

**ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA EROSIÓN LOCAL EN ESTRIBOS DE PUENTE.**

Bateman, A; Bertram, A; Roca, M.

Sección de Ingeniería Hidráulica e Hidrológica  
Universidad Politécnica de Cataluña

**Resumen**

La erosión local en estribos de Puente es una de las principales causas de destrucción de estos elementos estructurales durante las avenidas. Según Melville (1992) un 30 % de fallos de puentes observados durante el periodo 1960-1984 fueron debidos a problemas en los estribos. La U.S. Highway administration informa en el año 1973, de 383 fallos de puentes el 25% se debió a fallo en pilas y el 72% involucraban los estribos. La complejidad hidrodinámica, como vórtices coherentes y helicidad que toman parte en el fenómeno, hacen que muchos investigadores estén tratando este tema. Una muestra de ello lo componen algunos de los artículos más interesantes que aparecen en la bibliografía sobre este tema como: Cardoso (1999), Dongol (1994), Franzetti (1982), Froelich (1989), Kandansamy(1985), Kwan(1984) y Melville (1992). Los factores más importantes que se estudian en este tipo de artículos lo constituyen la erosión máxima del foso al pie del estribo en función de las características geométricas e hidráulicas y la evolución temporal del foso. Este problema complejo se ataca mediante la investigación experimental que muchas veces implica la resistencia del propio sistema experimental ante largos periodos de tiempo.

**Abstract**

Local scour at bridge abutments is the first cause of destruction of this structural element during floods. The hydrodynamic complexity, like coherent vortices which take place in the phenomena, hold a lot of researchers to studying this topic. A sample of the most interesting papers we found in the bibliography is Cardoso (1999), Dongol (1994), Franzetti (1982), Froelich (1989), Kandansamy(1985), Kwan (1984) and Melville (1992). The time evolution of scour in abutments is one of the most important factors to know the maximum scour that takes place in the hole and also the time dependent function scour. The complexity of the problem is solved by experimental research, but experimental set up have to resist long experiment periods.

**1. Introducción**

Este fenómeno ha sido estudiado en las últimas décadas por varios investigadores en modelo reducido, el lógico desconocimiento de las condiciones que llevan a la erosión máxima (condición de movimiento incipiente y tiempo de ensayo suficiente para la llegada al equilibrio) ha provocado que los datos obtenidos hasta mediados de los 80 reflejen erosiones considerablemente reducidas. Conscientes de la falta de métodos precisos para la estimación de erosiones locales en estribos de puente, se han realizado varios estudios desde principios de los 80. Estos trabajos han sido sintetizados por Melville (1992) quien desarrolló un exhaustivo método basado en envoltentes de datos de laboratorio. Sin embargo, en la bibliografía se han encontrado pocos datos experimentales en las condiciones adecuadas. Como se muestra en la Tabla 1 sólo se conocen 21 datos experimentales de los cuales 15 corresponden a estribos con longitudes relativas  $L/y < 4$ . El presente trabajo tiene como objetivo realizar una serie de experimentos para valores de  $L/y$  superiores a los de los trabajos anteriores.

El estudio realizado está limitado a un estribo perpendicular al flujo con las condiciones de inicio de movimiento para arena silíceas de diámetro uniforme y con características hidráulicas similares a los ensayos realizados en el Laboratorio Nacional de Ingeniería Civil en Lisboa (LNEC) en que se utilizó piedra pómez de diámetro uniforme. En el artículo se presentan los últimos resultados que hemos

obtenido sobre la evolución temporal de la máxima erosión del foso hasta llegar al equilibrio (experimental). Estos resultados se comparan con los de diferentes autores. El análisis de la máxima erosión se presenta y se discute. Se analiza la relación existente entre el trabajo máximo del flujo para extraer una partícula del foso. Todos los experimentos realizados han llegado al equilibrio, así que cada ensayo presentado ha durado más de 10 días. También se analiza cuantitativamente la formación de vórtices coherentes y su influencia en la erosión del lecho.

## 2. Conceptos básicos sobre socavación en estribos

Si realizamos un análisis dimensional de las variables que influyen en la erosión máxima de equilibrio  $d_{se}$  en un estribo o espigón, considerando que el material del lecho tiene una densidad relativa constante y despreciando los efectos viscoso y de contracción del cauce, llegaremos a la expresión (1). Según Melville (1992), la erosión máxima se alcanza para estribos verticales ( $K_s = 1$ ) colocados normales a la corriente ( $\theta = 90^\circ$ ) en un canal rectangular ( $K_G = 1$ ) en condiciones de movimiento incipiente ( $u/u_c = 1$ ). Suponiendo además que el sedimento del lecho es uniforme ( $\sigma_g < \approx 1.5$ ) y que  $L/d_{50}$  es lo suficientemente grande como para influir  $d_{se}$ , la erosión máxima puede expresarse con la relación funcional (2)

$$\frac{d_{se}}{y} = \varphi \left( \frac{u}{u_c}, \frac{y}{d_{50}}, \frac{L}{y}, \sigma_g, K_s, \theta, K_G \right) \quad (1)$$

$$\frac{d_{se}}{y} = \varphi \left( \frac{L}{y} \right) \quad (2)$$

Varios investigadores han trabajado para la determinación de (2) y en la actualidad existen las siguientes expresiones, particularizadas para nuestros ensayos, Laursen (1963) (3), Froehlich (1989) (4), Melville (1992) (5), Dongol (1994) (6) y Lim (1997) (7)

