

## XIX CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA – CÓRDOBA 2000

### ESTUDIO EXPERIMENTAL EN LECHO VIVO DEL EFECTO DE UN SISTEMA DE TRAVIESAS EN LA ESTABILIZACIÓN DE UN CAUCE DE GRAN PENDIENTE

Andrés Andreatta I.<sup>(1-3)</sup>, Allen Bateman P.<sup>(1)</sup>, Juan P. Martín V.<sup>(1-2)</sup> y Miguel Pérez F.<sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup> ETSECCPB - UPC, Barcelona-España. e.mail: allen.bateman@upc.es

<sup>(2)</sup> ETSICCP - UCLM, Ciudad Real, España. e.mail: pmartin@ccp-cr.uclm.es

<sup>(3)</sup> IMF - UCV / CEMFA - USB, Caracas, Venezuela. e.mail: aandrea@usb.ve

#### RESUMEN

En este trabajo se presenta la metodología y los resultados del estudio experimental en un lecho vivo de un sistema de traviesas en la estabilización de un cauce de gran pendiente. En el se estudia la evolución del perfil longitudinal del fondo efectuando un desequilibrio erosivo hasta alcanzar una nueva situación de equilibrio. Tanto en su evolución como en los estados de equilibrio inicial y final se observa una convexidad del fondo, que es producto del flujo no uniforme. Los 19 experimentos se realizaron en un canal de ensayos con capacidad de transportar grandes tasas de material sólido durante largos periodos de tiempo. En los ensayos se han suministrado caudales sólidos del orden del 1% del caudal líquido, formándose perfiles de equilibrio con pendientes alrededor del 2%. Del estudio sobre los efectos de la intercalación de obras transversales para el control de la erosión general, se ha observado una disminución de la pendiente de equilibrio respecto a la que adopta el cauce sin éstas, Leliavsky (1964). Se ha corroborado el hecho de que a menor distancia entre traviesas se reduce la pendiente parcial del tramo, además se ha observado que no guarda relación con la coronación de los umbrales de fondo en el lecho. Se han verificado las fórmulas de Meyer-Peter y Müller y Einstein-Brown con los resultados experimentales, la segunda de las cuales ha dado mejores resultados.

#### ABSTRACT

This work present the methodology and the experimental results of a study in live bed of large slope channel in presence of a system of sills. A evolution profile of the bed is reported due to a change of equilibrium state. A convexity of the bed profile is reported both at steady and unsteady situations, result a non uniform flow along the reach. A set up of 19 large time experiments was performed in a laboratory flume with high sediment rate. A solid discharge up to 1% of the water discharge produce a 2% steep profile. The sills effects produce a lower slope profile in the steady state respect to the one without them, Leliavsky (1964). The equilibrium slope is lesser when the distance of sills are lesser too, and it is observed that their have no relationship with the relative level between sills. The Meyer Peter & Müller and Einstein Brown formulas had been verified with the experimental data, it seems that the second one has the best fit.

## INTRODUCCIÓN

El hombre, a lo largo de la historia ha tenido que intervenir (*mediante la construcción de obras hidráulicas*) sobre los cauces naturales para paliar una serie de problemas (*inundaciones, inestabilidades, salvar el obstáculo del río, etc*). El lecho de los ríos y sus orillas están constituidos la mayoría de las veces por material que puede ser arrastrado por la fuerza del agua, efecto de la erosión fluvial. Estos fenómenos cambian la morfología del cauce y pueden poner en peligro a estas obras hidráulicas. Para evitar que esto suceda, primordialmente en cauces de gran pendiente con tendencia a la incisión, se utilizan obras transversales (*traviesas*), de orilla a orilla, de muy pequeña altura o incluso coronadas sobre el fondo, cuya principal función es estabilizar el fondo del río ante la erosión general. Actúan básicamente como puntos duros, estableciendo un control del perfil del lecho. Se suelen disponer en grupos seccionando el cauce en tramos de menor longitud evolucionandolo a una forma escalonada, ver fig. 1, Martín (1997).

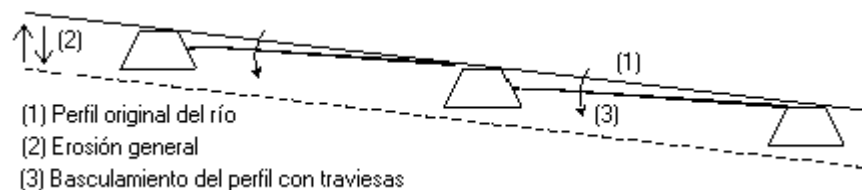


Figura 1. Situación de erosión a largo plazo en presencia de un sistema de traviesas

La traviesa por si sola actúa sobre el cauce suavizando la pendiente inmediatamente aguas arriba, asociando a su vez un salto a su pie con un efecto desfavorable aguas abajo: el foso de erosión local (*con gran pérdida de energía*). La magnitud del foso de erosión puede variar e inclusive descalzar a la obra (*erosión regresiva*). Estando condicionada por el descenso del fondo entre traviesas (*escalonamiento o pendiente*) y por el régimen hidráulico, Bateman et al (2000); de ahí la necesidad de conocer la distancia óptima entre traviesas que economice su número y así los costes de la obra, garantizando a la vez su estabilidad, García (1998).

En trabajos anteriores Gaudio et al (2000), Bateman et al (1996), Martín y Del Agua (1995), han estudiado la erosión local en esta clase de estructuras. El objetivo principal de este trabajo es dar continuidad a estudios anteriores relativos a la erosión general García (1998) y Martín et al (1999), así como presentar los resultados de Pérez (1999); describiendo cómo las traviesas limitan las erosiones en un cauce, mediante un estudio experimental, consistente en ensayar en laboratorio, un sistema de traviesas bajo condiciones de avenida, hasta alcanzar un estado de equilibrio, con miras a determinar pendientes de estabilización. El flujo es bidimensional, rápido, sin formas de fondo y en lecho vivo. Este estudio se realizó en el canal con recirculación de sedimentos de la Universidad Politécnica de Cataluña.

