

**XVIII CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRAULICA
OAXACA, MÉXICO, COTUBRE, 1998**

**ESTUDIO EXPERIMENTAL EN LECHO VIVO DE LA
ESTABILIZACIÓN DEL PERFIL LONGITUDINAL DE UN CAUCE
DE GRAN PENDIENTE**

Martín Vide, J.P.; Bateman, A.; García Revilla, C.; López García, E.; Solans, D.
Escuela T.S. de Ingenieros de Caminos, C. y P. Universidad Politécnica de Cataluña
Gran Capitán, D-1 08034 Barcelona, España. E-mail: vide@ehma.upc.es,
bateman@etseccpb.upc.es

RESUMEN

Se presenta la metodología y los resultados de un estudio experimental sobre la evolución del perfil longitudinal de un río. Los experimentos se realizaron en un canal de ensayos con transporte sólido. Se han suministrado caudales sólidos del orden del 1% del caudal líquido, formándose perfiles de equilibrio con pendientes del orden del 2%. Se estudió la función y efectos de la intercalación de obras transversales de control de la erosión (umbrales de fondo o traviesas) en el perfil longitudinal. Se ha observado una disminución de la pendiente de equilibrio al colocar estas obras. Además de la investigación propiamente dicha se describen con detalle los equipos utilizados para conseguir un ensayo de lecho vivo (con transporte de sedimentos).

ABSTRACT

The methodology and results from an experimental study on the degradation of the longitudinal profile of a river is presented. The experiments were carried out in a flume for sediment transport studies. The solid rate supplied to the experiments was about 1 % of the flow rate, which resulted in equilibrium profiles with slopes about 2%. The role and effects of sills (little works across the river to cope with general scour) on the longitudinal profile were investigated. A loss in the equilibrium slope has been observed and recorded when sills are present. Besides the research on sills, the equipment and installation for conducting live-bed tests in a laboratory flume are described in detail.

XVIII CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRAULICA OAXACA, MÉXICO, COTUBRE, 1998

ESTUDIO EXPERIMENTAL EN LECHO VIVO DE LA ESTABILIZACIÓN DEL PERFIL LONGITUDINAL DE UN CAUCE DE GRAN PENDIENTE

Martín Vide, J.P.; Bateman, A.; García Revilla, C.; López García, E.; Solans, D.
Escuela T.S. de Ingenieros de Caminos, C. y P. Universidad Politécnica de Cataluña
Gran Capitán, D-1 08034 Barcelona, España. E-mail: vide@ehma.upc.es,
bateman@etsecpb.upc.es

INTRODUCCION

Las erosiones fluviales son una de las preocupaciones de la hidráulica e ingeniería fluvial. El interés del ingeniero es poder dar una explicación a los cambios generales de posición del fondo de los ríos, predecir la magnitud de los mismos y contar con medidas para luchar contra la erosión. Estos problemas son extremadamente amplios y complejos. Los ríos transportan por el fondo y en suspensión, fluyen en régimen variable, siguen direcciones naturales sinuosas, etc. Los métodos experimentales todavía son una buena manera de analizar los problemas de erosión fluvial, pero requieren simplificaciones. Las dos simplificaciones esenciales de este trabajo son el movimiento unidimensional rectilíneo y el régimen permanente. Dentro de estas convenciones de ensayo en un canal de laboratorio se ha estudiado el comportamiento de un lecho móvil vivo, con aportación y transporte del sedimento. El interés se ha centrado en las erosiones generales y en unas obras de control de la erosión fluvial llamadas umbrales de fondo o "traviesas". En trabajos anteriores (1), (2) los autores han estudiado la erosión local en esta clase de estructuras. Una explicación más amplia de estas estructuras se encuentra en (3).

