

ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA EROSION LOCAL AL PIE DE UNA TRAVIESA

Bateman, A.; Martín Vide, J.P.; Spaliviero, F.*; Bocquet, S.*

Escuela de Ingenieros de Caminos, C. y P., Universitat Politècnica de Catalunya.
Gran Capitán D-1. 08034 Barcelona. España.

* Unité de Génie Civil. Université Catholique de Louvain-la-Neuve. Belgique.

RESUMEN: Las traviesas son pequeñas estructuras transversales que se colocan en los lechos fluviales para fijar el perfil del río. En este trabajo se estudia experimentalmente la erosión local al pie de una traviesa de 6 cm de altura en un canal de 60 cm de anchura. Los ensayos son en agua clara, sin transporte de sedimentos. La arena es uniforme con $D_m = 0.6mm$. Se ha estudiado la influencia del talud de aguas abajo y de la profundidad de cimentación de la estructura, haciendo variar cada vez el caudal y el nivel de agua aguas abajo. Se han realizado 40 ensayos de 3 horas de duración. El factor más importante en la erosión es el régimen hidráulico. Para el resalto anegado se obtiene la mayor erosión (hasta cuatro veces la altura de la traviesa) y un foso de erosión menos alargado. Por contra, para el resalto ondulado la erosión es menos fuerte y la forma más alargada. También se observa y describe otro régimen llamado alternancia porque se alternan periódicamente el resalto anegado y el resalto ondulado.

RÉSUMÉ Les seuils sont des petites structures transversales placées dans le lit pour fixer le profil de la rivière. On a étudié expérimentalement l'érosion locale en aval d'un seuil de 6 cm de haut dans un canal de 60 cm de largeur. Les essais sont en eau claire, sans apport de sédiments. Le sable est uniforme avec $D_m = 0.6mm$. On a testé l'influence de l'angle de la pente aval du seuil et de la profondeur de la base de fondation, en faisant à chaque fois varier le débit et la hauteur d'eau à l'aval. On a réalisé 40 essais d'une durée de 3 heures. Le facteur le plus important sur l'érosion est le régime hydraulique. Pour le ressaut noyé on obtient l'érosion maximale la plus forte et la fosse d'affouillement moins allongée. Pour le ressaut ondulé, par contre, l'érosion es moins forte et la forme plus allongée. On a observé aussi un autre régime appelé alternance parce qu'il produit une alternance cyclique entre le ressaut noyé et ondulé.

1. Introducción: Función y problemas de las traviesas.

Es una idea común en la ingeniería fluvial que el fondo de un río puede estabilizarse mediante la construcción de obras transversales, de orilla a orilla, de muy pequeña altura o incluso sin sobresalir del fondo, conocidas como traviesas, rastrillos, riostras o umbrales de fondo. Se encuentran por ejemplo al pie de puentes, en el extremo final de encauzamientos, revestimientos y defensas, etc. admitiéndose que su papel es impedir que la erosión progrese por debajo de la cota de la traviesa.

En líneas generales, la traviesa puede efectivamente actuar como un punto fijo del perfil del río, controlando las cotas de fondo aguas arriba en su evolución a largo plazo. Es decir, cuando el río tiene tendencia a la incisión (erosión) los puntos fijos condicionarían el descenso del fondo, quedando poco a poco como puntos más sobresalientes. Aguas arriba, cerca de las traviesas, la pendiente se suaviza y aguas abajo se produce un salto. Este descenso o erosión aguas abajo es una amenaza directa para la cimentación de la traviesa.

La otra amenaza para la traviesa es la erosión local que ocurre a su pie, como resultado del flujo particular del agua que pasa o cae por encima de la estructura. La erosión local puede producir fosos de erosión de considerable magnitud, en profundidad y extensión, situados precisamente en el terreno de cimentación de la obra.