## INSTALACIONES EXPERIMENTALES

La instalación principal es un canal hidráulico de 20 m de longitud, 0.6 m de ancho y 0.6 m de altura, con pendiente variable de hasta el 4%. Los cajeros del canal son de vidrio (*paneles de 1 m de longitud*) mientras que la solera es de plancha de PVC. Este canal se encuentra alimentado por un circuito hidráulico compuesto de: un depósito acumulador, un sistema de bombeo con capacidad superior a 100 l/s, un depósito de carga constante, un depósito de aforo con vertedero triangular y, en el extremo de aguas abajo, el canal de desagüe hasta el depósito acumulador.

Este equipo posee un sistema que posibilita transporte sólido en periodos de larga duración para estudiar condiciones de equilibrio en lechos vivos. Dado que los ensayos implican grandes tasas de transporte sólido, el canal posee un circuito cerrado de material sólido, capaz de manejar caudales sólidos de 1 l/s durante el tiempo de ejecución de las pruebas. Los elementos que constituyen el circuito del material sólido son: una tolva de dosificación (*900 litros*), un separador de arena o desarenador (*1lt/s*), tanques de almacenamiento (*6m<sup>3</sup> c/u*) y un sistema de transporte (*cintas*) para el retorno de la arena (fig.2). Es de destacar, que el circuito del sólido es independiente del circuito del agua, siendo la tolva y el desarenador los elementos para incorporar y separar respectivamente arena del agua.

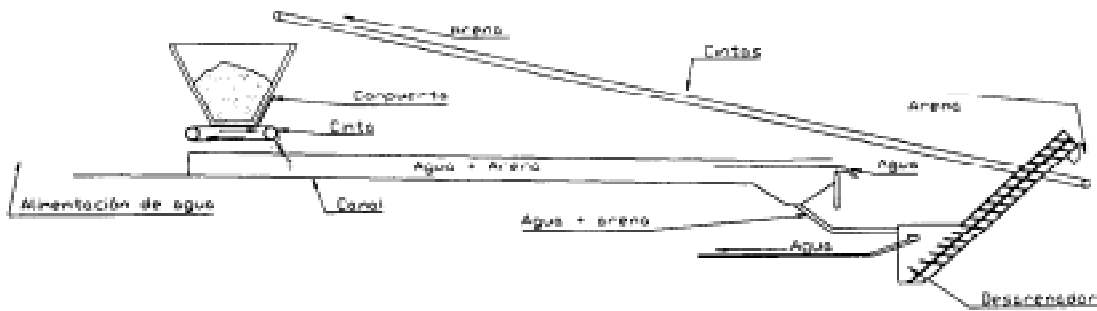


Figura 2. Esquema de las instalaciones experimentales, (Martín Vide et al, 1999)

$D_{84} = 1,0357 \text{ mm}$	
$D_{75} = 0,9883 \text{ mm}$	$D_m = 0,7216 \text{ mm.}$
$D_{50} = 0,8567 \text{ mm}$	$\sigma = \frac{1}{2} \cdot (D_{84} - D_{16}) = 0,2261$
$D_{25} = 0,6439 \text{ mm}$	
$D_{16} = 0,5836 \text{ mm}$	

Tabla 1. Granulometría de la arena

La arena utilizada tabla 1, debido a que el sistema es en circuito cerrado, es lo más uniforme posible, evitando una deriva en la granulometría del material aportado, causado por transporte diferencial en el canal. El sedimento es arena silíceo, de cantera, el peso específico del grano es  $2,57 \text{ t/m}^3$  y el peso específico de la arena  $1,54 \text{ t/m}^3$ .

## CARACTERIZACIÓN DE LOS ENSAYOS Y MÉTODOS EXPERIMENTALES

Los ensayos experimentales fueron realizados con la finalidad de generar resultados adicionales al conjunto de ensayos iniciales de la investigación de García (1998), una descripción más detallada de los mismos se encuentra en Pérez (1999). Se realizaron dos campañas de ensayos: la 1ra. campaña, sin traviesas que se llevó a cabo para determinar las pendientes de equilibrio, del flujo líquido-sólido, completando así el banco de datos de pendientes de equilibrio. A continuación se efectuó la campaña de ensayos con traviesas (2da. campaña), ambas campañas estaban constituidas por 7 y 12 ensayos respectivamente. La situación que intentan modelizar estas dos tipologías de ensayos son: la primera, el comportamiento del fondo y la segunda es el comportamiento de este cuando se estabiliza el lecho con traviesas. El estudio de la erosión local de estos ensayos se detalla en el trabajo de Bateman et al (2000).

Las condiciones caudal líquido (Q) y el caudal sólido ( $Q_s$ ) finales, son las que caracterizan a cada uno de los ensayos dentro de cada campaña de ensayos, ver tablas 2, 3 y 4. La filosofía de todos los ensayos es la misma que en estudios anteriores, García(1998): se parte de una situación de equilibrio para unas condiciones de caudal sólido y líquido (*inicio del ensayo*) y de forma 'instantánea' se cambia una o ambas condiciones con lo cual se da un desequilibrio erosivo y una evolución del fondo a lo largo del tiempo hasta alcanzar finalmente (*fin del ensayo*) un nuevo equilibrio dinámico. La diferencia fundamental entre ambas campañas la determinan las condiciones de contorno, en los ensayos con traviesas además de la condición inferior (*vertedor a 110mm, que garantiza la cota inicial y la acumulación de arena en el canal*) existen las que suponen la presencia de traviesas en tramos intermedios del canal. Es de notar, la existencia de la traviesa inferior para ambas campañas de ensayos, colocada con la finalidad de regular el perfil velocidades antes de la descarga libre a la salida del canal.