$$d_{se}/y = 1.89(L/y)^{0.5} \quad (3)$$

$$d_{se}/y = 0.78(L/y)^{0.63} (Fr)^{1.16} (d_{50}/y)^{-0.43} (\sigma_g)^{-1.87} + 1 \quad (4)$$

$$d_{se}/y = 10 \quad \text{para } L/y > 25; \quad d_{se}/y = 2(L/y)^{0.5} \quad \text{para } 2 < L/y \leq 25 \quad (5)$$

$$d_{se}/y = 10 \quad \text{para } L/y > 100; \quad d_{se}/y = 2.51(L/y)^{0.3} \quad \text{para } 2 < L/y \leq 100 \quad (6)$$

$$d_{se}/y = 1.8(L/y)^{0.5} \quad (7)$$

Como vemos en (2), la longitud relativa  $L/y$  es el único parámetro del que depende la erosión en las condiciones geométricas más sencillas y ésta será pues la variable analizada de los ensayos que se realizan en el marco de este trabajo.

## 3. Descripción experimental

Los ensayos se han realizado en el laboratorio de la Sección de Ingeniería Hidráulica e Hidrológica de la Universidad Politécnica de Cataluña. El canal utilizado es de 2.5 m de anchura y comporta una zanja de 0.5 m de profundidad y 2.5 m de longitud. Esta zanja se ha llenado con arena silíceas con las características que se muestran en la Tabla 2. La longitud total es de 9 metros, dividida en tres tramos tal y como se representa en la figura 1. La pendiente del canal es de media cero, sin embargo una topografía detallada muestra las anomalías que se presentan en la figura 2. Sin embargo, para los experimentos que se han llevado a cabo no presenta mayor problema en cuanto a la precisión de los resultados.

El límite máximo de erosión que se podía permitir en los ensayos es de 50 cm lo que condicionó la máxima longitud del estribo. Como modelo de estribo se utilizó una plancha de metacrilato de 1000x750x10 mm que posteriormente se fue recortando para obtener las diferentes longitudes de ensayo: 1000, 900, 800, 700, 600, 400 y 200 mm respectivamente. Las profundidades de agua utilizadas en los ensayos fueron de 0.062 y 0.088 m que combinadas con las longitudes se obtuvieron 7 ensayos. La metodología seguida en cada ensayo fue la misma. Los ensayos son los denominados de agua clara es decir sin transporte de sedimentos. Una vez colocado el estribo de la longitud escogida, se enrasa el material en la zanja, se introduce el caudal suavemente desde aguas arriba mediante bombeo y desde aguas abajo con otro tipo de suministro manteniendo prácticamente cerrada la condición de contorno aguas abajo y asegurar velocidades de agua inferiores a las del inicio del movimiento, una vez se llega al caudal de ensayo se abre la condición de contorno suavemente hasta llegar a la condición deseada. Se realizaron mediciones de erosión en dos puntos diferentes cercanos al estribo en aquellos donde se espera la máxima erosión y otros dos puntos situados en la dirección del eje del estribo para controlar el avance del foso de erosión. Estas medidas se realizaron mediante ecosondas de tipo ultrasónico (Roca et al. 2000) hasta alcanzar el equilibrio (aproximadamente 10 días) Se midió la configuración final del foso de erosión mediante el uso de limnómetro. En la Tabla 3 se muestran las condiciones de ensayo.

Se realizaron varios ensayos para la determinación de inicio de movimiento y estimar encontrar los niveles y caudales a utilizar en los ensayos de erosión local. Los niveles y caudales se han escogido para realizar una serie de siete experimentos similares a los realizados en el Laboratorio Nacional de Ingeniería Civil de Lisboa y poder comparar los resultados entre la arena silíceo (UPC) y la piedra pómez (LNEC). En este artículo se comparan ambos resultados pero no se entra en los detalles de los experimentos realizados en dicho laboratorio.

## **4. Resultados y discusión**

### **4.1 Estructura del flujo**

En los ensayos realizados en el presente trabajo, se ha podido comprobar que la estructura del flujo está íntimamente relacionada con la geometría del lecho por el que discurre, es decir, con la geometría del foso de erosión que se va formando. Como la forma de este foso y su posición relativa respecto al contorno del canal van variando con el tiempo, es razonable pensar que las características del flujo serán diferentes según el estado de desarrollo del lecho socavado.

En efecto, en los instantes iniciales de cada ensayo el foso aún no se ha formado y las líneas de corriente avanzan perpendicularmente hacia el estribo para colocarse paralelas a él en el último momento y avanzar hacia la cabeza del estribo sin apenas pérdidas de energía por choques o turbulencia, como puede apreciarse en la Figura 3. En la zona comprendida entre el paramento aguas arriba y la pared del canal se forma un débil remolino sin capacidad erosiva que irá retrocediendo a medida que crece el foso desde la punta del estribo hacia la pared

Cuando el foso está a punto de alcanzar la pared las líneas de corriente más alejadas de la cabeza del estribo empiezan a impactar contra el paramento vertical dando lugar a pequeños vórtices rápidos con sentido horario que ingresan en la zona de aguas quietas anteriormente descrita. Dicha zona de agua semiestancada ha substituido el suave remolino anterior por un rápido "remolino de vórtices" con mayor capacidad erosiva, tal como se aprecia en la Figura 3. Esta zona crece a medida que crece el foso debido a que las líneas de corriente cada vez varían su dirección a mayor distancia del estribo hasta tener uno de sus lados coincidente con el estribo. En el caso de estribos relativamente largos ( $L/y > 14$ ), el foso se estabiliza antes de alcanzar la pared y la situación anterior se mantiene indefinidamente. Sin embargo, para los estribos cortos el proceso aún no se ha estabilizado y el foso continuará hasta alcanzar la pared.