Este artículo presenta los resultados de una investigación experimental sobre la erosión local en traviesas monolíticas de pequeña altura, como continuación de otros trabajos anteriores [3], [4]. En ellos se probó cómo el desarrollo de la erosión está dominado por el régimen hidráulico presente y la poca confianza que merecen las fórmulas de erosión local más conocidas. En este trabajo se aportan nuevos datos experimentales que exploran la erosión local en distintos regímenes de circulación de agua sobre la traviesa.

2. Descripción del experimento.

Los ensayos se han realizado en canal de laboratorio, rectangular de 60 cm de anchura y paredes de vidrio. La traviesa se ha construido con planchas de PVC. La forma de la traviesa (fig.1) se inspira en algunos proyectos próximos a los autores. La coronación de la traviesa es un plano horizontal de 12 cm de longitud, elevado 6 cm sobre el plano del cauce. El cauce de aguas arriba es no erosionable, construido en PVC a lo largo de 1 m. El cauce de aguas abajo está formado por material granular erosionable a lo largo de una longitud de 5 metros, suficiente para albergar los fosos de erosión local. El cauce es horizontal.

El talud de aguas arriba de la traviesa es 2V:1H. El de aguas abajo tiene cuatro valores diferentes (V:H): 1:0 (vertical), 2:1, 1:1 y 1:2. La base de la traviesa se deja enterrada 6 cm bajo el nivel del cauce (base profunda) o bien se deja a nivel del cauce (base superficial). Estas dos alternativas y los cuatro taludes dan en total 8 geometrías diferentes para ensayar. El objetivo de ensayar estas variantes es estudiar el efecto del talud aguas abajo y la profundidad de la base sobre la erosión local al pie de la traviesa. Concretamente el talud de aguas abajo puede condicionar la dirección del chorro que penetra en el área erosionable, aspecto destacado en la magnitud de la erosión [2].

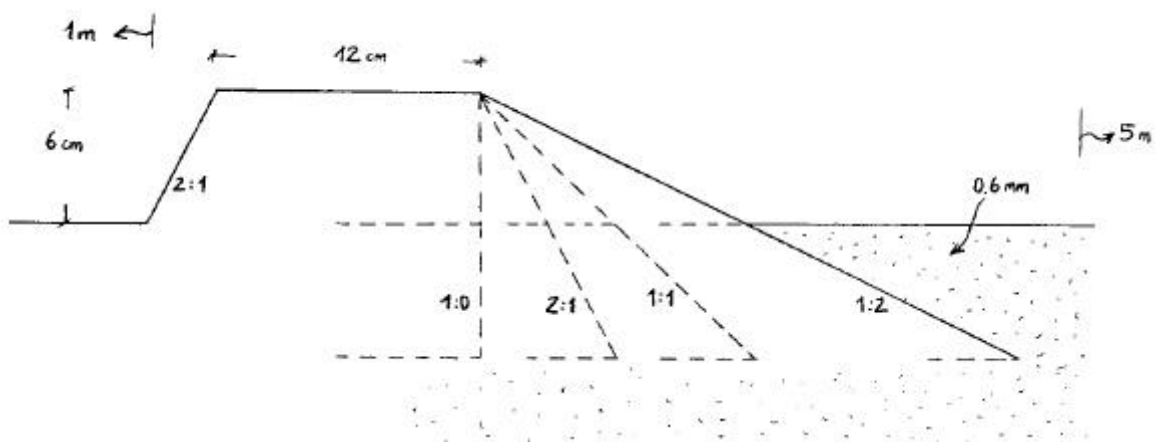


Figura 1. Descripción del experimento.

El caudal de ensayo se mide mediante un vertedero triangular en cabecera del canal. La condición de contorno se establece gracias a una pared vertedora de altura regulable. La arena utilizada, arena natural, tiene un tamaño medio de 0.6 mm. Es muy uniforme de manera que se impide el acorazamiento que coaccionaría la erosión local. Otros detalles sobre el trabajo experimental se pueden consultar en [1].