En total son tres las traviesas dispuestas en estos ensayos, las cuales constituyen prismas de base trapezoidal de PVC (*de base mayor=162mm, altura=66mm y base menor=33.5mm*) ubicados transversalmente al canal (*anchura=0.6m*) que se comportan como puntos duros del fondo. La notación empleada para designarlas es T1, T2 y T3 en el sentido de la corriente. Dentro de la 2da. Campaña se realizaron dos tipos de ensayos denominados 1ra y 2da fase: En la primera fase se disponen las 3 traviesas a diferentes distancias entre ellas y coronadas en su totalidad sobre el perfil de fondo de equilibrio llamado básico (300grs/s, 10l/s). Esta disposición divide el canal en tres tramos de 4m, 4.25 m. y 8.5 m. cada uno, respectivamente 'tramo de arriba' (*de la sección s17 a la traviesa T1*), 'tramo central' (*el comprendido entre las traviesas T1 y T2*) y 'tramo de

abajo' (el comprendido entre las traviesas T2 y T3). En la segunda fase se desciende la traviesa central T2 respecto a su cota original. Un detalle preciso se muestra en el esquema de la fig. 3.

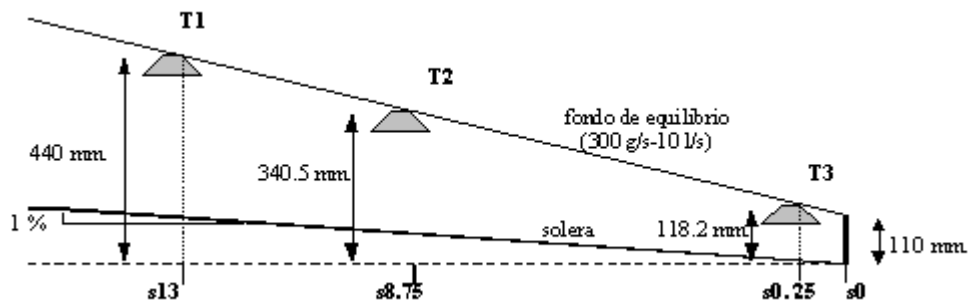


Figura 3. Disposición de las traviesas en el canal

Los objetivos de los ensayos experimentales son:

1. Determinación del perfil de fondo: tanto en su situación inicial y final (o de equilibrio) como su evolución temporal.
2. Determinación de las condiciones del flujo a lo largo de todo el ensayo.
3. Descripción cualitativa de los fenómenos observados durante el tiempo de ensayo.

Esto en la práctica se traduce en el siguiente registro de datos:

1. Medida espacial (en diversas secciones del canal) y temporal (en distintos instantes: desde el tiempo de inicio hasta el de equilibrio) de los calados de agua y cotas de fondo.
2. Evaluación precisa de los caudales empleados durante el ensayo.
3. Determinación de los tiempos en que se alcanza un nuevo equilibrio de fondo y determinación de un criterio que permita establecer la situación de equilibrio.

Para cada ensayo se tomaron medidas del perfil de fondo cada 30 min. registrando la variación del perfil respecto al tiempo. Esto se hace con la idea de observar la convergencia del ensayo y determinar el final del mismo. El estado final se obtiene cuando tres medidas consecutivas del perfil cumplen el criterio de convergencia impuesto, el cual se discutirá posteriormente. Sin embargo, el tiempo de estabilización es el que corresponde a la primera medida de las tres. La medición de la lámina de agua se realiza en el instante final, que es cuando se supone finalmente estabilizado el ensayo. Las medidas de cota del fondo se realizan (*aprovechando que el canal es de paredes de vidrio*) en el borde exterior de la base de la solera del canal con una regla de invar en posición vertical con esto se garantiza una buena definición del perfil. Esta técnica de medida aunque parezca rudimentaria es efectiva ya que dado que el flujo es rápido y de calado muy pequeño cualquier equipo por intrusión en el flujo socavaría el punto de medición. Actualmente, se está instalando un sistema para la medición continua mediante técnicas de digitalización y procesamiento de imágenes, Andreatta (1996).

Un aspecto importante en los ensayos es decidir cuando se puede considerar que tanto el perfil de fondo como los fosos de erosión se encuentran en equilibrio y por ende finalizado el ensayo. Dado que ambos fenómenos (*erosión local y general*) están estrechamente relacionados y a que el cuenco de erosión en su etapa final se encuentra oscilando en torno al equilibrio (*flujo pulsado de sólidos*) se considera la estabilización de la erosión general como proceso donde se aplicará el criterio de equilibrio. En investigaciones anteriores, los criterios de convergencia se establecieron basándose en la idea de un comportamiento asintótico (exponencial) del fenómeno (*evolución de la pendiente media*) estableciendo así un límite en la percepción visual de las medidas. Sin embargo, la pendiente puede seguir cambiando muy lentamente, hasta estabilizarse en un valor distinto del establecido como convergente bajo este criterio. La pendiente media es la resultante de la regresión lineal de las cotas que componen el perfil de fondo, forzando el término independiente del ajuste a la cota de la condición de contorno aguas abajo, bien sea el vertedor inferior o la altura de coronación de la traviesa, en el caso de ensayos de la 2da. Campaña.

Un criterio de convergencia válido es aquel que contempla la evolución del proceso en el tiempo. Si se observa la evolución de la pendiente media en el gráfico ( $i$  vs.  $t$ ). de la fig. 5, se puede constatar que el comportamiento durante el proceso erosivo generalizado a lo largo del canal es prácticamente lineal (*en escala semi-log*), lo que quiere decir que la pendiente media presenta una evolución temporal logarítmica:  $i = a + b \cdot \ln t$ . Esto demuestra que pensar en el proceso como de comportamiento asintótico (*exponencial*) no es adecuado, ya que una función logarítmica carece de asíntota. Sin embargo, dado que la pendiente final debe estabilizarse en algún momento, se considera punto o instante de estabilización a aquel en el cual se produce un cambio de comportamiento en la función temporal de la pendiente, (*cambio brusco y repentino*). Este criterio de convergencia fue el que se adoptó finalmente en los ensayos de Pérez (1999).

