

**ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA EROSIÓN LOCAL PRODUCIDA POR LA
PRESENCIA DE UMBRALES DE FONDO EN LECHO VIVO
(Aplicación a la estabilización de lechos de gran pendiente)**

Allen Bateman P. ⁽¹⁾, Andrés Andreatta I. ⁽¹⁻²⁾ y Natalia Muñoz ⁽¹⁾
⁽¹⁾ ETSECCPB - UPC, Barcelona-España. e.mail: allen.bateman@upc.es
⁽²⁾ IMF - UCV / CEMFA - USB, Caracas, Venezuela. e.mail: aandrea@usb.ve

RESUMEN

En este trabajo se presentan los resultados de la experimentación en traviesas (ó umbrales de fondo) bajo la condición de lecho vivo y régimen rápido como el que se da en ríos de pie de monte o alta montaña. Se pretende dar a conocer la tipología del foso de erosión, la descripción de los tipos de flujo que se presentan durante su equilibrio, así como una primera valoración de los resultados en cuanto a las máximas erosiones obtenidas. Las traviesas o umbrales de fondo han sido objeto de estudio por diferentes autores pero nunca antes se habían presentado datos en ensayos con lecho vivo. Este trabajo pretende iniciar al lector en la dinámica del flujo sobre traviesas en lecho vivo y sus principales características.

ABSTRACT

In this work we present the experimental results of local scour on sills in live bed and steep stream conditions as well as it produces in high an medium slope mountain rivers. The evolution of the scour in time and the typology of the hydraulic situation is documented. The experiments reach the equilibrium and the maximum erosions and scour are reported. Sills and its consequences has not been reported by any author in live bed conditions. The works introduces to the dynamical of flow over sills in live bed conditions and its principal characteristics.

INTRODUCCION

Los umbrales de fondo han sido objeto de estudio desde hace años y se han presentado resultados del comportamiento hidráulico del flujo al pasar por estas estructuras. También, han sido objeto de estudio la rapidez de erosión, la forma del foso aguas abajo, la posibilidad de erosión regresiva y las máximas profundidades de erosión. Sin embargo, en régimen de lecho vivo no se ha aportado ningún material de interés. Los umbrales de fondo también llamadas traviesas son pequeñas estructuras (poca altura) que colocadas transversalmente al eje del río pretenden evitar la erosión general del lecho del río. Esto aplicado a ríos ó arroyos de gran pendiente (1% al 4%). Las traviesas mantienen el lecho a cotas elevadas evitando la erosión y el descalce de obras situadas aguas arriba. La protección de la traviesa es limitada en el espacio con lo que se debe pensar en colocar un sistema de ellas a lo largo del cauce para que la protección sea completa. En estas condiciones el flujo se presenta en régimen rápido y por tanto en régimen torrencial. La capacidad de arrastre de sedimentos es alta y la hidrodinámica predominante es compleja y atractiva. La socavación de la fosa aguas abajo es lo que nos interesa en este trabajo en particular, sin perder de vista otros aspectos que son tratados en otros trabajos.

La fosa de erosión tiene repercusión inmediata en la estabilidad de la propia traviesa o estructura. Aunque estas son hechas de hormigón muy pocas veces son armadas y por tanto no resisten ni siquiera su propio peso. ¿En que condiciones de flujo la traviesa se descalza? Es una de las preguntas que en este trabajo tratamos de abordar, o bien ¿cuál es la máxima erosión local que estas traviesas provocan cuando existe el lecho vivo?. Que influencia puede tener la pendiente entre traviesas respecto a la pendiente original del lecho. Un tema que está verificado por diversos autores es la pérdida de pendiente del lecho entre traviesas respecto a la pendiente de equilibrio a la que tendería, con las mismas condiciones de flujo, si no existiesen estas estructuras, reportado por (Gaudio et al. 2000). Este último argumento se trata en otro trabajo dónde se pretende dar una primera aproximación a este fenómeno con transporte sólido. (Andreatta et al, 2000)

La descripción cualitativa del fenómeno hidráulico es de especial interés, pues de él se desprende una primera interpretación de los resultados. Este comportamiento también, como se verá en el desarrollo del trabajo, es de ocurrencia normal en un río y por tanto cuando se observa se puede dar explicación de lo que esta ocurriendo dentro del flujo sin verlo.

El objetivo de este trabajo es estudiar la evolución temporal y la magnitud de la erosión local aguas abajo de las traviesas en un cauce con fondo de material con granulometría uniforme y en lecho vivo y su relación con la erosión general que se produce a la vez. A la vez se presentará también, la influencia del desnivel entre traviesas consecutivas y la distancia entre las mismas. Este trabajo resume los experimentos llevados a cabo por (López, 1998) y (Muñoz, 1999), realizados en el laboratorio de Ingeniería Hidráulica de la Universidad Politécnica de Cataluña en el canal de pendiente variable.