En el caso de estribos cortos, el violento remolino de la zona semiestancada invertirá su exceso energético en erosionar el lecho subyacente hasta uniformizar el foso en la dirección transversal a la

corriente. A medida que se uniformiza la pendiente del foso en dirección transversal al flujo, las líneas de corriente se van disponiendo perpendicularmente al estribo, como se aprecia en la Figura 4. Las líneas de corriente son todas paralelas y las que intercepta el estribo chocan contra él generando un fuerte flujo descendente que acelera la erosión en la base del paramento aguas arriba del estribo. Los impactos también reducirán la energía del flujo que se concentra en la cabeza del estribo. Esta circunstancia implicará que las erosiones a medio paramento aguas arriba sean mayores que las de la cabeza del estribo.

Por lo que a la estructura tridimensional del flujo se refiere, la configuración en forma de surcos del foso de erosión y los ensayos realizados con trazador sugieren la existencia de vórtices o flujos en espiral cuyo eje es casi paralelo a la corriente principal del flujo y que se forman en la zona de aguas arriba del estribo. Se han alcanzado a distinguir claramente tres vórtices de este tipo, el principal que fluye junto a la cabeza del estribo y los secundarios, que fluyen más alejados de la cabeza y que erosionan el lecho cada vez más aguas abajo, uno respecto del otro. Utilizando el trazador se pudo observar como prácticamente no hay difusión turbulenta entre los vórtices y la circulación de los mismos indica que el principal es capaz de generar el segundo vórtice transmitiendo su energía de rotación y este a su vez transmitiendo al tercer vórtice. Este proceso de transmisión de la energía se refleja en la forma de los fosos de erosión generados en el lecho. Evidentemente los vórtices secundarios tienen cada menos energía que el principal y los fosos son por tanto de menor envergadura. La Figura 5 muestra una foto-esquema de la situación de los tres vórtices y un corte esquemático de la situación.

#### **4.2 Concepto de velocidad límite en el foso de erosión**

Cuando se estabiliza el proceso erosivo se puede comprobar que la velocidad media del flujo que pasa por la zona afectada por el foso de erosión es constante e igual a 0.2 m/s en nuestros experimentos con independencia del calado, longitud y longitud relativa del estribo. El foso ha aumentado su profundidad y su área hasta llegar a dicha velocidad. Esto permite afirmar que existe una velocidad crítica a la que se tiende en el tiempo desde valores muy superiores y por debajo de la cual ya no es posible arrastrar más partículas del foso. Los cálculos se presentan en la Tabla 4.

#### **4.3 Erosión alrededor del estribo**

Así pues, en la cara aguas abajo del estribo, la erosión adimensional  $d/y$  medida en puntos a diferentes distancias de la pared del canal se dispone según curvas potenciales. Como puede verse en la Figura 6., para los puntos cercanos a la cabeza del estribo estas curvas descienden suavemente a medida que disminuye la longitud relativa del estribo  $L/y$  hasta confundirse en una única curva para los valores más bajos de  $L/y$ . En cambio, para los puntos más lejanos a la cabeza del estribo estas distribuciones pasan a ser crecientes a medida que  $L/y$  disminuye llegando a converger todas ellas para  $L/y \approx 2$ . La explicación de este comportamiento es que el foso de erosión aguas abajo alcanza la pared para los valores de  $L/y$  menores, con lo que la sección transversal del foso bascula alrededor de la cabeza del estribo y se uniformizan las erosiones a lo largo de esta cara del paramento hasta alcanzar una sección con profundidad constante para estribos con  $L/y < 2$ .

En la cara aguas arriba del estribo, la situación es muy diferente y vemos en la Figura 7 que para los estribos cuyas longitudes no implican contacto del foso con la pared del canal — i.e.  $L/y > 14$  —, las profundidades adimensionalizadas  $d/y$  aumentan con la longitud de manera potencial. En cambio, cuando se ha producido contacto del foso con la pared, estas profundidades aumentan considerablemente hasta superar ligeramente la profundidad correspondiente a la cabeza del estribo.

Este cambio tan brusco y distinto respecto al del paramento opuesto es debido a que la llegada del foso a la pared del canal lleva aparejada la aparición de un fuerte flujo descendente que uniformiza el fondo del foso a este lado del estribo de manera brusca y la falta de alimentación de sedimento. En el paramento opuesto, este flujo descendente no existe y el basculamiento del fondo aumenta gradualmente con la disminución de la longitud relativa  $L/y$ .

#### **4.4 Posición y magnitud de la erosión máxima**

En primer lugar, la posición del punto de mayor erosión en los estribos de mayor longitud se sitúa en la cabeza del estribo mientras que en los estribos de menor longitud este punto se desplaza hacia la pared del canal. En la Figura 7 se aprecia que este valor máximo se alcanza a  $0.8L$  de la pared para  $L/y = 12.90$  y  $L/y = 11.29$ , mientras que para  $L/y = 6.45$  y  $L/y = 4.55$  este máximo se encuentra a  $0.6L$  del margen del cauce. En cuanto a la magnitud, en la misma figura vemos que en todos los puntos la erosión aumenta siguiendo una ley potencial en el caso de los estribos cortos  $L/y < 14$ . Para estribos más largos este comportamiento sólo lo conserva la erosión medida en la cabeza del estribo, mientras que en los demás puntos esta erosión desciende bruscamente para aumentar de nuevo de manera potencial.