## DISCUSIÓN SOBRE LOS ENSAYOS Y RESULTADOS EXPERIMENTALES

Situación de los ensayos: Para comprender el proceso de erosión, e intentar dar una explicación al comportamiento del lecho es imprescindible caracterizar el flujo. Como puede constatarse de un ensayo típico, el de la gráfica de la fig. 9, el número de Froude ( $Fr$ ) oscila entre 1.25 y 1.8, lo que implica la existencia de régimen rápido. A la vez, el número de Reynolds ( $Re$ ), varía entre 46820 y 69490, lo que nos coloca en un régimen turbulento (por encima de 4000). En la gráfica de la fig. 4, se muestra la ubicación de los ensayos en el ábaco de Shields, indicando que efectivamente se encuentran por encima del límite del movimiento en la zona de transición. Lo anterior es concordante con los resultados experimentales, ya que ninguno de los ensayos de estabilización presento formas de fondo a lo largo de su evolución (*fondo plano*), por lo que su rugosidad solo esta asociada al grosor de grano. Este comportamiento es similar al de estudios anteriores Martín et al (1999).

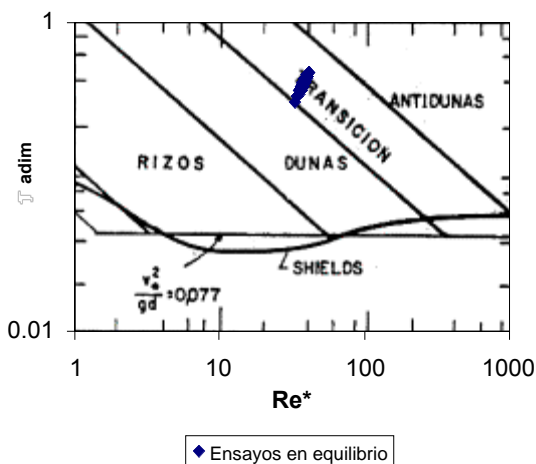


Figura 4. Situación de los ensayos en el Abaco de Shields, tomado de Aguirre (1980)

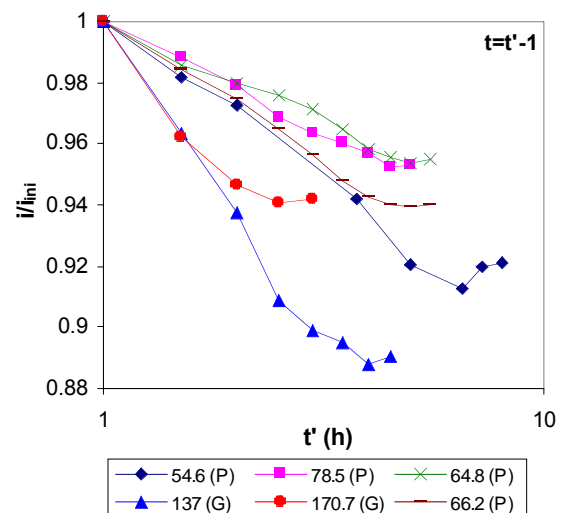


Figura 5. Evolución temporal de los ensayos sin traviesas

Evolución de los ensayos: Al estudiar la pendiente de equilibrio del lecho, es indispensable conocer a priori su comportamiento temporal, este aspecto es de suma importancia ya que puede afectar la validez de cualquier estudio de pendientes de estabilización. La fig. 5 ilustra la evolución de la pendiente para distintos ensayos, tanto de García (1998) "G", como de Pérez (1999) "P". El factor  $\sigma$ , es un parámetro adimensional de transporte que relaciona el caudal líquido con el sólido  $\frac{q(\gamma_s - \gamma)}{q_s}$ , pudiendo ser utilizado para identificar los ensayos, Bateman et al (2000) Tal y como

se mencionó anteriormente, la pendiente media evoluciona en el tiempo siguiendo un comportamiento lineal (*en escala semilog*). La evolución de la pendiente media puede modelizarse de diferentes maneras, una de ellas es la regresión logarítmica, justamente la escogida para el análisis de los datos experimentales. La expresión es la siguiente:  $i = a + b \cdot \ln t$ . Una vez llegado al equilibrio la erosión parece parar bruscamente, oscilando levemente alrededor del valor de equilibrio. Estas oscilaciones pueden explicarse en gran parte por los errores

introducidos en la medición de las cotas de fondo (*percepción visual*). El cambio repentino de la evolución de la pendiente tiene difícil explicación, esta es que normalmente los comportamientos regidos por ecuaciones diferenciales de coeficientes constantes y únicos, cuyas condiciones iniciales y de contorno son continuas y derivables, suelen tener evoluciones de derivada continua. Esto quiere decir que análogamente al caso de inicio de movimiento de Shields, sea necesario estar sobre un cierto límite. Es decir, en ensayos de erosión como los realizados, cuanto más cerca estamos de la pendiente de estabilización, menor es la fuerza con la que el flujo arranca partículas del lecho. Llegado a ese punto el flujo no es capaz de poner en movimiento partículas adicionales, salvo el equivalente de las que se depositan en el lecho reponiendo y manteniendo así la cota del perfil de fondo. Sin embargo, este cambio repentino en la evolución de la pendiente da a entender que este proceso no es simple. Los tiempos de estabilización para los ensayos de equilibrio pueden observarse en la tabla 2. El tiempo de estabilización depende del desequilibrio erosivo provocado, sin embargo este puede situarse en una media de 5 horas aproximadamente.

Tabla 2. Pendientes de equilibrio, ensayos sin traviesas

$Q_s$ (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
$\sigma$	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
$i_{MPM}$ (%)	2.79	2.20	2.07	2.51	2.51	2.62	2.52
$i_{EB}$ (%)	2.32	1.94	1.80	2.16	2.14	2.19	2.10
$t_{equil.}$ (h)	8.5	4.5	9.5	5.0	3.5	3.5	4.5

**Perfil del fondo y equilibrio en los ensayos:** Para poder apreciar la evolución de la forma del fondo en un ensayo típico, se han representado las diferencias entre la curva del perfil de fondo y su ajuste por regresión lineal. Esta operación pone de manifiesto que la forma de fondo posee una curvatura a lo largo de la evolución del ensayo, ver gráfica de la fig. 6. Estos resultados son coherentes con lo reportado por Suryanarayana (1969), sobre la forma del perfil de fondo durante el proceso de erosión. Aproximando la curvatura del perfil, ya en equilibrio, a una regresión polinómica de 2do. orden (*cuadrática*) se observa que la concavidad del perfil es hacia abajo (*convexa, coeficiente del término cuadrático negativo*); esta curvatura del perfil ya había sido reportada anteriormente, Martín et al (1999). Esta convexidad no disminuye a lo largo del tiempo, por lo que no evoluciona hacia una forma más suave (*pendiente de fondo única*). La curvatura del lecho, aun siendo pequeña (*máximo 1 cm respecto a la cuerda del perfil*) da a entender que el flujo en el canal no es del todo uniforme, sino acelerado a lo largo del mismo, ya que discurre por un fondo que aumenta de pendiente longitudinalmente.