DESCRIPCIÓN DE LAS INSTALACIONES EXPERIMENTALES

La instalación básica es un canal de 20 m de longitud, 60 cm de anchura y 60 cm de altura, con pendiente variable hasta el 4%. Los dos cajeros del canal son de vidrio (paneles de 1 m de longitud) mientras la solera es de plancha de PVC. Este canal se encuentra alimentado por un circuito hidráulico compuesto sucesivamente de un depósito acumulador, un sistema de bombeo con capacidad superior a 100 l/s, un depósito regulador o 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 ha sido transformado en un canal de transporte sólido, con capacidad para realizar ensayos de larga duración, útiles para estudiar condiciones de equilibrio de lechos vivos. Como era de interés estudiar grandes pendientes, que implican grandes tasas de transporte sólido, y realizar ensayos de larga duración fue necesario establecer un circuito cerrado del material sólido, pues de lo contrario el manejo del sólido gastado sería un problema (piénsese en caudales sólidos de hasta 1 l/s durante horas). Por otra parte el ensayo en circuito cerrado obligó a utilizar un material sólido lo más uniforme posible, para evitar una deriva en la granulometría del material aportado, a causa de un transporte diferencial en el canal si el material se compusiera de partículas de diferentes tamaños.

Los elementos que constituyen el circuito del material sólido son, sucesivamente, una tolva de dosificación, un separador de arena o desarenador y un sistema de transporte para el retorno de la arena (fig.1). Como puede verse, el circuito del sólido es independiente del circuito del agua, siendo la tolva y el desarenador los elementos para incorporar y extraer respectivamente arena del agua, el primero colocado en cabecera del canal y el segundo en el desagüe del canal. El circuito se completa con el transporte de la arena a lo largo del canal, en los 20 m de estudio y el retorno de la arena extraída, por medio de cintas transportadoras.

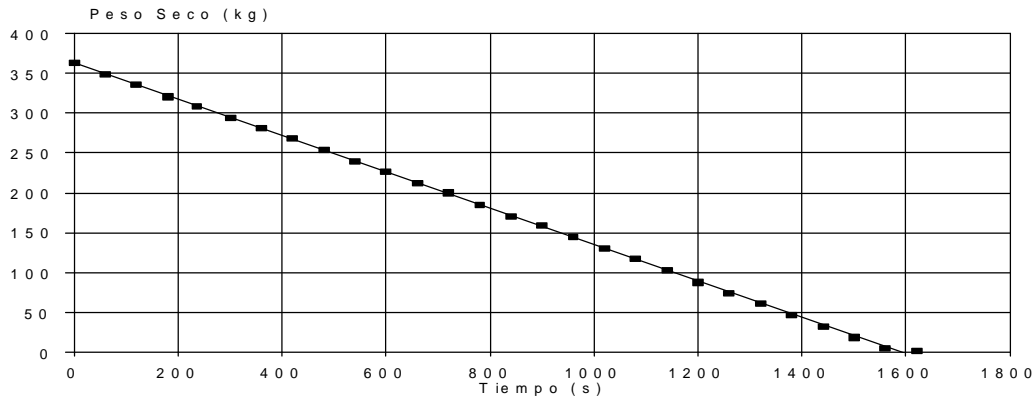


Figura 1. Esquema de las instalaciones experimentales

La tolva de cabecera, responsable de proporcionar el caudal sólido de manera controlable, es la pieza fundamental del circuito. Tiene una capacidad de 900 litros (en un diseño típico de tronco de pirámide invertido); gracias a esta capacidad de almacenamiento la tolva tiene también la función de regulador o “pulmón” del circuito. La dosificación de la arena se realiza por combinación de la apertura de una compuerta plana deslizante y de la velocidad de giro de una cinta extractora (fig.1). Usando la analogía con el caudal de agua, la apertura de la compuerta da el área y la cinta da la velocidad, cuyo producto es el caudal sólido.

En cuanto a la separación de la arena, tras estudiar muchas alternativas, se optó por usar un desarenador de tornillo sinfín. Sus ventajas principales son la gran capacidad de extracción (superior al caudal sólido, establecido en 1 l/s), la eficiencia en la extracción (no se pierde arena) y su posibilidad de trabajar con distintos grados de carga de arena en su interior. No obstante, manejar caudales de agua superiores a unos 30 l/s se hace muy difícil con este sistema, por lo que ha sido preciso realizar una división primaria del flujo entre una fracción de agua limpia (sin arena) y el resto (hasta 30 l/s) de agua y arena, división conseguida por medio de una arqueta provista de un desagüe superficial para la primera fracción y otro profundo para la segunda.