#### **4.5 Comparación con formulaciones existentes**

En este apartado se realiza un análisis comparativo entre los datos obtenidos en la experimentación y las diferentes expresiones existentes en la bibliografía. Estas expresiones se encuentran en su forma particularizada para las condiciones experimentales consideradas en este trabajo. Estas son: 1) estribo de pared delgada y vertical, formando ángulo recto con la pared de un cauce rectangular; 2) condiciones de inicio del movimiento, es decir  $u/u_c = 1$ ; 3) El sedimento del lecho es uniforme ( $\sigma_g < \approx 1.5$ ) y tal que no formen rizos de arena ( $d_{50} > \approx 0.6 \text{ mm}$ ); y 4)  $L/d_{50}$  es suficientemente grande como para que  $d_{50}$  no tenga influencia en  $d_{se}$ .

El hecho que las fórmulas de Lim, Laursen y Melville sólo se adapten a los valores más bajos de  $L/y$  puede deberse a que la mayoría de datos experimentales disponibles hasta su publicación corresponden a ensayos con estribos cortos con  $L/y < \approx 7$ , publicada por Raudkivi (1990). Posteriormente, Dongol (1994) llevo a cabo una extensa campaña de ensayos con estribos de grandes longitudes relativas, llegando a  $L/y = 100$ , de manera que la fórmula propuesta por este autor se adapta mejor a los datos experimentales correspondientes a los estribos de gran longitud relativa. También realizó ensayos para estribos con longitudes relativas muy reducidas ( $0.25 < L/y < 1.15$ ), por lo que también se comportará bien para estribos muy cortos. Las comparaciones se pueden apreciar en la Figura 8.

#### **4.6 Comparación con los ensayos con lecho piedra pómez**

Por último, queda por realizar un análisis comparativo entre los resultados obtenidos en este trabajo con los obtenidos para un material del lecho de diferente densidad. La comparación se realiza con los resultados del trabajo de Carbonell (2000) en el LNEC (Lisboa) en condiciones experimentales muy similares ( $L, y, u/u_c, d_{50}$ ) pero con piedra pómez como material de fondo. La densidad de la piedra pómez es de  $14400 \text{ N/m}^3$  frente a los  $26000 \text{ N/m}^3$  de la arena.

En la Figura 9 se aprecia que los puntos correspondientes a cada material se organizan de dos maneras claramente diferenciadas. Por una parte, los puntos correspondientes a arena se disponen según una curva potencial creciente, por otra parte, la erosión correspondiente al lecho de piedra pómez parece depender de la longitud relativa del estribo en los valores más bajos de  $L/y$  y siguiendo la misma curva potencial que para la arena, pero a partir de un cierto valor alrededor de  $L/y = 5$  la erosión se mantiene constante y a un valor muy inferior a la del material arena. La figura también incluye los resultados obtenidos por Roca (1999), algo inferiores a los del presente estudio posiblemente por la corta duración de los ensayos ( $\approx 6$  días). La zona de independencia de la erosión respecto de la longitud del estribo comienza para valores más bajos de longitud relativa del estribo. Así, si para arena esta zona empieza para  $L/y = 20$  según Melville (1992) o  $L/y = 100$  según Dongol (1994), para piedra pómez esta situación se daría alrededor de 5 como puede verse en la Figura 9. Sin embargo, esta posibilidad se contradice con la noción intuitiva de que la erosión aumenta con la disminución de la densidad. Lógicamente, en igualdad de condiciones una misma corriente desplazará con mayor facilidad una partícula menos densa y por tanto menos pesada. En materiales de origen volcánico como piedra pómez se produce un acorazamiento densimétrico que detiene el proceso erosivo en valores inferiores a los esperados. Este acorazamiento es debido a la

presencia de partículas de hierro en algunos granos, que tienden a acumularse en las zonas más profundas debido a su mayor peso (densidad) protegiendo las partículas inferiores de ser arrastradas.

#### 4.7 Evolución temporal

Si se representa la evolución temporal de las erosiones medidas en la cabeza del estribo para todos los ensayos realizados con una escala temporal logarítmica, vemos que los datos se organizan en un conjunto de líneas paralelas muy próximas formadas a su vez por tres tramos rectos en lo que podríamos denominar distribución "trilineal". Estos tramos indican la existencia de tres fases diferenciadas en el proceso de erosión: una fase inicial de distribución logarítmica que finaliza antes de los 1000 s, una fase principal cuya evolución también es logarítmica aunque con pendiente inferior y una fase de equilibrio con pendiente nula, como bien lo muestra Cardoso (1999).

Lo que más llama la atención sobre estas gráficas es que las tanto la pendiente de la fase inicial como la pendiente de la fase principal son iguales para todos los ensayos realizados, con independencia de su calado  $y$ , longitud del estribo  $L$  o longitud relativa  $L/y$ . Es decir, que la velocidad de erosión es la misma independientemente de las dimensiones del estribo, siendo para todos ellos  $\Delta d_s / \Delta \log t \approx 70$  y  $\Delta d_s / \Delta \log t \approx 30$  en las fases inicial y principal respectivamente. Por otra parte, también se aprecia que las curvas correspondientes a profundidades de erosión menores están algo desplazadas hacia abajo. Por otra parte, tal como se aprecia en la Figura 10 parece ser que el equilibrio se alcanza con tiempos superiores para las profundidades de equilibrio  $d_{se}$  mayores.