3. Tipos de régimen hidráulico y programa de ensayos.

El tipo y magnitud de la erosión local es completamente diferente según el régimen hidráulico de funcionamiento. En unos ensayos preliminares con cauce no erosionable se han estudiado las condiciones hidráulicas que dan lugar a cada régimen. Con un nivel aguas abajo lo bastante alto decimos que el régimen es de traviesa sumergida pues la corriente pasa por encima de la traviesa sin caída alguna en el perfil de la superficie libre, tan solo con una pequeña depresión (aceleración) sobre ella y una pequeña ondulación de la superficie libre aguas abajo (fig. 2).

Con un nivel menor se produce un resalto ondulado propiamente dicho, con una ondulación

de mayor magnitud y un régimen aproximadamente crítico sobre la traviesa. Con un nivel más bajo se produce un resalto anegado o sumergido, es decir un régimen no ondulado aguas abajo que recibe la entrada de un chorro y presenta un pequeño rulo en el lugar de ingreso. En estos dos últimos regímenes la condición de paso del agua sobre la traviesa (crítica) es independiente del nivel aguas abajo (fig.2).

Por estudios anteriores [3], [4] es conocido que este último régimen da lugar a erosiones locales de mucho mayor magnitud que el régimen de resalto ondulado, debido a que la dirección del chorro incide sobre el fondo al pie de la traviesa en el caso de resalto anegado, mientras que la corriente entrante es cuasi-horizontal en el caso de resalto ondulado.

Por otra parte, el trabajo se plantea en condiciones de tensión tangencial inferior a la tensión crítica de comienzo del movimiento del fondo granular. No hay por lo tanto erosión general del fondo, sino sólo erosión local, y tampoco alimentación de sedimento en el ensayo. Esta condición, junto con el régimen hidráulico, ha llevado a programar 5 familias de ensayos, diferenciados por sus condiciones hidráulicas de caudal y altura de la pared vertedora, las cuales privilegian al régimen de resalto anegado, como se recoge en la siguiente tabla

$Q(l/s)$	$H(cm)$	régimen
5	2	resalto anegado
10	3	resalto anegado
15	3	resalto anegado
15	5	resalto ondulado
15	7	traviesa sumergida

Tabla 1. Programa de ensayos.

En cada familia se ensayan las 8 geometrías descritas en el apartado anterior. En cada ensayo se ha medido sistemáticamente el perfil del fondo erosionable en tiempos de 1/2, 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128 y 192 minutos tras el comienzo del ensayo.

Pensando en un prototipo, los regímenes de resalto ondulado o sumergido corresponderían a caudales no muy elevados, es decir a las llamadas aguas bajas de un río, mientras que las aguas altas normalmente sumergirían la traviesa. La inexistencia de transporte de sedimentos, también llamado régimen de aguas claras no sería extraño cuando el río se encuentra en aguas bajas.

4. Observación cualitativa de la erosión local.

Los ensayos han dado la oportunidad de observar con detenimiento los fenómenos de erosión local, de los que se presenta a continuación una descripción cualitativa (fig.2). En primer lugar, en un régimen de travesía sumergida no se observa erosión alguna después de 48 minutos de ensayo. Tan sólo se podían ver unos pequeños vórtices verticales que movían la arena de manera incoherente. Este comportamiento ha ocurrido para las 8 geometrías.

En un régimen de resalto ondulado, el chorro quasi-horizontal da lugar a un vórtice de poco desarrollo vertical capaz de mover las partículas de arena hacia la travesía. Más concretamente, el punto de erosión máxima (punto A, fig.2) es el punto de bifurcación del chorro en dos corrientes. La que sigue aguas abajo arrastra partículas fuera del foso y forma una pequeña duna. La corriente que retorna hacia aguas arriba hace remontar los granos hacia la travesía, recubriendo su talud. Estas observaciones generales son aplicables a las 8 geometrías. En este régimen se dan algunos efectos tridimensionales en la morfología del fondo.

