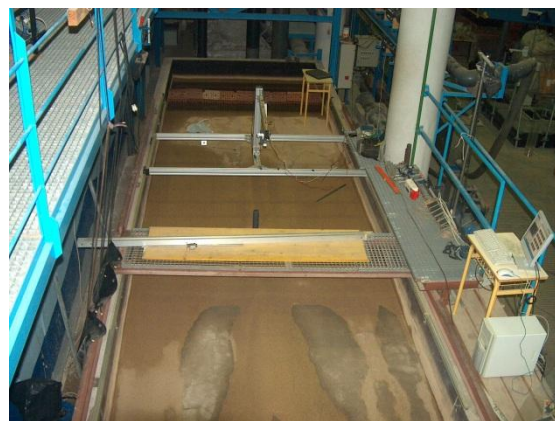
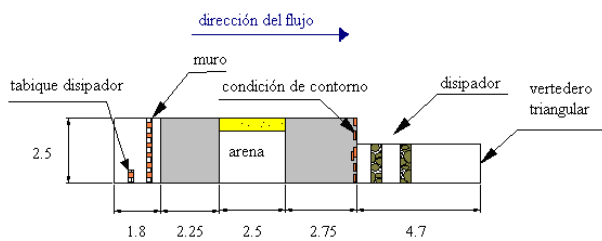


Figura 2. Fotografía del canal utilizado.

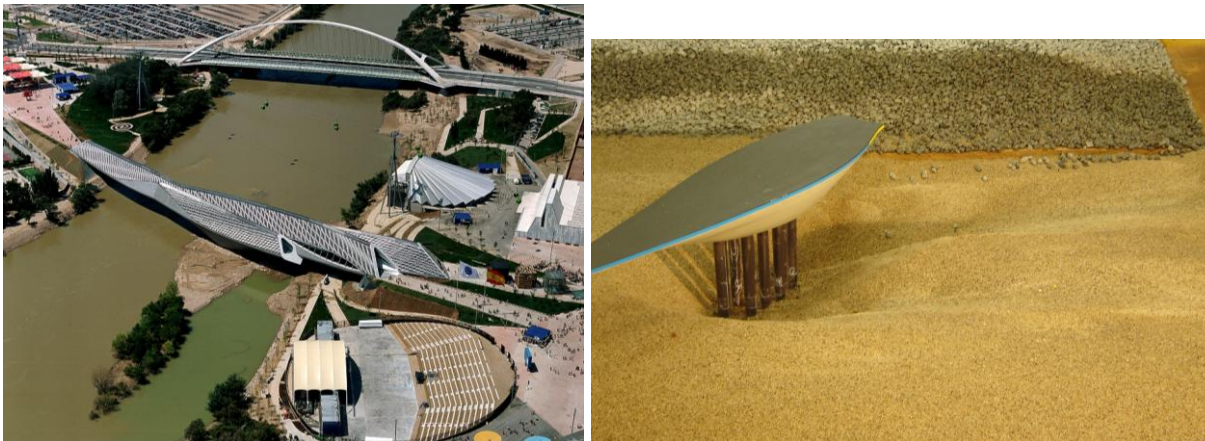
Se ha utilizado también la instalación del canal de alta pendiente del Laboratorio de Morfodinámica Fluvial operado por GITS-UPC: 40 cm de anchura por 60 cm de altura y 9 m de longitud. El caudal se controla desde un ordenador y se puede variar desde sólo  $250\text{ cm}^3/\text{s}$  hasta  $50\text{ l/s}$ , con dos válvulas automáticas de dos diámetros diferentes colocadas en paralelo.

### 3. LA TEORÍA

En el desarrollo de la investigación se han utilizado las teorías de Batchelor (1953) de la dinámica de los vórtices, la asociación de ideas de la hidrología básica para el comportamiento del derrumbe de material, el concepto de inicio de movimiento, la relación geométrica simple de la erosión y otros conceptos que dotan a esta investigación de varios años de un soporte científico sólido. La dinámica de los fluidos es esencial para dar soporte a los modelos conceptuales que se utilizan en la identificación de los diferentes fenómenos que se desarrollan durante el proceso de erosión.