Otra forma de representar la evolución temporal de la erosión en cabeza es mediante la representación de la profundidad adimensional  $d/d_{se}$  versus el tiempo adimensionalizado  $t/t_e$ . Como se puede apreciar en la Figura 11, los parámetros adimensionales que comprenden los ejes de la misma fuerzan la curva correspondiente a cada conjunto de datos a pasar por el punto (1,1). Los datos indican que en el 1% del tiempo de equilibrio se alcanza el 60% de la profundidad de equilibrio y, de manera similar, que en el 10% del tiempo de equilibrio se alcanza el 80% de la profundidad final. Estos datos demuestran la importancia del tiempo de ensayo en la medida y estimación de la profundidad de erosión. Por ejemplo, en un experimento que se detiene tras 4 h para el cual el tiempo de equilibrio son 12 días sólo alcanzaría entre el 50% y el 60% de la profundidad de equilibrio. Como podemos ver, los datos se organizan según una recta que se ajusta a una correlación  $R=0.96$ .

La relación entre el tiempo de equilibrio y la profundidad de erosión (o la longitud relativa del estribo) también se puede expresar de una manera más general mediante los parámetros adimensionales  $y/L$  y  $ut_e/L$ . En la Figura 12 se muestra la influencia de la profundidad relativa  $y/L$  en la escala de tiempo  $ut_e/L$  para los ensayos realizados. En esta figura se aprecia que la escala de tiempo aumenta con la profundidad relativa para flujos someros y se vuelve independiente de ésta para flujos más profundos. Esta tendencia es similar a la mostrada por la profundidad de equilibrio  $d_{se}/y$  que también es independiente del calado para flujos profundos (valores altos de  $L/y$ ). También es similar a lo que ocurre en pilas, según un trabajo sobre tiempos de equilibrio de Melville (1999).

#### 4.8 Potencia del flujo y trabajo de excavación

Al analizar el proceso de erosión local en estribos desde el punto de vista físico veremos que el trabajo máximo realizado por el flujo para excavar el foso debe realizarse a partir de la potencia del flujo que interviene en el proceso de socavación. Al considerar despreciables las pérdidas por rozamiento y la energía cinética de las partículas, este trabajo será igual a la ganancia de energía potencial de las partículas arrastradas y podemos expresarlo como  $W_{exc} = (\gamma_s - \gamma)d_{50}^3 d_{se}$ . Por otra parte la potencia del flujo interceptado por el estribo puede expresarse como el producto de la energía por unidad de peso (energía específica) por el peso por unidad de tiempo interceptado por el estribo,

es decir  $P_L = \gamma Q \left( y + u^2 / 2g \right) \frac{L}{B}$ . Vemos, Figura 13, que tanto para la arena como para la piedra pómez

existe una correlación de tipo potencial entre  $W_{exc}$  y  $P_L$  y que para el material arena el mismo flujo realiza un mayor trabajo. Esto es debido, como ya hemos indicado anteriormente, al acorazamiento

densimétrico inherente a los materiales de tipo volcánico cuyas partículas metálicas confieren una mayor densidad a las partículas del fondo dificultando el arrastre del material de fondo. La relación entre el trabajo total realizado por el flujo —  $W_L = t_e \cdot P_L$  — y la parte de ese trabajo empleado para excavar el foso de erosión— calculado como  $W_{exc} = (\rho_s - \rho) Vol(d_{se}/3)$ .

## 5. Conclusiones

En estribos largos ( $L/y > \approx 14$ ) y en las fases iniciales del proceso de los cortos, el foso asemeja un cono invertido con un único punto de máxima profundidad y las líneas de corriente desvían su dirección hasta converger en la cabeza del estribo dando lugar a dos corrientes en espiral paralelas y de sentido contrario llamadas vórtice principal y secundario. La socavación máxima se dará en la cabeza del estribo y será debida a la concentración de caudales en este punto. Por otra parte, en estribos cortos ( $L/y < \approx 14$ ) se generan fosos uniformes en la dirección transversal al flujo. Las líneas de corriente conservan su paralelismo inicial y terminan chocando con el estribo generando un flujo descendente que avanza por la base del paramento hasta la cabeza y dará lugar al vórtice principal. La acción del principal induce dos vórtices paralelos y exteriores llamados secundario y terciario. La socavación máxima se producirá a lo largo del paramento aguas arriba y se deberá a la acción del flujo descendente.

Para valores intermedios de  $L/y$  todas las fórmulas a excepción de Froehlich (1984) tienen un buen comportamiento. Sin embargo, para los estribos más largos ( $L/y > \approx 14$ ) o más cortos ( $L/y < \approx 3$ ) la fórmula de Dongol (1994) es la que ofrece resultados más fiables.

La profundidad de equilibrio aumenta de manera logarítmica con el tiempo como se ve en la figura 11 de manera que en el 1% y el 10% del tiempo de equilibrio se alcanzan respectivamente el 60% y el 80% de la profundidad final. La velocidad de erosión es la misma independientemente de las dimensiones del estribo, siendo para todos ellos  $\Delta d_s / \Delta \log t \approx 70$  y  $\Delta d_s / \Delta \log t \approx 30$  en las fases inicial y principal respectivamente.

Cabe mencionar por último el buen comportamiento de las relaciones de potencia y trabajo del flujo para relacionar las magnitudes que intervienen en el fenómeno.