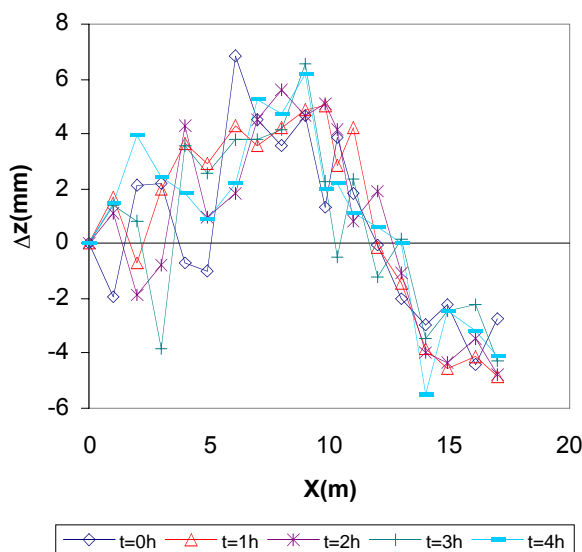


Figura 6. Diferencias entre el perfil y el ajuste lineal  
Ensayo sin traviesas 300 g/s – 12.22 l/s

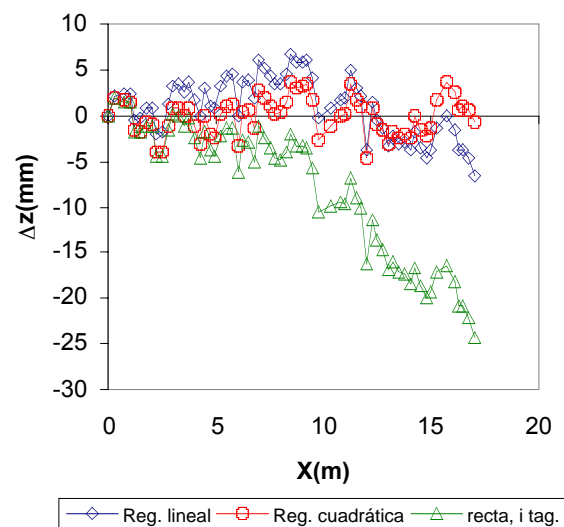


Figura 7. Diferencias entre el perfil y diferentes ajustes, Ensayo sin traviesas 300 g/s–12.22 l/s

La gráfica de la fig. 7 muestra las diferencias de las cotas medidas en el equilibrio para un ensayo representativo, contra el ajuste lineal, el ajuste polinomial (2do. orden) y la recta con pendiente igual a la tangente del ajuste cuadrático. Puede observarse que el mejor ajuste lo da la regresión polinómica. También, se pone de manifiesto que los últimos metros de canal son los que realmente se aproximan a un fondo con pendiente única (*recta*), lo que implica que para efectos de estudios de estabilización de lechos (pendientes de equilibrio), el canal utilizado es de pequeña longitud; esto hace realmente pensar sobre la validez de otras investigaciones en instalaciones con similares condiciones. Una explicación de esto, es el hecho de que en los primeros metros de canal el flujo no es uniforme, a pesar de que el gasto sólido es constante a lo largo del perfil, fig. 8.

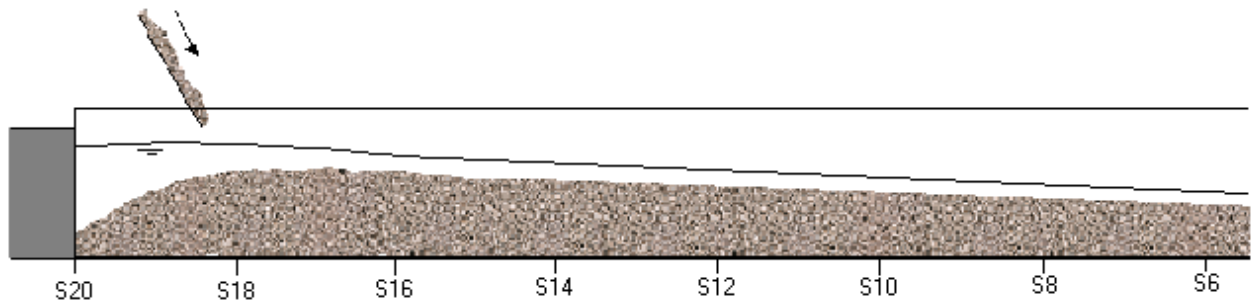


Figura 8. Variación del perfil de fondo en el canal

Una muestra fehaciente del desarrollo del flujo se muestra en la gráfica de la fig. 9, donde puede observarse la variación de la velocidad media y el número de Froude en el canal. Aquí se observa la aceleración del flujo y por ende de las partículas de arena a lo largo del canal. Debido a la poca precisión que representa la medida experimental de los calados mediante la técnica utilizada, los datos de la gráfica han sido obtenidos, mediante un programa desarrollado para el cálculo de la curva de remanso (sobre el perfil de fondo ajustado por regresión cuadrática), imponiendo como control el calado experimental en la sección aguas arriba del canal, Bateman y Puertas (1989).