Una vez decidido crear un circuito independiente para el sedimento con un desarenador en el desagüe, el retorno de la arena ha de realizarse necesariamente con medios de transporte mecánico como las cintas transportadoras utilizadas. Todo el sistema se complementa con dos silos de almacenamiento de arena, de 6 metros cúbicos cada uno, y con los conductos, válvulas, elevadores y distribuidores necesarios para enviar la arena del canal a los silos o de los silos al canal de ensayos. Estos elementos permiten llenar y vaciar de arena fácilmente el canal, así como realizar ensayos con cambio del volumen total de arena utilizado.

AJUSTE Y CALIBRACIÓN DE LAS INSTALACIONES

Una vez construidas las instalaciones, los trabajos para su ajuste y calibración tienen como objetivo llegar a realizar ensayos de lecho vivo, con caudales sólidos controlables y fiables. Las principales tareas han sido: 1) puesta en funcionamiento de todos los elementos y determinación de sus límites de trabajo 2) control de la granulometría de la arena a lo largo del sistema y

después de largos periodos de ensayo, para estudiar si puede sufrir trituración en algún elemento (particularmente el sinfín) o transporte selectivo en el canal, 3) control de la uniformidad de la dosificación de la arena por la tolva y 4) control de la humedad de la arena extraída por el desarenador y dosificada por la tolva.

Esta última preocupación está ligada a la calibración de la tolva. El marco de la tolva descansa en cuatro puntos sobre el canal. En estos puntos se encuentran cuatro células de carga conectadas a una caja sumadora para conocer instantáneamente el peso total del aparato incluyendo su contenido. La variación temporal de peso, registrada en un ordenador, da el caudal sólido expresado en peso. De este modo, se han realizado una serie de ensayos de calibración de la tolva consistentes en el vaciado de su contenido con una tabla de distintas velocidades y aperturas de la compuerta deslizante. Las conclusiones de estos ensayos son dos: 1) la tasa en peso de arena es aproximadamente constante a lo largo del vaciado, independientemente del grado de llenado de la propia tolva (sólo hay que exceptuar los últimos quilos de arena con la tolva casi vacía; ver un ejemplo en la fig.2a), es decir la tolva no es semejante a un desagüe hidráulico bajo compuerta y 2) la tasa en peso es proporcional tanto a la velocidad de la cinta como a la apertura de compuerta tal como indica la analogía con el caudal de agua.

La anterior serie de ensayos se realizó con una arena seca, elegida para el estudio. Se trata de una arena silíceo, de cantera y granulometría muy uniforme. Los tamaños característicos son $D_{84}=1.04$ mm, $D_{50}=0.86$ mm, $D_{16}=0.58$ mm así como un diámetro medio $D_m=0.72$ mm. El peso específico del grano es 2.57 t/m³ y el peso específico de un volumen de arena 1.54 t/m³. A continuación se hizo otra serie exhaustiva de ensayos para analizar el efecto de la humedad sobre la dosificación, en condiciones semejantes a las previstas en el futuro. Trabajando en circuito cerrado y deteniendo el funcionamiento de las cintas transportadoras para no aportar nueva arena, se realizaron ensayos de vaciado de la tolva al tiempo que se tomaban muestras de la arena dosificada para determinar su humedad. El descenso de peso en la tolva es más rápido al principio cuando simultáneamente la arena escurre algo de agua pero poco a poco se va haciendo aproximadamente constante (ver un ejemplo en la fig.2b). Lo más importante es que esta tasa “aparente” variable es explicable totalmente por la humedad de las muestras de arena dosificada: al descontar el peso de este agua la tasa en peso (“real”) es constante y proporcional a la velocidad de la cinta y a la apertura de la compuerta, igual que en el caso de la arena seca. Por lo tanto se calibró la tolva del mismo modo cuando la arena es húmeda. Por otra parte al realizar los ensayos en circuito cerrado, recirculando la arena que sale del canal, una vez transcurrido un tiempo suficiente, la humedad de la arena es aproximadamente constante al llegar a la tolva y fácil de conocer.