CONDICIONES DE LOS ENSAYOS Y DESCRIPCIÓN DEL EXPERIMENTO

El estudio experimental se ha realizado en el canal hidráulico de pendiente variable de la sección de Ingeniería Hidráulica, Marítima y Ambiental de la Universidad politécnica de Cataluña. El canal de 20 metros de longitud, 60 cm de anchura y 60 cm de altura, tiene alimentación y recirculación de agua y de áridos de forma continua en el tiempo. Este hecho singular permite realizar ensayos de larga duración de forma que se puede llegar a condiciones de equilibrio en el foso de erosión y en los perfiles del lecho. La pendiente variable de hasta el 4% ayuda a realizar ensayos con pendientes de equilibrio del lecho hasta más del 5%. El canal es de paredes de cristal permitiendo observar el fenómeno en toda su magnitud. La recirculación de arenas se logra mediante un decantador o separador primario y un tornillo de Arquímedes que extrae la arena del agua y la eleva a una cinta transportadora que la regresa a la tolva dosificadora situada en la cabecera del canal. El canal comporta un vertedor rectangular en cabecera que permite la medición del caudal de agua que entra en el canal. La tolva de cabecera esta apoyada en cuatro sensores de carga que mediante un transductor analógico lleva la información del peso de la misma al centro de control. La tolva entrega la arena al canal mediante vertido a través de una compuerta tajadera

que puede regularse manualmente, la arena se extrae de la tolva mediante simple fricción, acción realizada por una cinta transportadora de velocidad regulable. La tolva, cinta y tajadera habían sido calibradas 2 meses antes de realizar los experimentos que se presentan en este trabajo. En (Martín et al, 1999) se presentó un ejemplo de calibración del sistema teniendo en cuenta la humedad de la arena recién extraída del decantador primario.

El sedimento que se utilizó es de origen silíceo con los siguientes tamaños característicos: $D_{84}=1.036$ mm, $D_{75}=0.988$ mm, $D_{50}=0.857$ mm, $D_{25}=0.644$ mm y $D_{16}=0.584$ mm. El diámetro medio $D_m=0.721$ mm y la desviación típica calculada para material casi uniforme $\sigma=0.226$ mm. (Aguirre, 1980).

Para la ubicación de las traviesas en el canal se consiguieron primero los perfiles de equilibrio para diferentes caudales líquidos y sólidos, valores que se muestran en la tabla 1, con el fin de comparar las pendientes de equilibrio de los perfiles del lecho sin traviesas y las pendientes medias de equilibrio con traviesas. Al mismo tiempo, se aprovecho para observar el foso de erosión aguas abajo de las traviesas. Las traviesas se colocaron de forma que el borde superior situado aguas abajo fuese tangente al perfil de equilibrio de mayor pendiente media que corresponde al ensayo denominado 300gr/s-10l/s o ensayo básico. Tres traviesas se colocaron como muestra la figura 1 de forma que la traviesa T3 (situada más aguas abajo) quedó al final del canal, la traviesa T2 a 8.5m de distancia y la traviesa T1 a 4.25m de la T2 en la fase 0 de ensayos y a 5.25m en la fase 1. Con esta última disposición se realizó la fase 2 de ensayos pero con la traviesa T2 colocada a 2 cm y manteniendo su abscisa original. Esta última disposición se muestra también en la figura 1. La pendiente del canal durante los ensayos se dejó en el 1% que hay que agregar al perfil de equilibrio para el posterior análisis de resultados.

En la primera y segunda fase de ensayos se realizaron los desequilibrios de la tabla 2, pasando siempre desde la posición del ensayo básico a las otras condiciones de la tabla. Este proceso es siempre erosivo con lo que las traviesas emergen del lecho y comienza la erosión local formándose el foso de erosión. El comienzo del ensayo comienza en el instante que se provoca el desequilibrio tanto en un aumento de caudal líquido como en una disminución del caudal sólido o ambas cosas a la vez. Este momento marca el tiempo cero de ensayo.

Tabla 1. Ensayos de equilibrio

Q _s (g/s)	300	240	252	264	276	300	300
Q (l/s)	10.08	11.60	13.02	10.52	11.60	11.42	12.22
σ	54.6	78.5	84	64.8	68.3	61.9	66.2
i_{exp} (%)	2.56	2.04	1.91	2.29	2.15	2.41	2.16
$t_{equil.}$ (h)	8.5	4.5	9.5	5.0	3.5	3.5	4.5

Tabla 2. Equilibrio con traviesas, fase 1 y 2, izquierda y derecha respectivamente

240	252	264	276	300	300	Q _s (g/s)	240	252	264	276	300	300
11.52	12.93	9.95	11.38	11.35	12.24	Q (l/s)	11.44	12.84	10.54	11.50	11.83	12.27
79.2	84.7	61.4	68	62.4	67.3	σ	78.7	84.1	65.9	68.8	65.1	67.5
1.84	1.68	2.28	1.99	2.21	2.06	T1-T2, i_{exp} (%)	2.01	1.85	2.18	2.00	2.16	1.96
2.05	1.90	2.47	2.16	2.33	2.21	T2-T3, i_{exp} (%)	1.97	1.95	2.32	2.06	2.26	2.16
3.50	3.50	3.50	3.50	2.50	4.00	$t_{equil.}$ (h)	3.50	4.00	4.50	3.00	4.50	4.00

En el estudio de los perfiles de equilibrio se dedujo un criterio de convergencia para determinar el instante equilibrio y consecuentemente el fin del ensayo. El procedimiento consiste en calcular a lo largo del ensayo la pendiente media del perfil de equilibrio mediante una regresión de los n puntos de discretización situados a lo largo del canal. Durante el ensayo se tomaron puntos del perfil de fondo a cada metro con una precisión en la apreciación de la cota de la arena que se estimó en 1mm. Así cada media hora desde el instante de inicio del ensayo se midió el perfil del lecho y se calculó la pendiente media, resultado de una regresión lineal. Esta pendiente inmediatamente pasa a un gráfico en el que se representa la pendiente contra el logaritmo natural del tiempo transcurrido desde el inicio del ensayo y en la que se observa que la tendencia es casi lineal cambiando bruscamente en un instante determinado, momento en que la pendiente se estabiliza

en un valor. Debido a que la tendencia es de tipo logarítmico y no exponencial no se puede pensar en una asíntota que delimite el fin del ensayo mediante otro tipo de criterios como los porcentuales o relativos a la supuesta asíntota. Cuando la pendiente de la gráfica quiebra se espera de media hora a una hora antes de confirmar que se está en el equilibrio. Más detalle sobre el procedimiento se encuentra en (Andreatta et al, 2000).