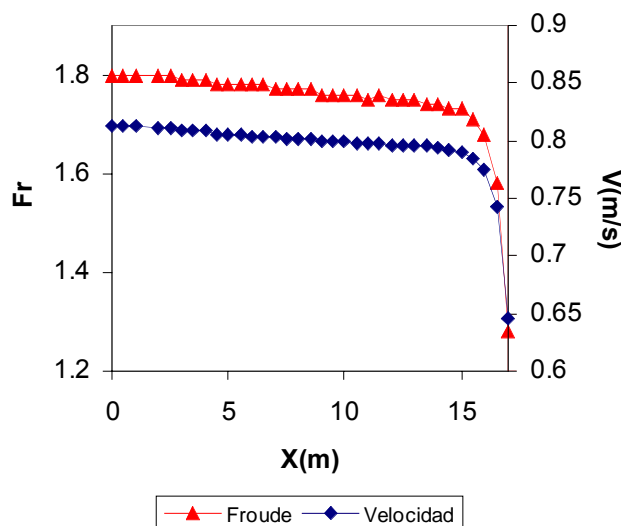


Figura 9. Variación de  $V$  y  $Fr$  en el ensayo sin travesía 300 g/s – 10.08 l/s

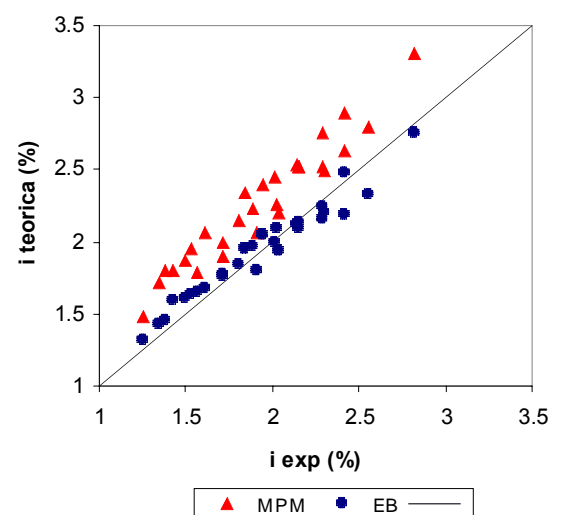


Figura 10. Pendientes de equilibrio experimentales y teóricas

**Resultados de transporte:** En el problema de lecho móvil estudiado es de interés validar y contrastar los resultados experimentales a través de ecuaciones de transporte sólido verificadas. Un ajuste de los resultados de ensayo, podría eventualmente servir para facilitar la experimentación y el análisis de resultados. Se ha propuesto en este punto de avance la utilización de las ecuaciones de Meyer-Peter y Müller (MPM) escrita para lecho plano (sin formas de fondo) y la de Einstein-Brown, Yang (1996). Aunque con diferentes coeficientes, ambas formulaciones tienen básicamente la misma estructura:

$$i \cdot R_h = a + b \cdot q_s^c \quad (1)$$

donde:  $i$  : pendiente del lecho,  $R_h$  : Radio hidráulico,  $q_s$  : Caudal sólido y  $a, b, c$  constantes ( $a=0$  en el caso de Einstein-Brown). La gráfica de la fig. 10, muestra del ajuste de los datos experimentales a las ecuaciones de MPM y EB. En la misma se han reunido el conjunto de datos referente a pendientes de equilibrio tanto de Perez (1999) como de García (1998). Se puede observar que la totalidad de datos poseen coherencia a pesar de ser generados en distintos sets de experimentación, y que se ajustan mucho mejor a los valores de pendiente pronosticados por la relación de EB, que por la de MPM. Posteriormente, con el conjunto total de datos, se realizó un ajuste experimental de la expresión (1), conservando la tensión de inicio de movimiento aportada por Martín et al (1999), como  $a=0.035$ , dado que se considera este valor más representativo, dentro de los ensayos realizados:

$$\tau = 0.035 + 0.196 \cdot \Phi^{0.345} \quad (2)$$

donde  $\tau = \gamma R_h i / (\gamma_s - \gamma) D$  y  $\Phi = (q_s^2 / (g (\rho_s - \rho) / \rho D^3))$ . Lo más significativo de este ajuste no es el coeficiente  $b=0.196$ , sino el exponente  $c=0.345$ , ya que pensando en otro diámetro característico de la arena  $b$  puede cambiar. En la fórmula de Meyer-Peter Müller se toma  $a=2/3$  y en la de Einstein-Brown,  $c=1/3$ . Este ajuste es del orden  $c=1/3$ , muy similar al del EB, adicionando el hecho de que se posee un valor de inicio de movimiento calculado sobre la observación experimental en el canal, lo que corrobora la importancia de esta expresión. Esta ecuación ajustada a partir de datos experimentales predice la pendiente de equilibrio a diferencia de la ecuación MPM que predice menores pendientes que la observada, tal y como se observa en la fig. 10.

**Control de erosión mediante traviesas:** Tal y como se mencionó anteriormente existen dos fases en la experimentación con traviesas cuya diferencia fundamental es la posición de coronación de la traviesa central. Las tablas 3 y 4 muestran los resultados de las pendientes de equilibrio de los tramos al igual que el tiempo de ejecución de los ensayos cuya media esta sobre las 3 \_ horas, menor que la de los ensayos con traviesas. Esto se debe a que el volumen de material desalojado durante los ensayos con traviesas es considerable menor. Comparando las pendientes parciales entre traviesas con las de equilibrio para similares condiciones de transporte se observa que en promedio son 5% menores. Sin embargo, hay que resaltar el hecho de que existen diferencias mayores en tramos de menor longitud. Esto refleja la actuación de las traviesas al escalonar el lecho en tramos de menor pendiente. La gráfica de la fig. 11, muestra la evolución de un ensayo representativo de la fase 2. En el mismo se evidencia que en la primera hora del ensayo los tramos inferiores se comportan como uno solo dado que el perfil erosionado alcanza a tocar la traviesa central (T2) instantes después. De igual forma es apreciable el comportamiento de estos ensayos en donde se observa que el tramo de aguas arriba (S17-T1) es el primero en equilibrarse, seguido del tramo medio (T1-T2) y del inferior (T2-T3). A la vez se observa que la variación de pendiente del ajuste lineal (en escala logarítmica de tiempo), es de distinta variación para cada uno de los tramos, mayor en los tramos superiores. Esto evidencia el desplazamiento del sedimentograma hacia aguas abajo, en donde el tramo inferior a pesar de encontrarse en las mismas condiciones de desequilibrio erosivo ( $Q_s$  y  $Q$ ), se ve menos afectado debido a la avalancha de sedimentos producto de la erosión de los tramos superiores.