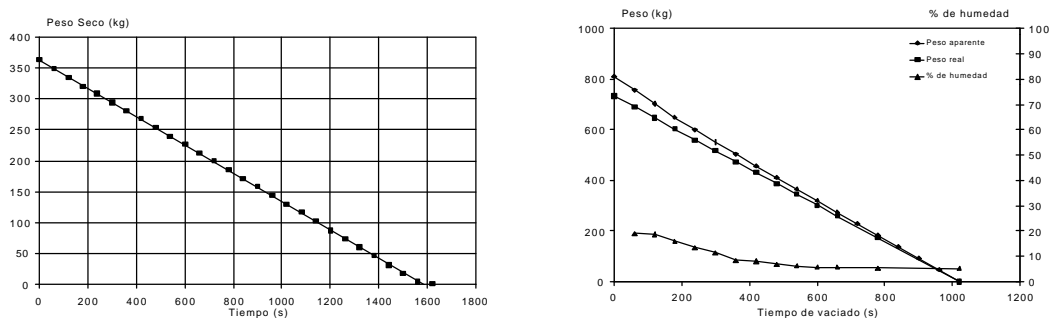


Figura 2. Diagramas peso-tiempo del vaciado del contenido de la tolva. a) (izda.) llena de arena seca, b) (dcha.) llena de arena húmeda..

En cuanto a los otros objetivos del ajuste, el elemento más crítico en el funcionamiento del conjunto es la división primaria de agua y arena, especialmente cuando, como en el caso de interés, el régimen del canal, desembocando en la arqueta, es rápido. El control de la granulometría a lo largo del tiempo y en distintos lugares del sistema da como resultado que a

efectos prácticos la arena no sufre degradación granulométrica y que todos los lugares del sistema tienen sustancialmente el mismo material (con la excepción de la arena que aún no ha circulado, cuya proporción de finos es mayor). La uniformidad transversal de la dosificación se consiguió con una bandeja de reparto. Finalmente la tolva quedó ajustada y calibrada, de manera que para una apertura de la compuerta deslizante, a cada velocidad de la cinta le corresponde una tasa sólida expresada en gramos/segundo de peso seco.

ENSAYOS DE UN CAUCE DE GRAN PENDIENTE EN EQUILIBRIO

Con estos elementos se comenzó la investigación estudiando en primer lugar las condiciones de umbral o principio del movimiento, sin aportación de sedimento. Se extendió un lecho de arena horizontal de un metro de longitud precedido y continuado por dos planchas de 1 m en las que iba adherida la misma arena, a fin de crear la turbulencia propia del lecho de arena aguas arriba del tramo móvil (fig.3). Se controlaba la condición de contorno por medio de un vertedero rectangular de pared delgada al que se le dieron 4 alturas diferentes (entre 5 y 35 cm). Se ensayaron caudales entre 4 y 80 l/s. El observador distinguió dos estados: en el primero se ve alguna partícula en movimiento de cuando en cuando si uno se fija; en el segundo no hace falta fijarse porque el movimiento es generalizado y evidente al observador. Se midió el calado sobre el área móvil y utilizando la relación entre velocidad media y velocidad de corte dada por $v/v_* = (y/d_{50})^{1/6}$ se han dibujado los resultados en el diagrama de Shields (fig.3). Los puntos se agrupan en una recta, en escalas logarítmicas, porque fue uno solo el sedimento utilizado. Vemos que a grandes rasgos podríamos considerar válido el criterio de Shields de principio del movimiento, pero dándole más bien el significado de un movimiento generalizado y evidente del lecho.

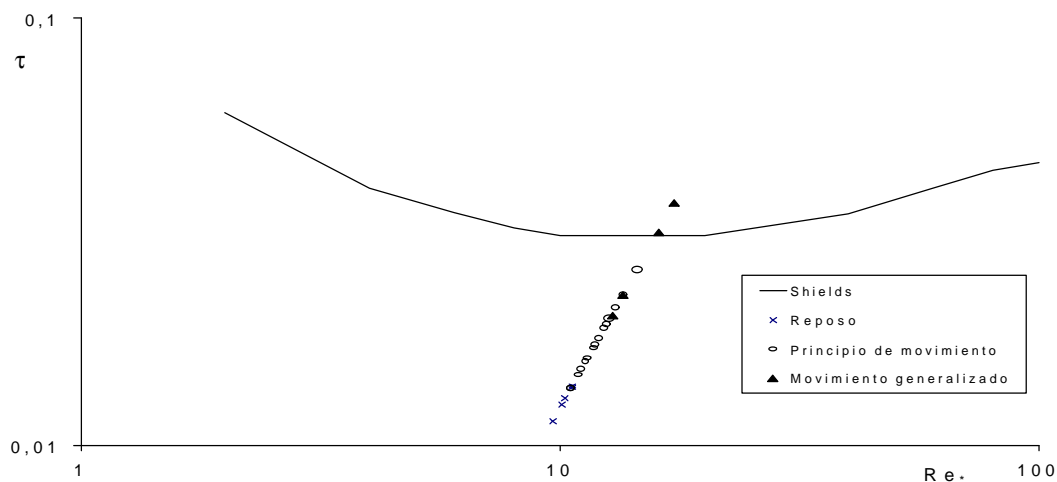


Figura 3. Ensayo de principio del movimiento y representación de los resultados en un diagrama de Shields