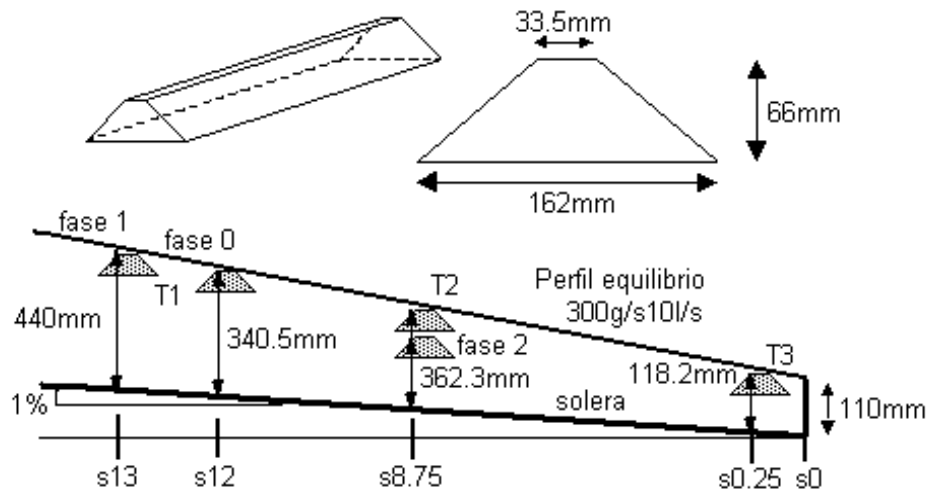


Figura 1. Forma y dimensiones de las traviesas. Ubicación de las traviesas en el canal en la fase 0, 1 y 2.

Para la traviesa T1 los fosos de erosión se marcaron cada 15 minutos calcando el perfil del foso manualmente con un marcador sobre una lámina plástica transparente adherida al cristal del canal y previamente cuadrículada con elementos de 1cm de lado. En caso de observación de un fenómeno extraño también se realizaba la medición y se anotaba el instante en que ello ocurría. Se anotó la posición del foso centímetro a centímetro en el instante de medida.

Para la traviesa T2 sólo se midieron los puntos más característicos, como se muestra en la Figura 2. Se midió también el nivel de agua para ambas traviesas, el error de medición en la lámina de agua es muy grande pues el movimiento es rápido y turbulento, sin embargo, esta medida da una idea bastante buena de los niveles de agua en el foso.

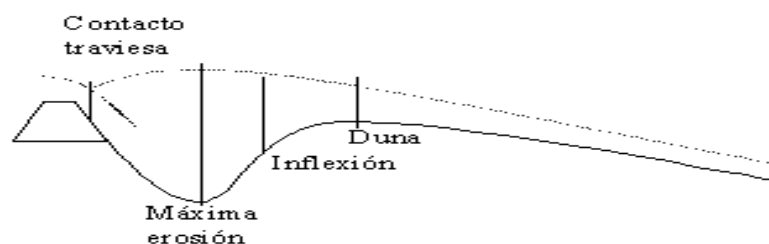


Figura 2. Puntos de toma de datos para la traviesa 2

DESCRIPCIÓN DEL FENÓMENO DE EROSIÓN LOCAL AGUAS ABAJO DE LAS TRAVIESAS EN CONDICIONES DE LECHO VIVO.

Es muy diferente la evolución temporal de los fosos de erosión generados por el flujo cuando el régimen del flujo es en lecho vivo, el trabajo de erosión local aguas abajo de las traviesas sin transporte de sedimentos, se puede consultar en (Bateman et al, 1996) donde se observan ciertas similitudes en la evolución de los fosos y su hidrodinámica.

Todos los ensayos parten del perfil inicial o básico correspondiente a un caudal líquido de 10 l/s y un caudal sólido de 300 gr/s. En el momento oportuno se inicia el desequilibrio, cambiando los caudales sólido y líquido al valor del nuevo equilibrio al que se quiere llegar. El ensayo es siempre erosivo, necesario para la observación de los fosos de erosión de lo contrario las traviesas se anegarían. El proceso comienza con el basculamiento del perfil de equilibrio respecto del punto fijo representado por la traviesa T3 (situada aguas abajo). En un momento dado la traviesa T2 queda

descubierta comenzando la erosión local aguas abajo de la misma. Instante en el que la T2 hace de punto duro y comienza el basculamiento del perfil respecto de ese nuevo punto. Se descubre luego la T1 (la situada más aguas arriba) comenzando la erosión local aguas abajo de ella. Enseguida se produce el basculamiento del perfil aguas arriba de T3 siendo ésta el punto fijo de basculamiento.