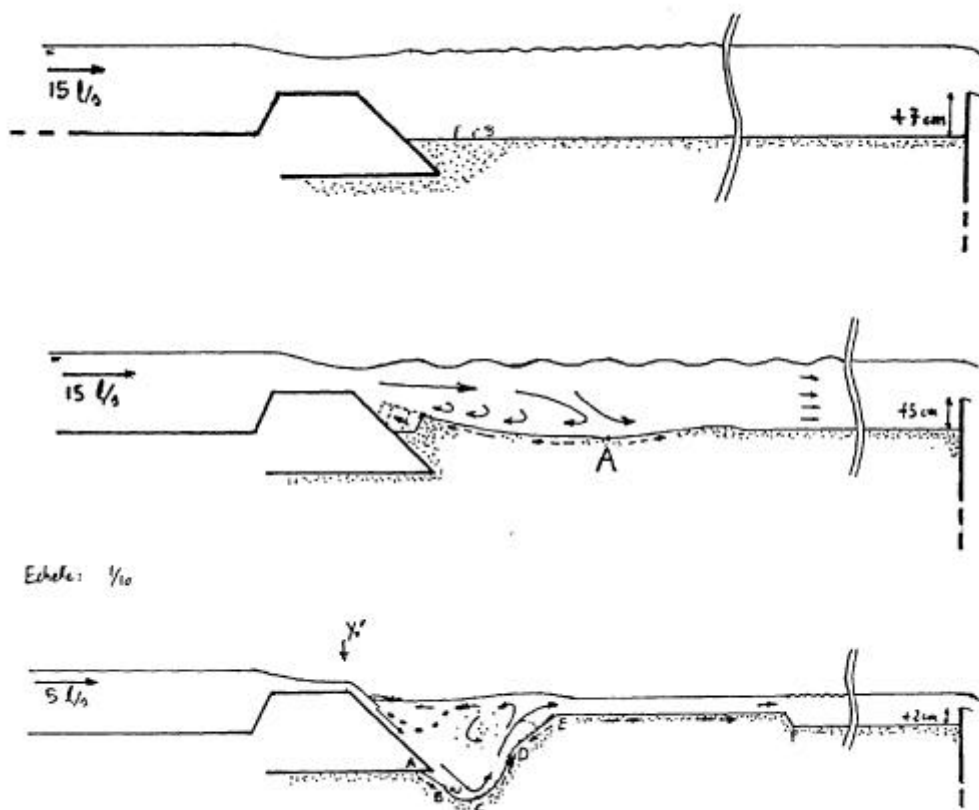


Figura 2. Dibujos del régimen de agua y el perfil de erosión tomados durante los ensayos. Arriba: travesía sumergida; en el centro: resalto ondulado; abajo: resalto anegado o sumergido [1].