A continuación los ensayos en lecho vivo consistieron en la circulación de unos caudales líquido y sólido conocidos durante un tiempo lo bastante largo para alcanzar el equilibrio dinámico. En el extremo de aguas abajo se establece una condición de contorno para el lecho, materializada con una pequeña barrera para la arena, mientras que el agua desagua libremente. Nótese que ya que el objetivo es establecer pendientes elevadas, donde se dé un régimen hidráulico rápido, no hay influencia hidráulica del contorno de aguas abajo sobre el flujo. Aguas arriba, la entrada de la arena desde la tolva dosificadora y la regularización del flujo supone la pérdida de 3 metros de longitud útil del canal.

La tabla de ensayos (tabla 1) se elaboró tratando de explorar todas las posibilidades de experimentación con las instalaciones proyectadas. Se ensayó caudales líquidos entre 10 y 25 l/s y sólidos entre 200 y 330 g/s en un total de 21 ensayos, consiguiéndose pendientes del 1.0 al 3.0 % aproximadamente. A distancias de medio metro y en tiempos de 15 minutos, 30, 45, 1h, 1h 30, 2 h, 2h 30, ...se midió la posición del fondo a través de la pared de vidrio. Cada ensayo parte de una situación de equilibrio precedente, concretamente la correspondiente al mismo caudal sólido y al caudal líquido inmediatamente menor en la tabla (un ensayo es como descender de uno en uno por una columna de la tabla). Los ensayos de 10 l/s partieron de uno de 5 l/s. Los espacios blancos en la tabla corresponden a ensayos abandonados porque se observa la presencia de antidunas de tamaño considerable. En los ensayos señalados con (*) hubo también antidunas pero de pequeña magnitud. Cabe indicar que en esta investigación buscamos analizar fondos planos (sin formas de fondo) representativos de un cauce de gran pendiente en prototipo.

Q [l/s.]	Q _s [g/s.]				
	200	240	270	300	330
10	10.36 - 7 (*)	10.35 - 6	10.13 - 6	9.81 - 2.5	
13	13.00 - 4.5	13.00 - 5.5 (*)	13.06 - 6.5	12.48 - 6	13.10 - 5.5
15	15.01 - 3.5	15.04 - 3.5	15.11 - 2.5 (*)	15.25 - 4	15.05 - 4
20		20.06 - 4	19.74 - 3.5	19.87 - 3.5 (*)	19.97 - 3.5 (*)
25		25.00 - 3		24.73 - 2.5	24.85 - 3

Tabla 1. Ensayos de un cauce de gran pendiente en equilibrio. En la casilla se indica el caudal exacto ensayado (l/s) y la duración del ensayo (h). (*): ver texto

Los tiempos totales necesarios hasta el equilibrio en estos ensayos oscilaron entre 2 h 30 minutos y 7 horas. El criterio de convergencia al equilibrio se basa en el área total de arena a partir de las medidas de cota del fondo y consiste en exigir que este área no cambie más de 200 cm² tras media hora (equivalente a 1 mm de altura del fondo, orden de magnitud del error de medida en un fondo móvil con granos de arena en movimiento) ni más de un 5 % de la variación total desde el principio del ensayo. Media hora después de cumplirse cualquiera de los criterios se toma, como resultado final del ensayo, el fondo cada 25 cm así como la superficie libre.