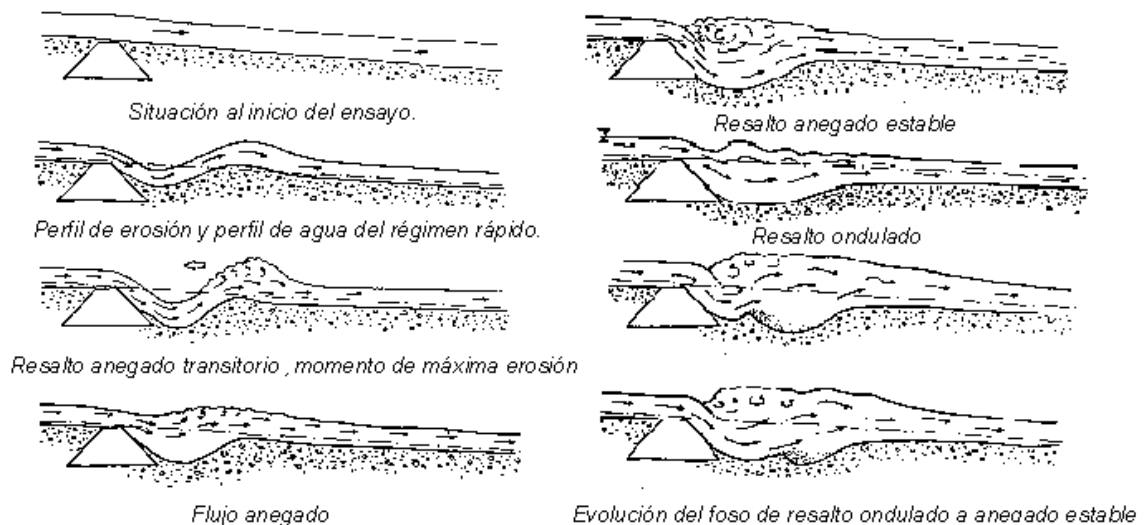


Figura 3. Descripción de los regímenes hidráulicos observados en el laboratorio

En la figura 3 se observan los diferentes regímenes de agua observados durante el ensayo y se pueden resumir en régimen rápido (RR), régimen de resalto anegado transitorio (RAT), flujo anegado (FA), régimen de resalto anegado estable (RAE) y régimen de resalto ondulado (RO). El primer tipo de régimen aparece en todos los ensayos durante el inicio del ensayo. Al provocar el desequilibrio mediante el control de las variables de caudal líquido y sólido, el lecho comienza a descender y cuando la traviesa emerge el flujo nota el desnivel y sin despegarse del fondo el lecho aguas abajo de la traviesa se socava, el flujo se deprime acelerándose, cosa que lo hace más erosivo. El flujo de sólidos inmediatamente aguas abajo de la traviesa se incrementa y se acumula algo más abajo provocando la formación de una duna. La erosión del foso hace que el ángulo de incidencia del chorro sea cada vez mayor dando lugar a esfuerzos cortantes cada vez más grandes sobre el lecho, lo que a su vez provoca que la erosión continúe en aumento. El foso en este régimen tiene un aspecto alargado y poco profundo, el lecho tiene un aspecto ondulado con un valle inmediatamente aguas abajo de la traviesa y una cresta inmediatamente aguas abajo. Este aspecto va cambiando a medida que el foso se profundiza tornándose más corto y más profundo. Este efecto provoca un cambio de cantidad de movimiento, pues comienzan a existir aceleraciones verticales dominantes que por un lado en la entrada del foso tienen una componente vertical negativa cada vez más acusada y a la salida del foso, antes del máximo de la duna una dirección vertical cada vez más marcada en la dirección positiva (hacia arriba). El momentum horizontal pierde magnitud y las velocidades se hacen cada vez más bajas en dicha dirección provocando el cambio de régimen del flujo. La duna en estos momentos y casi siempre en todos los ensayos tiene una cota superior a la de la propia traviesa. Es cuando comienza un cambio del panorama del foso de erosión y del régimen hidráulico.

El *resalto anegado transitorio* se produce como consecuencia de la rotura del régimen rápido. En el momento de la rotura la erosión del foso es máxima, el ángulo de incidencia es también máximo y el punto de duna tiene una posición elevada. En estos momentos el flujo no soporta la situación de equilibrio de fuerzas y el régimen pasa de rápido a lento, comenzando en la propia duna. Este cambio produce un resalto móvil que viaja desde la duna hasta la traviesa donde choca para disipar la energía y desaparecer por completo, momento en el que el flujo cambia nuevamente de aspecto. La duración del régimen es corta en el tiempo y por ello es denominado transitorio. El foso va cambiando de tamaño a medida que la onda avanza aguas arriba y es el cambio de régimen (dónde se encuentra el rulo) que determina el transporte de material. Así cuando el rulo está en la posición de la máxima erosión del foso es cuando se produce la máxima erosión del mismo, en este momento el foso es más corto y profundo.

Una vez el frente de onda rompe en la traviesa, el resalto puede desaparecer, con lo que se forma un régimen en el que el flujo sobre la traviesa está anegado. En este régimen hidráulico de *flujo anegado* la lámina de agua se hace continua formando un gran colchón, el flujo de agua circula por la parte superior y la arena que se encuentra en suspensión en el colchón y la que va llegando sedimenta tapando el foso. Aguas abajo la lámina se comienza a deprimir, arrasando la duna antes formada y el régimen progresivamente va pasando a un régimen rápido.