Tabla 3. Equilibrio con traviesas, fase 1

240	252	264	276	300	300
11.52	12.93	9.95	11.38	11.35	12.24
79.2	84.7	61.4	68	62.4	67.3
1.86	1.72	2.30	2.01	2.18	2.04
1.84	1.68	2.28	1.99	2.21	2.06
2.05	1.90	2.47	2.16	2.33	2.21
3.50	3.50	3.50	3.50	2.50	4.00

Tabla 4. Equilibrio con traviesas, fase 2

$Q_s$ (g/s)	240	252	264	276	300	300
$Q$ (l/s)	11.44	12.84	10.54	11.50	11.83	12.27
$\sigma$	78.7	84.1	65.9	68.8	65.1	67.5
S17-T1, $i_{exp}$ (%)	1.87	1.74	2.12	1.76	2.08	2.00
T1-T2, $i_{exp}$ (%)	2.01	1.85	2.18	2.00	2.16	1.96
T2-T3, $i_{exp}$ (%)	1.97	1.95	2.32	2.06	2.26	2.16
$t_{equil.}$ (h)	3.50	4.00	4.50	3.00	4.50	4.00

Comparando las pendientes de iguales tramos en cada fase de los ensayos, tal y como se aprecia en la gráfica de la fig. 12, se puede corroborar que no existe un patrón de comportamiento general que refleje el efecto de la diferencia de coronación de la traviesa T2 entre fases. Las pequeñas diferencias reportadas en pendiente entre tramos iguales, del orden de 4.5% en promedio, pueden deberse a la pequeña diferencia en los caudales líquidos suministrados, dada la dificultad de

reproducirlos con precisión de una fase a la siguiente. La gráfica de la fig. 13, presenta la diferencia de pendiente respecto al error en el caudal medido para ensayos de similares condiciones de ambas fases (*ensayos pares*). Los resultados de esta arrojan que las diferencias en la pendiente (*en función del error del caudal*) en los ensayos pares se ubican en cuadrantes opuestos, lo que indica que dada una diferencia positiva de gasto líquido existe una disminución de pendiente y viceversa, cosa que parece lógica dentro del comportamiento de un lecho móvil. Finalmente la diferencia en pendiente es debida exclusivamente al error en el flujo líquido y no en la diferencia de coronación de las traviesas. Esto lleva a pensar que el único factor geométrico relevante y que interviene en la variación de la pendiente en presencia de traviesas es la longitud del tramo entre ellas.

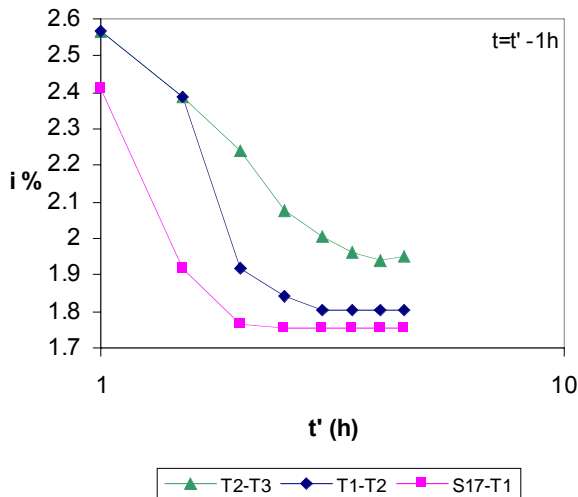


Figura 11. Evolución temporal con traviesas (fase 2)  
Ensayo 252 g/s-12.84 l/s

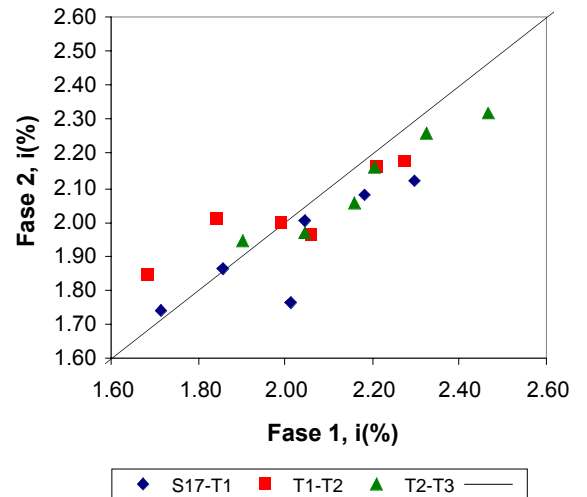


Figura 11. Comparación entre las pendientes de equilibrio para ambas fases

Del análisis de la gráfica de la fig.14, que muestra la relación adimensional entre las pendientes de los tramos con traviesas y sin ellas en función de la distancia adimensional del tramo, se observa que todos los ensayos siguen una tendencia que se podría definir como asintótica respecto a la pendiente de equilibrio (*original del cauce*). Esto quiere decir que mientras más se distancien las traviesas en un tramo, menor será su efecto en la reducción de las pendientes parciales. En el caso hipotético de que las traviesas se encuentran juntas la pendiente sería cero, ya que tendrían la misma coronación. Esta situación incierta en la realidad ya que a una distancia un poco mayor, el cuenco de socavación de la traviesa de aguas arriba socavaría la base de la de aguas abajo, desvinculando así el tramo, revela que una posible curva de ajuste de los datos experimentales partiría del origen. La dispersión en los datos de la gráfica es originada principalmente por las distintas condiciones de transporte entre ensayos ( $Q$  y  $Q_s$ ), e influyen de menor manera a medida que se alejan las traviesas para un mismo tramo.