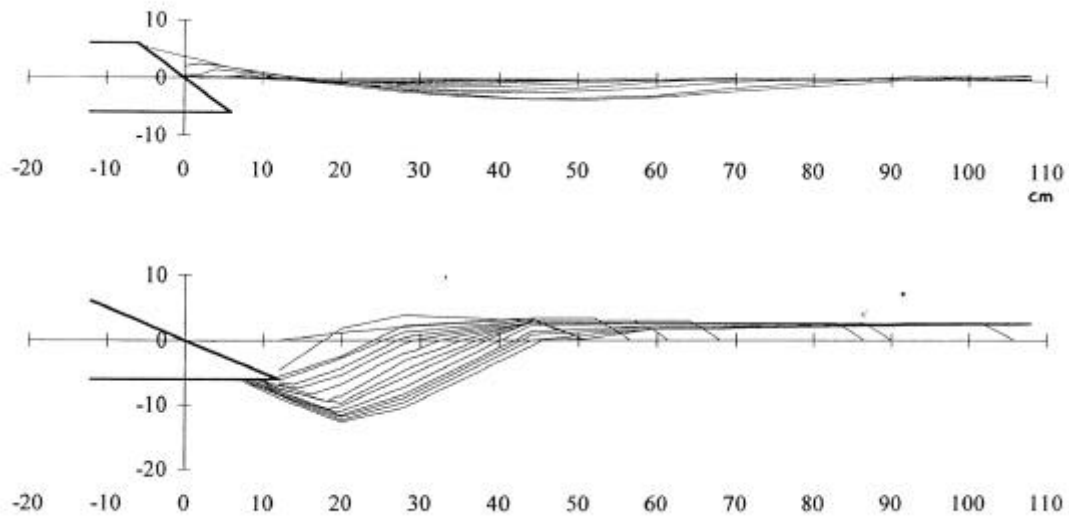


Figura 3. Resultados de un experimento con régimen de resalto ondulado (arriba) y con régimen de resalto anegado (abajo)

En un régimen de resalto anegado el flujo de agua pasa por el calado crítico sobre la traviesa y cae en forma de un chorro con gran acción erosiva. El chorro entra arrastrando aire. La fuerza erosiva del chorro provoca una fosa de gran magnitud si se la compara con la del régimen de resalto ondulado. Nuevamente, en el punto de incidencia del chorro sobre el fondo (punto C, donde la erosión es máxima) se forman dos corrientes ascendentes. En este caso, la que se dirige hacia aguas arriba es mucho menos importante que la que se dirige hacia aguas abajo. El sedimento puesto en suspensión por el chorro es transportado pendiente arriba (fig.2). B y D son dos puntos característicos del perfil de la arena porque en ellos ocurre un cambio brusco de la pendiente. En estos puntos cada corriente ascendente se despega del contorno. La corriente que se despega en D sube verticalmente hacia la superficie formando una pequeña intumescencia en ella, dividiéndose allí en una corriente hacia fuera del foso y otra que alimenta el rulo del resalto sumergido. La corriente hacia fuera arrastra sedimento y forma una duna llana. Esta duna se mantiene en equilibrio dinámico (con transporte sólido). En CDE el tamaño de los granos de arena es mayor que en el resto del cauce: estos granos son demasiado pesados para ser acarreados fuera de la fosa. Su movimiento se limita a caer y subir a lo largo de CDE.

Finalmente, es preciso describir un último régimen mixto, en el que se alternan periódicamente resaltos ondulados y anegados. La fase de resalto ondulado dura largo tiempo y es poco activa en erosión. Le sigue una fase de resalto anegado corta pero muy activa, tal que es capaz de deshacer en segundos el foso que la fase de resalto ondulado ha formado durante minutos. El paso de una fase a la otra es brusca, a modo de inestabilidad, como si la acción de cada fase fuera moldear una fosa en la que el régimen modelador no pudiera subsistir [4].

5. Resultados de los ensayos.

Presentamos a continuación una pequeña muestra de los resultados de ensayo. En cada uno de los 40 ensayos (8 geometrías x 5 regímenes hidráulicos) se ha tomado la posición del fondo en unas 30 abscisas separadas entre sí 2 cm. La figura 3 es la representación gráfica de la evolución del perfil de erosión en un ensayo con resalto ondulado (15 l/s, 5 cm, talud 1:1 y base profunda) y en uno con resalto anegado (5 l/s, 3 cm, talud 1:2 y base profunda). El contraste entre la morfología de uno y otro foso es muy destacable (suave y alargado el primero con un talud de arena recubriendo la traviesa; fuerte y profundo el segundo con una cierta erosión bajo la base de la traviesa).