El régimen hidráulico *resalto anegado estable* se caracteriza por la entrada de un chorro que ingresa en la masa de agua con ángulos grandes respecto de la horizontal. Arrastra la arena del foso llevándosela y modificando al propio foso. La gran fuerza erosiva del chorro provoca una fosa de gran magnitud, si esta se compara con los regímenes anteriormente descritos. En el punto de incidencia del chorro con el fondo, punto de máxima erosión, se crea un par de vórtices con corrientes ascendentes. La que se dirige hacia aguas arriba de menor magnitud los granos de arena hacia aguas arriba en forma suspendida que son atrapados nuevamente por el chorro hacia el fondo de la fosa. La otra corriente se dirige hacia aguas abajo, de mayor magnitud, tiene un vórtice que pone en suspensión parte de los granos de arena y que vuelven a depositarse en el fondo del foso y el resto de granos sigue con la corriente principal alimentando la duna que en este caso es llana o prácticamente llana.

Una vez ha aparecido este resalto, el foso va modelándose poco a poco, haciéndose cada vez mayor hasta llegar a su tamaño estable, entonces hay un dinamismo erosión - sedimentación. El foso en este tipo de ensayos llega a las mayores erosiones máximas que se producen a lo largo de un mismo ensayo.

El *resalto ondulado* es un régimen que se produjo cuando la fosa parecía ya estar en un estado de equilibrio, es decir con el resalto anegado estable. Este régimen no se presentó en todos los ensayos, es decir ocurrió pocas veces. En este régimen el foso de erosión induce una desestabilización de las fuerzas de equilibrio acelerando ligeramente el flujo y el resalto anegado pasa a un resalto ondulado. En esta condición el chorro del flujo que entra en el foso es casi horizontal, creando por debajo de sí una serie de vórtices que por su fuerza y giro arrastran las partículas hacia aguas arriba modelando nuevamente el foso. Dando lugar a un foso más alargado y menos profundo que el que se producía para resalto anegado estable. Este resalto ondulado desaparece cuando la modelación del fondo o lecho induce nuevamente un resalto móvil que se desplaza hacia aguas arriba formándose nuevamente el resalto anegado estable.

Cuando esto ocurre el chorro cambia de dirección incidiendo sobre el fondo del foso erosionando lentamente el mismo desde la traviesa hacia aguas abajo (como un proceso de barrido), se crea en el talud aguas arriba del foso una pequeña duna que se va desplazando suavemente hacia aguas abajo, al llegar al punto de duna se confunden y mezclan, momento en el que el foso vuelve a tomar el aspecto para un régimen de resalto anegado estable (ver figura 3).

EVOLUCIÓN DE LOS REGÍMENES HIDRÁULICOS

Durante la evolución del ensayo se presentaron los siguientes cambios de régimen alternándose unos con otros. Tienen varios ciclos de comportamiento y no todas las alternancias se han observado en los diferentes ensayos. Así estos pueden tener las siguientes secuencias:

1. Régimen rápido
2. Régimen rápido – resalto anegado transitorio – régimen rápido.
3. Régimen rápido – resalto anegado transitorio – flujo anegado -- régimen rápido.
4. Régimen rápido – resalto anegado transitorio – resalto anegado estable.
5. Resalto anegado estable -- régimen rápido -- resalto anegado transitorio – resalto anegado estable.
6. Resalto anegado estable.
7. Resalto anegado estable – resalto ondulado -- resalto anegado transitorio – resalto anegado estable.

RESULTADOS DE LAS OBSERVACIONES

Evolución temporal del foso de erosión: La evolución temporal del foso de erosión en lecho vivo no es tan estable como lo es la evolución temporal sin transporte de sedimentos. En caso de tener el lecho vivo continuamente la erosión se observa oscilatoria, debido a que en cada régimen hidráulico la erosión del foso una vez es alargada y poco profunda, más profunda y menos alargada, así que dependiendo de como haya ido la evolución de los regímenes así será la evolución de la erosión máxima.

Para mostrar las grandes diferencias existentes entre los regímenes se muestra la figura 4 donde se observa la evolución temporal de los ensayos en que dominaba el régimen rápido, resalto anegado transitorio y resalto anegado estable. Las observaciones corresponden a 24 fosos, 12 en la traviesa T1 y 12 en la traviesa T2, de los que 6 en cada traviesa se realizan con la configuración sobre el perfil y los otros 6 con la traviesa T2, 2 cm más baja.

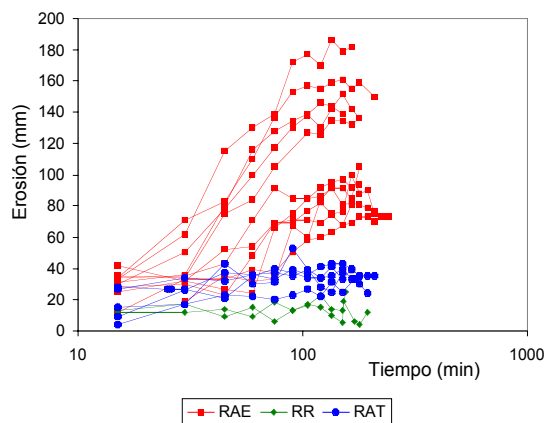


Figura 4. Evolución temporal de los fosos de erosión y su relación con los regímenes hidráulicos que se forman en el foso

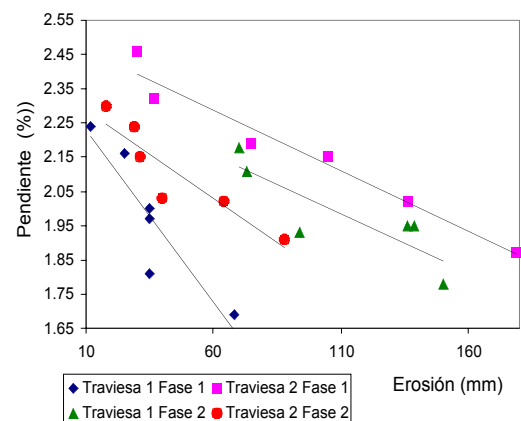


Figura 5. Relación entre la pendiente de equilibrio aguas abajo de cada traviesa y la erosión máxima en el foso.