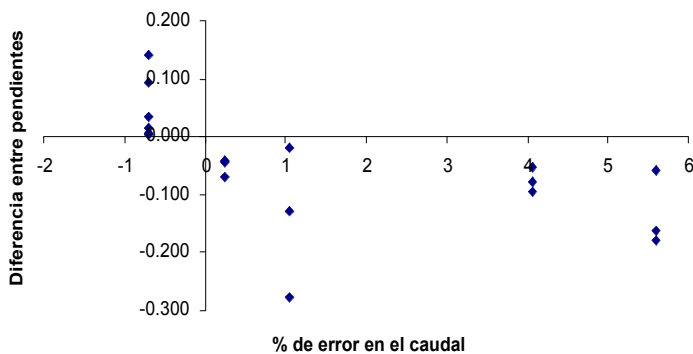


Figura 13. Diferencia de pendientes por error en el ajuste del gasto líquido

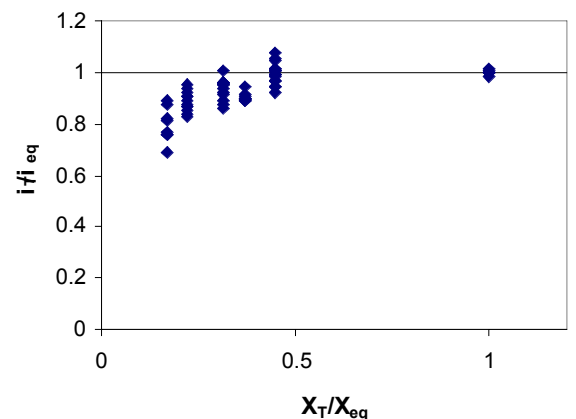


Figura 14. Influencia de la distancia entre traviesas en la pendiente de equilibrio

## CONCLUSIONES

De la metodología utilizada y de los resultados del estudio experimental en un lecho vivo de un sistema de traviesas en la estabilización de un cauce de gran pendiente, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

1. Se observa que la evolución de la erosión en un cauce debida a un aumento en el caudal líquido, disminución del caudal sólido o ambos, no es un fenómeno de tendencia asintótica en tiempo. Se ha corroborado que la variación temporal de la pendiente media es proporcional al logaritmo del tiempo.
2. Se ha observado que los perfiles de fondo en los ensayos sin traviesas tanto en su evolución como en los estados de equilibrio inicial y final poseen una convexidad, que es producto del flujo no uniforme en el canal.
3. Del estudio sobre los efectos de la intercalación de obras transversales (traviesas) para el control de la erosión, se ha observado una disminución de la pendiente de equilibrio respecto a la que adopta el cauce sin éstas. Se ha corroborado, tal como en investigaciones anteriores el hecho de que a menor distancia entre traviesas se reduce la pendiente parcial del tramo.
4. Se ha observado además que la coronación de los umbrales de fondo en el lecho, no guarda relación con la disminución de la pendiente media en el equilibrio. Las pequeñas variaciones entre ensayos pares se debe al error en el ajuste del gasto líquido.
5. De los resultados se ha ajustado una formula de transporte sólido para la instalación bajo las condiciones experimentales utilizadas. Comparando la misma con las formulas de Meyer-Peter y Müller (MPM) y Einstein-Brown (EB) se observa la clara conveniencia de su utilización, dado que posee la tendencia general de la formula de EB, contando adicionalmente con la tensión adimensional de corte del inicio del movimiento determinada en investigaciones anteriores, (Martín et al, 1999).

## AGRADECIMIENTOS

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

## BIBLIOGRAFIA

- (1) Andreatta A. (1996) *Validación experimental de modelos numéricos para simulación de flujo con superficie libre no permanente*, Tesis de Grado, Universidad Central de Venezuela, Caracas, Venezuela.
- (2) Aguirre P. (1980) *Hidráulica de Sedimentos*, Universidad de los Andes, Mérida, Venezuela.
- (3) Bateman A., Andreatta A y Muñoz N. (2000) "Estudio experimental de la erosión local producida por umbrales de fondo en lecho vivo" *XIX Congreso Latinoamericano de Hidráulica*, Córdoba, Argentina. (en revisión).
- (4) Bateman A., Martín J.P., Bocquet S y Spaliviero F. (1996) "Estudio experimental de la erosión local al pie de una traviesa" *XVII Congreso Latinoamericano de Hidráulica*, vol.4, Guayaquil, Ecuador.
- (5) Bateman A. y Puertas G. (1989).
- (6) García Revilla C. (1998) *Efecto de unas traviesas sobre un cauce con transporte sólido I*, Tesis de especialidad. Escuela T.S. Ing. de Caminos, C. y P. Barcelona, España.
- (7) Gaudio R., Marion A. y Bovolin V. (2000) "Morphological effects of bed sills in degrading rivers", *Journal of Hydraulic Research*, vol. 38, No.3.
- (8) Leliavsky S. (1964) *Introducción a la Hidráulica Fluvial*, Ed. Omega, Barcelona, España.
- (9) Martín Vide, J.P. (1997) *Ingeniería Fluvial*, Ediciones UPC, Barcelona, España.
- (10) Martín Vide J.P. y Bateman A., (1999) "Experiments on Steep-Stream Stabilization", *ASCE's, Int. Water Resource Eng. Conference*, Seattle, USA.
- (11) Martín Vide J.P., Del Agua J. (1995) "Erosión local en traviesas de protección en cauces". *Ingeniería Civil (Cedex)*, n.95, Madrid, España, pp.58-64.
- (12) Suryanarayana B. (1969), *Mechanics of degradation and aggradation in a laboratory flume*, Colorado State, PhD Thesis. Colorado, USA.
- (13) Perez Fenollosa M. (1999) *Efecto de unas traviesas sobre un cauce con transporte sólido II*, Tesis de especialidad. Escuela T.S. Ing. de Caminos, C. y P. Barcelona, España.
- (14) Yang C. (1996) *Sediment Transport, Theory and Practice*, McGraw-Hill International Editions, New York.