ENSAYOS DE CONTROL DE LA EROSIÓN MEDIANTE TRAVIESAS

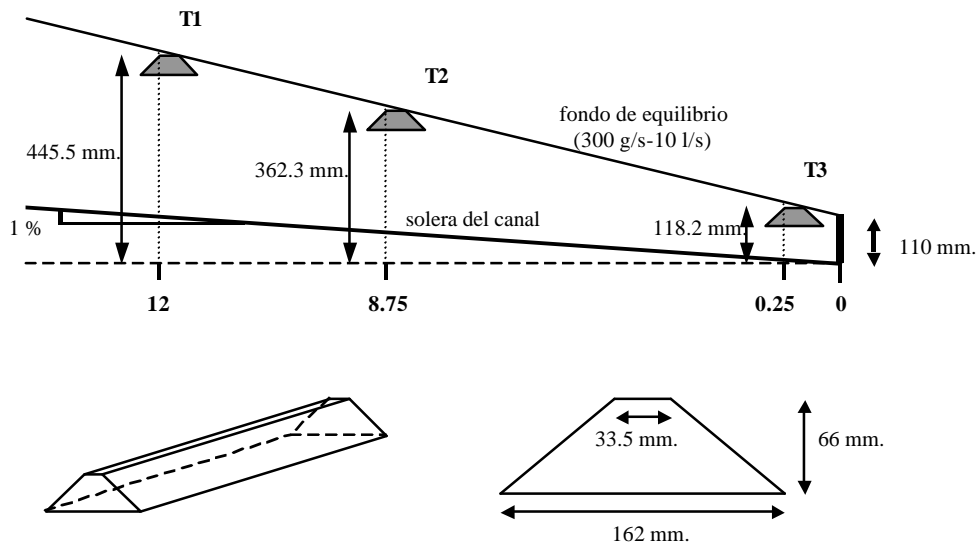


Figura 4. Forma, dimensiones y colocación de los umbrales de fondo o traviesas.

Una vez conocidos los perfiles de equilibrio de distintas combinaciones de caudales líquido y sólido, así como el modo y tiempo de evolución de uno a otro perfil, todos los cuales pasan por el punto que es condición de contorno aguas abajo del canal, se ha estudiado de qué modo actúan los umbrales de fondo o traviesas para controlar la erosión. Estas son pequeñas estructuras transversales duras colocadas a ras del lecho. Se ha dispuesto un sistema de tres traviesas iguales (fig.4): las dos primeras con una separación de 3.25 m y las dos siguientes separadas 8.50 m entre sí. Se ha tomado uno de los ensayos de mayor pendiente (el del 10 l/s y 300 g/s) como ensayo básico o de referencia, sobre cuyo perfil longitudinal de equilibrio se han colocado las tres traviesas.

La tabla de ensayos (tabla 2) desarrolla la idea de estudiar distintas causas de desequilibrio. Con el ensayo de referencia las traviesas quedan a ras de un lecho móvil en equilibrio dinámico. Todos los ensayos comienzan reproduciendo esta situación como condición inicial. A continuación, desde esta situación se pasa a otra de la misma columna, lo que representa un aumento de caudal líquido y por lo tanto un desequilibrio “erosivo”. En las mismas condiciones, en el ensayo sin traviesas se producía un basculamiento del lecho respecto al extremo de aguas abajo y una erosión general del cauce hasta el nuevo perfil de equilibrio de menor pendiente. En segundo lugar, desde la misma situación inicial se pasa a otra de la misma fila, lo que representa una disminución del caudal sólido, es decir también un desequilibrio erosivo y lo mismo se puede decir de pasar de la situación inicial a una en la diagonal, en la que aumenta el caudal líquido y disminuye el sólido. El objetivo de los ensayos es determinar los nuevos perfiles de equilibrio en presencia de las obras de protección.

Q [l/s.]	Q _s [g/s.]					
	240	252	264	276	288	300
10	10.24 - 3.5					BÁSICO
10.75		11.04 - 4			10.76 - 3	10.89 - 3.5
11.45				11.67 - 3.5		11.70 - 2.5
12.2			12.28 - 3.5			11.84 - 3.5
13		13.07 - 3.5				13.10 - 3.5
15						14.95 - 3.5

Tabla 2. Ensayos de control de la erosión mediante traviesas. En la casilla se indica el caudal exacto ensayado (l/s) y la duración del ensayo (h).:

Ahora podrá entenderse mejor la razón de la colocación de las traviesas y el alcance de la tabla de ensayos. Además de la erosión general esperable en estos desequilibrios, en cuanto la traviesa sobresalga del cauce y represente un salto se producirá una erosión local. Entre las dos primeras traviesas la distancia es suficiente para que además de la erosión local (que puede ocupar del orden de 1m de longitud) se desarrolle una erosión general, sólo que presumiblemente de magnitud menor si la traviesa segunda ejerce de punto de basculamiento. Por el contrario la gran distancia entre la segunda y tercera traviesas permitiría el desarrollo de una gran erosión general. Tal fenómeno en este segundo tramo significaría un salto de agua mayor y una mayor erosión local. La tabla de ensayos no ha podido llegar hasta los extremos de caudal líquido y sólido de los ensayos sin traviesas (hasta 25 l/s y 200 g/s respectivamente) precisamente porque esta erosión local llegaba rápidamente a la solera de PVC del canal. Los ensayos con traviesas se han tenido que limitar a un rango menor de variación.

Los instantes de medida, la densidad espacial de las medidas y los criterios de convergencia han sido los mismos que en los ensayos sin traviesas. Los tiempos de equilibrio han oscilado entre 2 h 30 minutos y 4 horas. Las erosiones locales al pie de traviesas, objeto de otras publicaciones (1) han sido también registradas y analizadas, pero no serán tratadas en este artículo.

ANÁLISIS DE LA PENDIENTE DE EQUILIBRIO

Como asuntos de análisis suscitados por los ensayos, destacaríamos la evolución temporal del perfil del fondo (no tratado aquí) y la pendiente del fondo final o de equilibrio. Los perfiles longitudinales en los ensayos de un cauce de gran pendiente en equilibrio son francamente rectos: como ejemplo la fig.5 recoge los perfiles de los ensayos de 300 g/s (los cinco ensayos de la penúltima columna de la tabla 1). No obstante siempre se aprecia una ligerísima convexidad del perfil a la que por el momento no hemos hallado explicación. Las pendientes obtenidas ajustando una recta de error mínimo a lo largo de los 17 m de canal útiles y que pase por el punto de la condición de contorno se recoge en la tabla 3.

Q [l/s.]	Q _s [g/s.]				
	200	240	270	300	330
10	2.05	2.36	2.54	2.97	
13	1.69	1.96	1.97	2.21	2.31
15	1.56	1.81	1.78	1.91	1.94
20		1.42	1.46	1.59	1.67
25		0.97		1.55	1.43

Tabla 3. Pendientes de equilibrio expresadas en % en los ensayos de un cauce de gran pendiente en equilibrio

Es de interés para la investigación de cualquier problema en lecho móvil en el canal de ensayos determinar una ecuación de transporte sólido ajustada a los resultados de ensayo. El conjunto de variables formado por q (caudal líquido), q_s (caudal sólido), i (pendiente), y (calado), todas ellas medidas experimentalmente, sirven para formar una ecuación de transporte sólido. En primer lugar se ha comprobado la validez de la ecuación de Meyer-Peter y Müller (MPM) escrita para lecho plano (sin formas de fondo) en la forma $t = 0.047 + 0.25 f^{0.25}$ donde $t = gR_h i / (g - g)D$ y $f = (q_s^2 / (g(r_s - r)/r D^3))$. En segundo lugar se ha ajustado una fórmula con una estructura semejante pero en la que el valor 0.047 es substituido por el valor correspondiente según el diagrama de Shields y se dejan para ajuste el coeficiente y el exponente del segundo sumando. En la fig.6 se muestra el ajuste entre los datos experimentales (puntos), la ecuación MPM y la ecuación ajustada, que tiene la expresión $t = 0.035 + 0.287 f^{0.425}$. Puede verse cómo la ecuación ajustada con los datos experimentales predice satisfactoriamente la pendiente de equilibrio mientras la ecuación MPM predice menor pendiente que la observada.