El régimen rápido tiene un comportamiento claramente oscilatorio desde los primeros minutos sin llegar a estabilizarse. El resalto anegado transitorio tiene dos fases: una primera que erosiona el foso rápidamente en los primeros minutos y otra oscilatoria en la que la erosión ya no aumenta más. En cambio, para el resalto anegado estable evoluciona en tres fases: una primera más lenta, en la que domina el resalto anegado transitorio, una segunda fase en que aumenta mucho la erosión y aparece realmente el resalto anegado estable y se va formando el foso, por último una estable en la que se detiene la erosión máxima pero oscilando alrededor de ella, en ésta última puede aparecer el resalto ondulado.

Dependencia de la erosión local con la pendiente aguas abajo del foso: La figura 5 muestra la relación existente entre la pendiente media del perfil de equilibrio aguas abajo de la traviesa y la erosión máxima que se produce en cada ensayo, para cada fase y para cada traviesa. Así en la traviesa T1 para la fase 1 se dieron las menores erosiones y en la traviesa T2 para la misma fase fueron las mayores. La relación observada es bastante lineal, sin embargo creemos que hace falta tomar más datos que corroboren esta disposición.

Influencia del punto de duna en la erosión local: La formación de la duna aguas abajo del foso o el punto de pendiente cero en el lecho parece ser una de las características más adecuadas para pensar en el control hidráulico del flujo, es decir puede actuar muchas veces como una sección de control pues es cerca de esa zona donde es posible encontrar el calado crítico del flujo. Así este punto controla de manera fuerte la hidráulica que se genera en el foso de erosión. Si la duna sube o desciende, la relación de los flujos de cantidad de movimiento y el equilibrio de fuerzas en el foso cambian radicalmente. Por ello pensamos que una aproximación empírica a este equilibrio complejo de fuerzas es una relación existente entre la distancia que hay entre la cresta de la traviesa y el punto máximo de la duna. La relación se puede apreciar claramente en la figura 6. En

esta figura se aprecia la zona en que la erosión regresiva comienza a existir y se da, en nuestros ensayos, a partir de los 90 mm de erosión máxima. La erosión regresiva ocurre siempre para la hidráulica presente en el foso de resalto anegado estable (o con presencia de resalto ondulado).

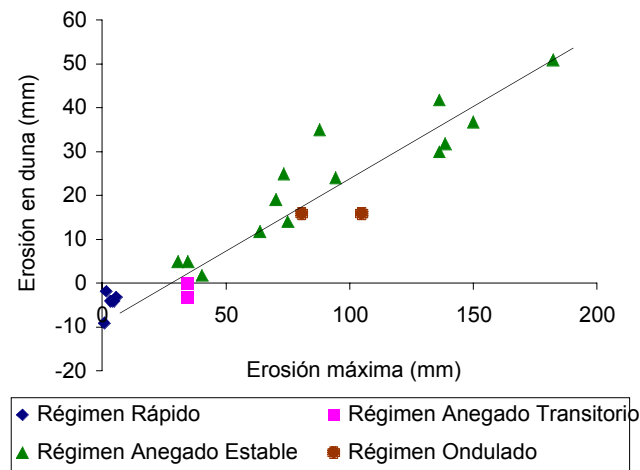


Figura 6. Erosión máxima con la distancia entre el borde de traviesa y la cresta de la duna

Forma del foso de erosión: La forma del foso de erosión es compleja y cambiante. Se realizaron varios ajustes de diferentes funciones para la forma del foso y la que más se ajusta a dicha geometría es una función del tipo $e=Ae^{bx}\sin(\omega x)$, siendo A, b y w parámetros de ajuste. La figura 7 muestra un ejemplo del ajuste en el que se utilizaron el arranque en la traviesa, la máxima profundidad de erosión y el punto de inflexión. Este ajuste es suficientemente bueno hasta el punto de inflexión, sin embargo más allá de este punto la ecuación generada se separa del ajuste. Las figuras 8 y 9 muestran la buena relación adimensional existente entre los fosos de erosión. Prácticamente todos los fosos mantienen un comportamiento único excepto en pocos casos que existe una pequeña desviación. Lo que permitiría generalizar la forma mediante la ecuación precedente utilizándola en forma adimensional.

ANÁLISIS DIMENSIONAL DEL FOSO DE EROSIÓN

Cada ensayo se caracteriza por el caudal líquido circulante, el caudal sólido transportado y una disposición determinada entre las traviesas. Para relacionar estas variables se realizó un análisis dimensional con el teorema π de Buckingham. Así la erosión máxima se puede representar por una función de la forma

$$e_m = f(q, q_s, \gamma, \gamma_s, \phi, s_l, \lambda, L_T) \quad (1)$$

en donde, e_m es la erosión máxima en el equilibrio, q el caudal líquido unitario, q_s el caudal sólido unitario, γ el peso específico del agua, γ_s el peso específico del material, ϕ el diámetro típico del material, s_l la pendiente de equilibrio aguas abajo de la traviesa, λ la diferencia de alturas entre traviesas consecutivas y L_t la distancia entre traviesas. Al ser el diámetro ϕ de las partículas suficientemente uniforme y el mismo en todos los ensayos, no se tomó en cuenta dentro de la función (1). También se descartó la pendiente de equilibrio, aguas abajo de la traviesa por no ser por el momento un parámetro de diseño. Realizando este sencillo análisis de dimensiones obtenemos la siguiente expresión:

$$\frac{e_m}{\lambda} = \psi \left(\frac{q(\gamma_s - \gamma)}{q_s}, \frac{\lambda}{L_T} \right) \quad (2)$$

a la relación adimensional de variables $\frac{q(\gamma_s - \gamma)}{q_s}$ la denominaremos por σ , el otro parámetro es la pendiente parcial que hay entre las traviesas. En la tabla 3 se muestran los valores obtenidos para las características de ensayo de las tres fases.