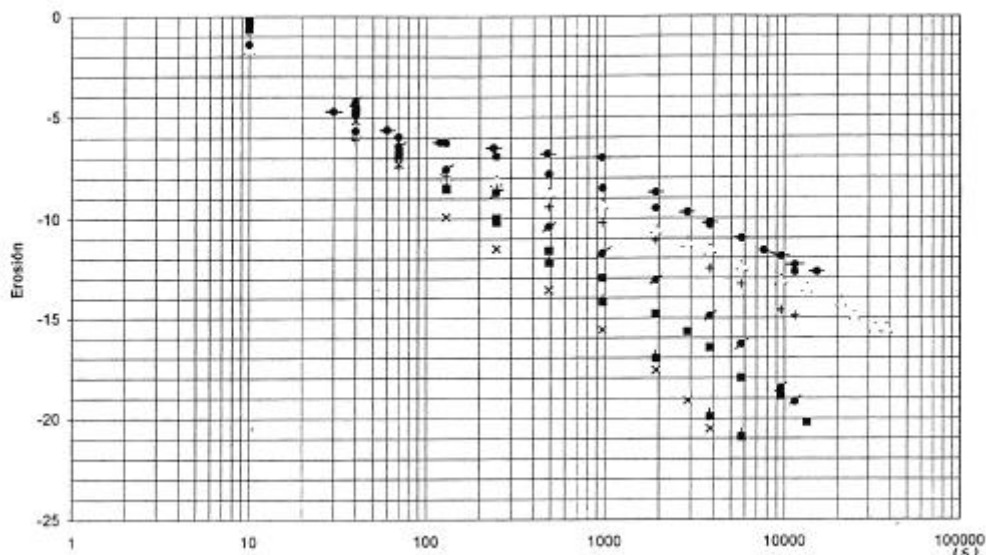


Figura 4. Evolución temporal de la erosión máxima (en cm, con signo negativo) en el caso de resalto anegado.

La erosión máxima al cabo de 192 minutos en los 40 ensayos se recoge en la tabla 2. Entre paréntesis se señalan los casos, muy numerosos, de alternancia de regímenes, que dan lugar a erosiones mucho menores que las de un régimen duradero de resalto anegado y sólo un poco mayores que las de uno de resalto ondulado. Puede observarse una gran coherencia dentro de cada familia de ensayos, lo que indica la escasa influencia de la geometría (talud y posición de la base) en los resultados. Se observa también la influencia del régimen, especialmente en las dos geometrías con talud más tendido 1:2, en que se mantiene el resalto sumergido en más ensayos, observándose mayor erosión a mayor caudal. En dos ensayos de estas geometrías, las erosiones agotaron el grosor de lecho erosionable dispuesto en el canal.

La figura 4 es la representación gráfica de la erosión máxima en función del tiempo (en escala

logarítmica) de los ensayos en que el régimen es de resalto anegado y la travesía tiene talud 1:2 o 1:1. En un caso el ensayo se ha prolongado durante 11 horas, concluyéndose que no puede considerarse alcanzado un equilibrio final en las fosas de erosión. El mismo ensayo da a los 192 minutos una cifra del 73 % de la erosión al cabo de 11 horas. Por su parte, la evolución temporal es aproximadamente logarítmica. Finalmente la figura 5 es la representación gráfica del volumen de arena erosionado en función del tiempo en escala logarítmica, en los casos de resalto anegado.

Q(l/s)	H(cm)	régimen	geom. (talud y base)							
			1:2 p	1:1 p	2:1 p	1:0 p	1:2 s	1:1 s	2:1 s	1:0 s
5	2	r.anegado	13.5	14.9	13.3	12.0	12.7	13.3	(5.6)	12.3
10	3	r.anegado	20.2	(4.5)	(4.8)	(4.9)	19.2	(4.4)	(4.5)	(4.5)
15	3	r.anegado	> 21	(6.3)	(5.5)	(5.7)	> 21	(6.1)	(6.4)	(5.9)
15	5	r.ondulado	6.6	3.6	4.0	3.9	(6.5)	3.8	3.3	4.2
15	7	tr.sumergida	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabla 2. Erosión local máxima en cm. p: base profunda; s: base superficial