## 6 Agradecimientos

Este trabajo ha contado con la ayuda del proyecto REN2000-013 de la CICYT.

**http::**

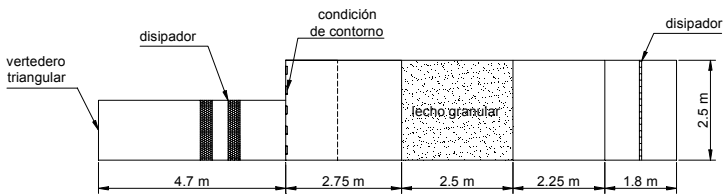
**[www-hidraulica.upc.es/gits.htm](http://www-hidraulica.upc.es/gits.htm)**

## 7. Bibliografía

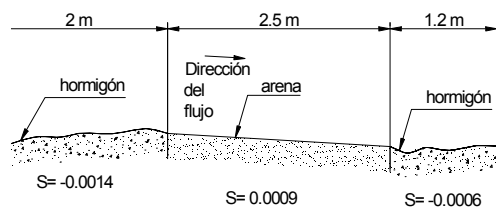
- Carbonell Santacana, E. (2000). "Influencia de la densidad del material de fondo en los procesos erosivos provocados por objeto saliente de margen." Tesina de especialidad, ETSECCPB, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona.
- Cardoso, A. H., Bettess, R. (1999). "Effects of time and channel geometry on scour at bridge abutments." *J. Hydr. Engrg.*, ASCE, 125(4), 388-399.
- Dongol, D. M. S. (1994). "Local scour at bridge abutments." PhD thesis, Rep. No. 544, School of Engineering, University of Auckland, Auckland, New Zealand.
- Franzetti, S., Larcán E., Mignosa, P. (1982). "Influence of test duration on the evaluation of ultimate scour around circular piers." *Proc., Int. Conf. of on the Hydr. Modelling of Civ. Engrg. Struct.*, BHRA Fluid Engineering, Cranfield, Bedford MK43 OAJ, England, 381-396.
- Froehlich, D. C., (1989). "Local scour at bridge abutments." *Proc., ASCE Nat. Hydr. Conf.*, ASCE, New York, N.Y., 13-18.
- Kandasamy, J. K. (1985). "Local scour at skewed abutments." *Rep. No. 375*, School of Engrg., The Univ. of Auckland, Auckland, New Zealand.
- Kwan, T. F., (1984). "Study of abutment scour." *Rep. No. 451*, School of Engrg., The Univ. of - Auckland, Auckland, New Zealand.
- Melville, B. W. (1992). "Local scour at bridge abutments." *J. Hydr. Engrg.*, ASCE, **118**(4), 615-631.
- Roca, M; Cardoso, A.H.; Martín Vide, J.P.; Bateman, A. (2000). Influencia del ángulo de orientación de estribos y espigones en los procesos de erosión local. *Ingeniería del Agua* vol 7 N° 3.

-Roca, M.; Bateman, A.; Bounamous, F.; Perez, C. (2000) Sistema de sensores de ultrasonidos para la medida del fondo. Aplicación a procesos de erosión local en estribos. XIX Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Córdoba Argentina.

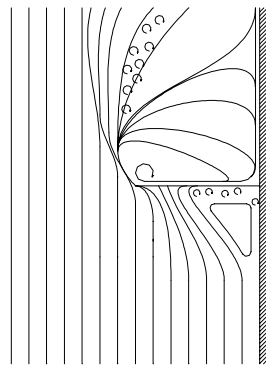
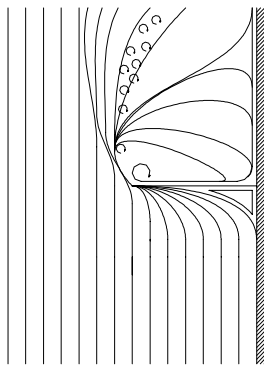
**FIGURAS**



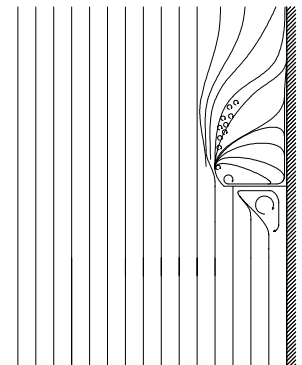
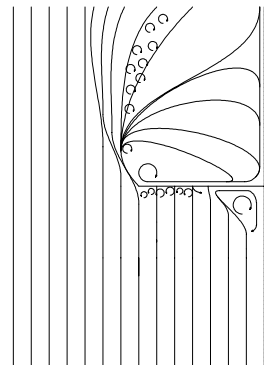
**Figura 1.** Esquema en planta del canal de ensayo