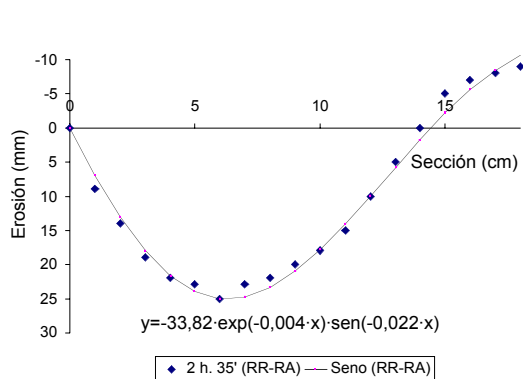


Figura 7. Evolución del foso de erosión con la función $e=Ae^{bx} \cdot \text{sen}(\omega x)$, ensayo 300g/s-10.45l/s

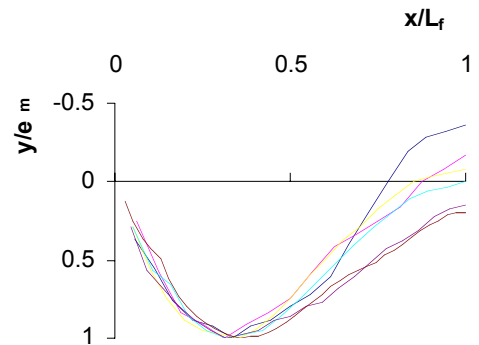


Figura 8. Foso adimensional del foso en los ensayos T1-F1.

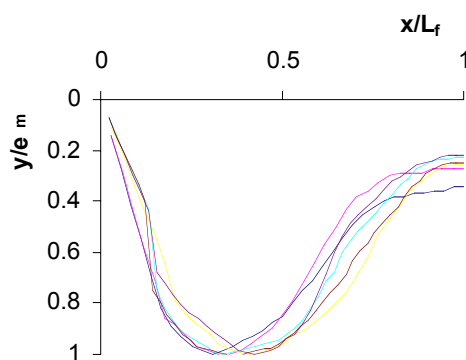


Figura 9. Foso adimensional del foso en los ensayos T2-F2.

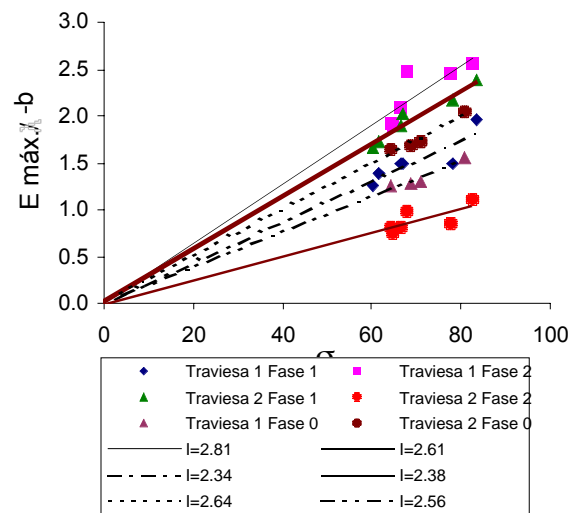


Figura 10. Evolución ajustada de la variable adimensional σ respecto de la erosión máxima en cada uno de los ensayos.

Tabla 3. Características en la disposición de cada una de las traviesas

	FASE 0			FASE 1			FASE 2		
	λ (mm)	L_T (mm)	λ/L_T (%)	λ (mm)	L_T (mm)	λ/L_T (%)	λ (mm)	L_T (mm)	λ/L_T (%)
T 1	83.2	3250	2.56	99.5	4250	2.34	119.5	4250	2.81
T 2	224.1	4500	2.64	222.3	8500	2.62	202.3	8500	2.38

Relacionando la erosión máxima adimensional contra σ , al parecer a pesar de que se presenta bastante desordenado se vislumbra un arreglo casi lineal para cada fase y cada traviesa. Todo parece indicar que al disminuir σ disminuye también la erosión máxima en el foso de erosión, si bien se observa también cierta dispersión de los datos. Si ajustamos un comportamiento lineal en cada fase y a continuación hacemos pasar cada tendencia por el origen obtenemos la gráfica de la figura 10. La organización de los datos aún no es satisfactoria pero creemos que ésta permitirá desarrollar en el futuro una adecuada correspondencia entre las variables de diseño de traviesas. La tabla 4 presenta los resultados experimentales para los distintos ensayos.

Tabla 4. Resultado de los ensayos de los fosos de erosión.