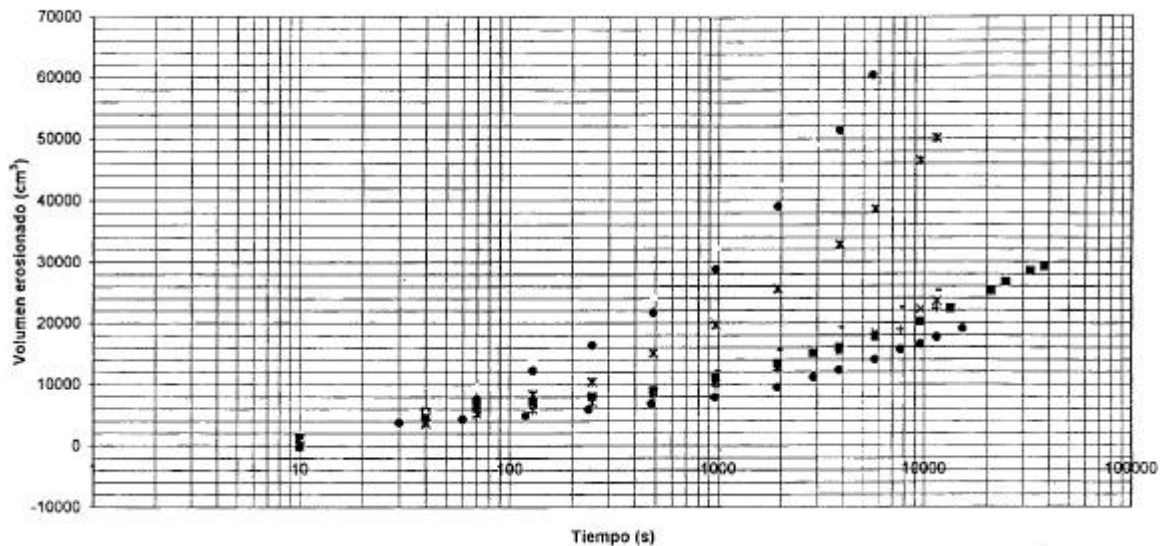


Figura 5. Erosión temporal del volumen erosionado en cm^3 en el caso de resalto anegado.

6. Conclusiones.

El factor más importante en la erosión local es el tipo de régimen hidráulico. En el caso de resalto anegado se alcanzan las erosiones mayores y es la única situación en que la traviesa sufre una erosión regresiva bajo la base. Con resalto ondulado la erosión es mucho menor. La alternancia es un fenómeno intermedio entre los dos regímenes anteriores, tanto en erosión máxima como en volumen erosionado. Dentro de un mismo régimen la erosión máxima y el volumen erosionado crecen con el caudal. La influencia del talud dentro de un mismo régimen es difícil de distinguir y en todo caso despreciable por comparación a la influencia indirecta que ejerce sobre los cambios de régimen hidráulico (pues un talud más tendido favorece los resaltos anegados mientras uno más vertical favorece la alternancia). Una base profunda da lugar a erosiones un poco mayores, quizá debido a que el material en que se ha construido la traviesa es muy liso. La influencia del nivel de aguas abajo es decisiva en el tipo de régimen y por tanto en la erosión local.

Bibliografía.

- [1] Bocquet, S.; Spaliviero, F. (1995) "*Etude de l'érosion locale en aval d'un seuil*" Travail de fin d'études. Université Catholique de Louvain-la-Neuve.
- [2] Bormann, N.E.; Julien, P.Y. (1991) "*Scour Downstream of Grade Control Structures*". Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 117 (5), pp.579-594.
- [3] Martín Vide, J.P. (1994) Discussion to "*Mechanics of jet scour downstream of a headcut*" (por Julien, O.R. et al. en J. Hyd. Research, vol.31, n.6 1993) Journal of Hydraulic Research, vol.32, n.6, pp.954-956.
- [4] Martín Vide, J.P.; Del Agua, J. (1994). "*Erosión local en traviesas de protección en cauces*". Ingeniería Civil (Cedex), n.95, pp.58-64.