### 4. APLICACIÓN AL PABELLÓN PUENTE DE ZARAGOZA 2008

El Pabellón Puente de la Exposición Internacional Zaragoza 2008, uno de los más visitados por el público de la muestra, diseñado por la arquitecta iraquí Zaha Hadid, ha supuesto un reto técnico para las especialidades implicadas en su ejecución, desde su cimentación, con pilotes de 2 m de diámetro y profundidades de más de 70 m, hasta la hidráulica fluvial, pasando por la estructura. El puente se apoya en una pila central cimentada sobre una pequeña isla natural cercana a la margen izquierda del río (fig.3). El proyecto arquitectónico incluyó un “cáliz” que envuelve el encepado abrazando los 10 pilotes de 2 m y soldándose al tablero por debajo. El cáliz, así como una parte inferior del tablero, resultan mojados por la avenida de proyecto del río Ebro. La obstrucción del flujo es de 28 m de anchura al nivel del fondo y de 80 m de longitud a nivel de la superficie libre. Se consideró para la cimentación de la pila un espesor de terreno no colaborante en el cálculo de los pilotes de sólo 6 m. Esta cifra es mucho menor que la erosión potencial calculada, de 25-27 m. Una protección mediante manto de escollera<sup>[1]</sup> debería ser un anillo de 30 m de anchura rodeando la pila, de 3 m de espesor y escollos de unas 5 toneladas. La magnitud de la erosión potencial y las dimensiones teóricas de la obra de protección (extensión y peso) aconsejaron el estudio en modelo, encargado en marzo de 2008 siendo la fecha de inauguración de la Exposición el 15 de junio de 2008 [2].



*Fig. 3. Vista aérea del Pabellon Puente. Fig.4 modelo físico sin escollera.*

Un puente fluvial debería abordar el estudio de los aspectos hidráulicos, en particular la erosión, desde sus primeras fases, puesto que un 50% aproximadamente de los fallos de grandes puentes tiene su causa en la socavación. Trazado, estructura, cimentación e hidráulica fluvial se deberían estudiar conjuntamente. La ingeniería fluvial no debe ser la última

disciplina en intervenir, so pena de no ofrecer más que soluciones insatisfactorias. Un manto de escollera no es más que un medio *fungible* para combatir la erosión local (no la general ni la de estrechamiento), que no forma parte inseparable de la estructura, sino que es granular y móvil. Por ello, podría perderse o ser afectado algún día por otras obras en el río.

#### 4. MODELO Y RESULTADOS

Un modelo físico no puede ser una réplica exacta de la realidad, pero sí una técnica de análisis superior a un modelo matemático sobre todo en el caso de flujo tridimensional, con presencia de un lecho aluvial y cuando existe una interacción entre el agua, el fondo y una estructura de geometría compleja. Se ensayó el modelo con la técnica de “agua clara”, es decir con agua sin material sólido. La arena del lecho se encuentra cerca de su inicio de movimiento para el caudal de ensayo. El modelo no es plenamente de lecho móvil sino localmente erosionable: sólo son reales las formas directamente asociadas al foso de socavación. La larga duración de los ensayos de agua clara es un artificio para garantizar que el ensayo quede del lado de la seguridad. El material aluvial del río Ebro en Zaragoza parece ser una grava media-gruesa de tamaño  $D_{50} = 16.6$  mm. Para el modelo se eligió una arena uniforme con  $D_{50} = 1.28$  mm. La escala del tamaño de grano (16.6/1.28) es alrededor de la cuarta parte de la escala geométrica del modelo. Esta exageración no altera la semejanza en la erosión local, excepto en el caso de pilas muy grandes en relación al grano<sup>[6]</sup>, como puede ocurrir en el prototipo. La uniformidad de la arena asegura que en el modelo no se produce freno a la erosión local por acorazamiento del lecho: la erosión en el modelo puede ser mayor que la real, es decir el modelo estaría del lado de la seguridad. El modelo reprodujo la parte del río que influía sensiblemente en los fenómenos que se estudian. La atención a la pila hacía irrelevante el meandro y el puente de aguas arriba y las planicies inundables. El caudal utilizado fue  $5222 \text{ m}^3/\text{s}$  (500 años); la velocidad  $3,8 \text{ m/s}$ . Se sumó al calado la erosión general transitoria. El modelo por sí mismo no puede simular de ninguna manera esta erosión, que existiría en el río durante la circulación de una avenida. Respecto a la erosión por estrechamiento se obtiene del modelo. La escala geométrica fue finalmente 62.5. La máxima erosión bajo el cáliz medida al final del ensayo fue de  $17.5 \text{ m}$ , con respecto al fondo inicial (la longitud de pilotes descubierta fue  $20.3 \text{ m}$ , fig.4). La preocupación despertada por el cálculo se vio pues confirmada por el modelo reducido. El volumen de material erosionado es  $43.500 \text{ m}^3$ , que equivaldría a un cubo de más de  $35 \text{ m}$  de lado. La superficie total de fondo erosionado es algo más de  $1 \text{ Ha}$ . La escollera de  $600 \text{ kg}$  resultó suficiente y su extensión bastante menor de la calculada.

#### REFERENCIAS

- [1] Bateman, A.; Fernández, M.; Parker, G. 2005. Morphodynamic model to predict temporal evolution of local scour in bridge piers. RCEM, Illinois - USA.
- [2] Martín-Vide, J.P., Fael C.M.S., Núñez F., Ferrer C., Gutiérrez F., Goyeneche F-J. “La audacia del Pabellón Puente en el río Ebro (Expo 2008): consecuencia en erosión fluvial y exigencias de protección y auscultación”. *Rev.de Obras Públicas*, n.3497, III-2009, pp.53-68.