Ensayo	Q (l/s)	Qs (gr/s)	e _m (mm)	duna (mm)	Régimen	σ	
T-1F-1	1	11.35	300	25	-9	RR-RA	62.4
	2	9.82	264	12	-2	RR	61.4
	3	12.24	300	35	-3	RAT-FA	67.3
	4	11.38	276	35	0	RAT	68.0
	5	11.52	240	35	5	RAE	79.2
	6	12.93	252	81	16	ROT	84.7
T-1F-2	1	11.83	300	73	25	RAE	65.1
	2	10.54	264	70	19	RAE	65.9
	3	12.27	300	94	24	RAE	67.5
	4	11.50	276	139	32	RAE	68.8
	5	11.44	240	136	30	RAE	78.7
	6	12.84	252	150	37	RAE	84.1
T-2 F-1	1	11.35	300	37	-4	RA	62.4
	2	9.82	264	24	-4	RR	61.4
	3	12.24	300	75	14	RAE	67.3
	4	11.38	276	105	16	ROT	68.0
	5	11.52	240	136	37	RAE	79.2
	6	12.93	252	182	51	RAE	84.7
T-2 F-2	1	11.83	300	29	-4	RR	65.1
	2	10.54	264	18	-3	RR	65.9
	3	12.27	300	31	5	RAE	67.5
	4	11.50	276	64	12	RAE	68.8
	5	11.44	240	40	2	RAE	78.7
	6	12.84	252	88	35	RAE	84.1

En la figura 11 se muestra la evolución de las pendientes de equilibrio aguas debajo de las traviesas de todos los ensayos realizados en función de la variable adimensional σ . La tendencia da una idea bastante buena de la evolución de las pendientes respecto de las variables de ensayo, sin embargo hay que anotar que aún existe mucha dispersión en los datos aquí registrados.

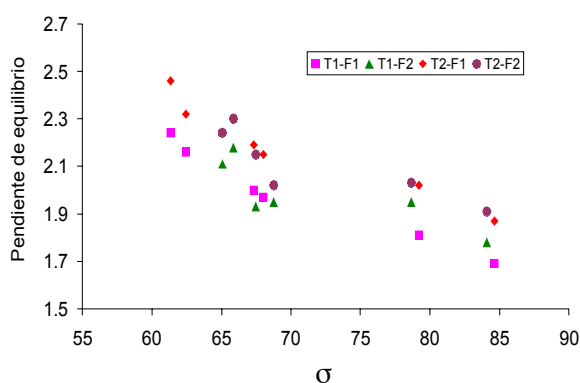


Figura 11. Pendientes de equilibrio aguas debajo de las traviesas en función de σ .

CONCLUSIONES

Se presenta un trabajo experimental en lecho vivo sobre umbrales de fondo en el que se estudia la erosión local aguas bajo de las estructuras y la influencia en el foso de erosión de diferentes variables hidráulicas y de diseño. Entre otras cosas se puede concluir que:

1. El régimen hidráulico está controlado por la forma del foso de erosión y la relación entre el transporte sólido y líquido.

2. La evolución temporal del fenómeno y la erosión en el foso dependen del régimen hidráulico que se establece. Este régimen está condicionado por la propia estructura del foso y sobre todo por la altura relativa entre la base de la traviesa y la cresta de la duna.
3. Los fosos de erosión tienen una semejanza geométrica que depende de la longitud del foso y la erosión máxima del mismo.
4. En el foso de erosión es determinante la pendiente de equilibrio del perfil aguas abajo de la traviesa.
5. La erosión máxima depende de variables de diseño como lo son: la pendiente entre traviesas, el caudal sólido y el caudal líquido.
6. La duna aguas abajo de la traviesa siempre tiene una cota superior a ésta cuando el régimen de equilibrio es el flujo rápido.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha contado con la ayuda del proyecto HID96-0971 de la CICYT, así como de la Subdirección de Investigación de la ETSECCPB-UPC.

BIBLIOGRAFIA

1. Aguirre Pe, J. (1980) *Hidráulica de sedimentos*. Mérida – Venezuela. Universidad de los Andes.
2. Andreatta A., Bateman A., Martín J.P. y Pérez M., (2000) “Estudio Experimental en Lecho Vivo del efecto de un Sistema de Traviesas en la Estabilización de un Cauce de Gran Pendiente” *XIX Congreso Latinoamericano de Hidráulica*, Córdoba, Argentina. (en revisión).
3. Bateman, A.; Martín Vide, J.P.; Bocquet, S.; Spavillero, F. (1996) Estudio experimental de la erosión local al pie de una traviesa *XVII Congreso Latinoamericano de Hidráulica* (Guayaquil) vol. 4, pag. 387-394.
4. Gaudio, R., Marion, A.; Bovolín, V. (2000). Morphological effects of bed sills in degrading rivers. *Journal of Hydraulic Research. IAHR*. Vol 38. pp 83-96.
5. López García, E. 1997 *Erosión local en una traviesa en lecho vivo*. Barcelona. Projecte o Tesina d'Especialitat, Departamento de Hidráulica, Marítima y Ambiental. Universitat Politècnica de Catalunya.
6. Martín Vide, J.P. 1997. *Ingeniería fluvial*. Primera edición. Barcelona. Edicions UPC.
7. Martín Vide, J.P. 1993 *Discussion to “Mechanics of jet scour downstream of a headcut”* (por Julien, O.R. et al. en *J. Hyd. Research*, vol. 31, num. 6). *Journal de Recherches Hydrauliques*, vol. 32, num. 6, pp. 954-957.
8. Martín Vide J.P. y Bateman A., (1999) “Experiments on Steep-Stream Stabilization”, *ASCE's, Int. Water Resource Eng. Conference*, Seattle, USA.