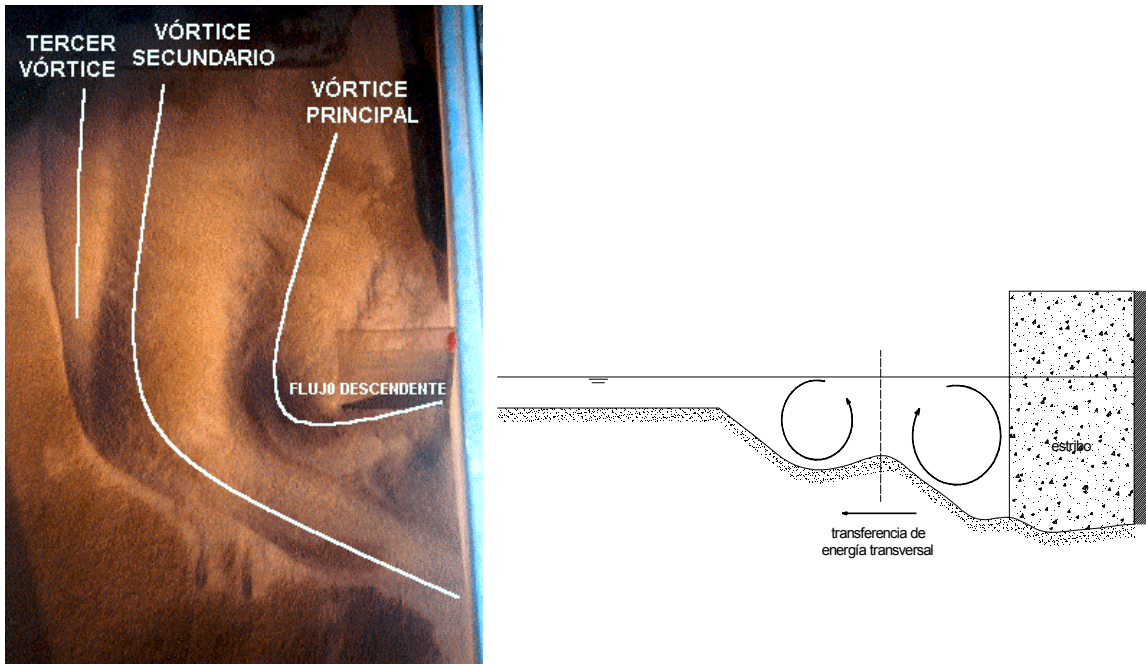
**Figura 2.** Perfil longitudinal del canal medido con la escala vertical distorsionada (la escala vertical es 50 veces la escala horizontal)



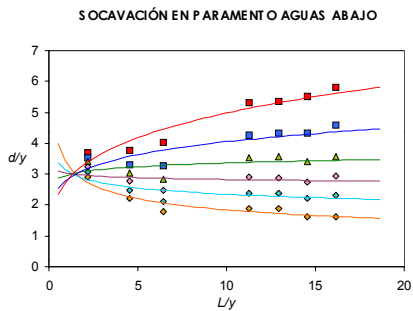
**Figura 3.** Líneas de corriente correspondientes a estribos largos ( $L/y > 14$ ) en sus etapas inicial (izquierda) y de equilibrio (derecha).



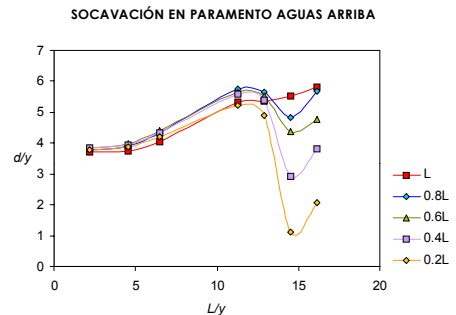
**Figura 4.** Líneas de corriente correspondientes estribos cortos ( $L/y < 14$ ) para longitudes cortas (izquierda) y muy cortas (derecha)



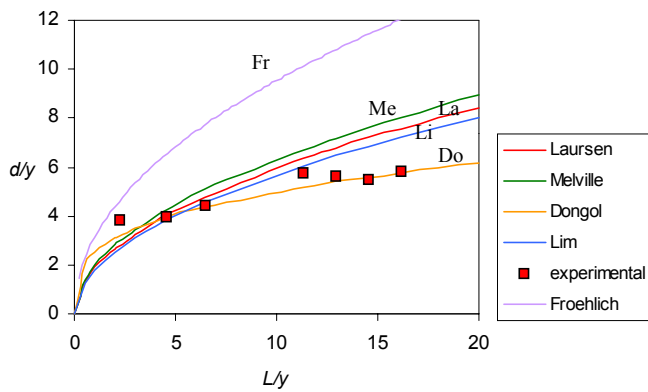
**Figura 5.** Imagen del foso de erosión formado para un estribo corto (ensayo n°6) y trayectorias de los vórtices generados. En la figura 5b un corte esquemático a la altura del estribo que muestra los vórtices.



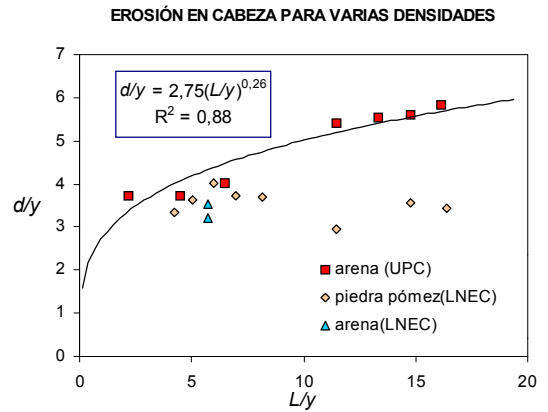
**Figura 6.** Erosiones medidas a lo largo del paramento aguas abajo del estribo para diferentes distancias desde la pared del canal



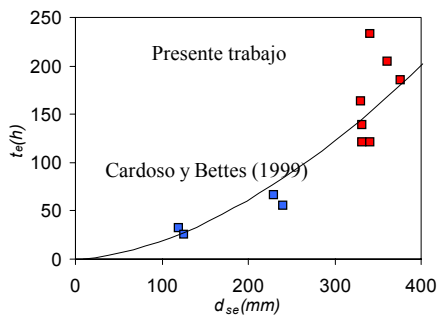
**Figura.7** Erosiones medidas a lo largo del paramento aguas arriba del estribo para diferentes distancias desde la pared del canal.



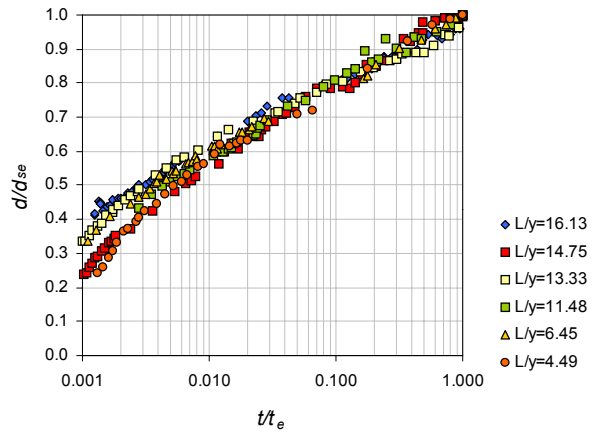
**Figura 8** Comparación con las formulaciones más conocidas.



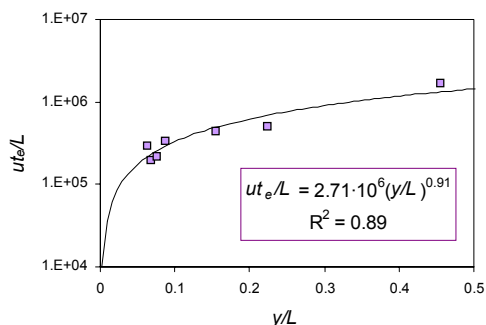
**Figura 9** Erosión en cabeza del estribo para varios materiales de fondo longitud relativa



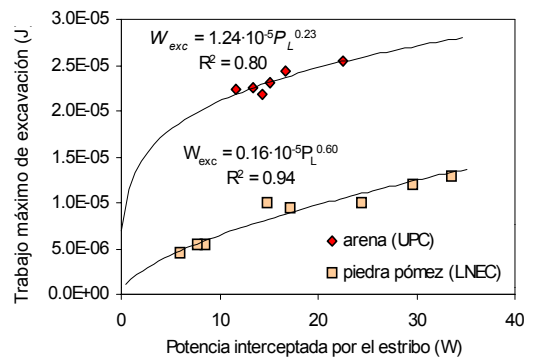
**Figura 10.** Tiempo para equilibrio y la profundidad de equilibrio



**Figura 11** Evolución temporal adimensional de la erosión en punta de estribo



**Figura 12.** Relación entre la escala de tiempo y la profundidad relativa.



**Figura 13.** Trabajo máximo de excavación Vs potencia del flujo interceptada

**TABLAS:**

**Tabla 1. Condiciones experimentales y parámetros más relevantes de los ensayos de larga duración en condiciones de movimiento incipiente disponibles en la literatura.**

autor	$d_{50}$ (mm)	$\sigma_g$	S	L/y	duración (h)	número de puntos
Lim (1997)	0.94	1.25	2.65	0.50-1.00	122-193	6
Dongol (1994)	0.90	1.30	2.65	0.30-0.45	150-183	4
Rajaratman (1983)	1.40	1.30	2.65	1.30	200	1
Liu et al.(1961)	0.64	1.17	2.65	2.75-3.75	38-155	2
Cardoso (1999)	0.83	1.26	2.65	2.00-14.00	79-101	6
Roca (2000)	0.63	1.80	2.65	5.71	142	2

**Tabla 2**  
Granulometría de la arena del foso (mm)

	$\square=26000(N/m^3)$
d16	0.96
d50	1.62
d84	1.94
d90	1.98
Dm	1.62
$\square_g=(d84/d16)^{(1/2)}$	1.36

**Tabla 4 Características del flujo por la sección transversal erosionada**

L(m)	y(m)	$Q_e(m^2/s)$	Área(m <sup>2</sup> )	$R_h(m)$	u(m/s)
1.0	0.062	0.044	0.218	0.150	0.204
0.9	0.062	0.041	0.194	0.141	0.215
0.8	0.062	0.040	0.188	0.143	0.212
0.7	0.062	0.040	0.191	0.144	0.209
0.6	0.093	0.060	0.281	0.173	0.212
0.4	0.088	0.048	0.249	0.162	0.191
0.2	0.091	0.032	0.180	0.064	0.178

**Tabla 3 Condiciones experimentales y resultados obtenidos en los ensayos**

ensayo	Condiciones de los ensayos						Resultados experimentales			
	L (m)	y (m)	L/y	u (m/s)	$d_{50}$ (mm)	$u/u_c$	$t_e$ (h)	$d_{s,max}$ (m)	$d_{se}$ (m)	$d_{se}/y$
1	1	0.062	16.13	0.38	1.62	0.87	175	0.361	0.361	5.82
2	0.9	0.061	14.75	0.4	1.62	0.94	139	0.342	0.342	5.61
3	0.8	0.06	13.33	0.39	1.62	0.93	94	0.347	0.332	5.53
4	0.7	0.061	11.48	0.4	1.62	0.94	117	0.353	0.33	5.41
5	0.6	0.093	6.45	0.4	1.62	0.88	181	0.41	0.375	4.03
6	0.4	0.088	4.49	0.41	1.62	0.92	125	0.351	0.331	3.76
7	0.2	0.091	2.2	0.4	1.62	0.89	233	0.352	0.341	3.87