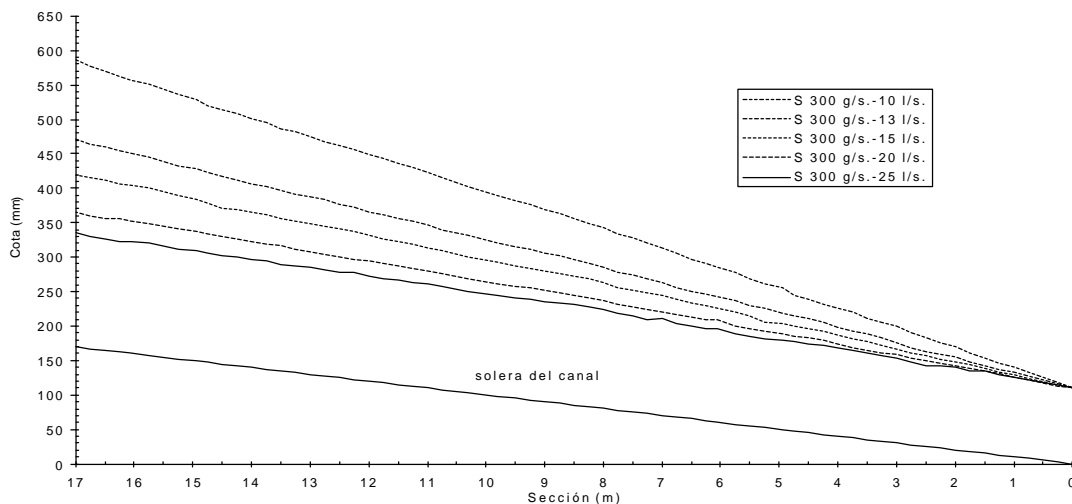


Figura 5. Representación gráfica de los resultados de los ensayos sin traviesas.

Para dar más significado hidráulico a estos ensayos digamos que los calados de agua en el equilibrio final son francamente uniformes, con valores medios entre 21.3 y 41.2 mm. Los números de Froude oscilan alrededor de 1.5. El coeficiente de rugosidad de Manning, a partir de los valores experimentales de caudal, calado y pendiente vale 0.0153, valor próximo al que resultaría con la fórmula de Strickler $n=d_{50}^{1/6}/21=0.0147$.

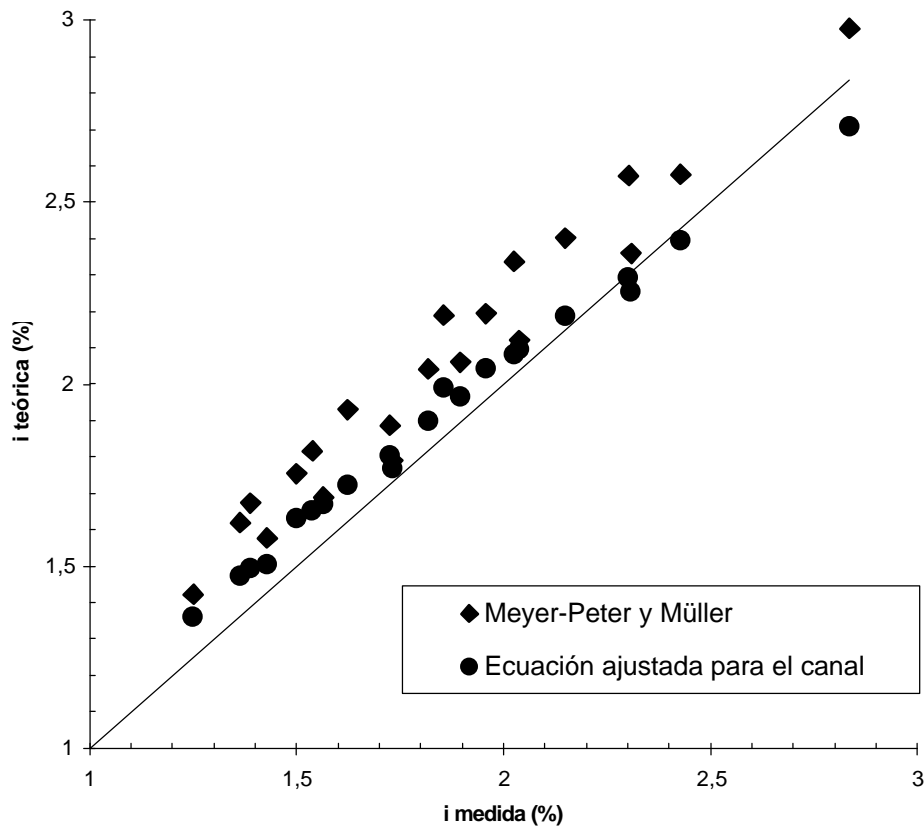


Figura 6. Gráfica de la pendiente observada y de la pendiente teórica. Ajuste con MP-M y la ecuación propuesta.

ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO GENERAL DE LAS TRAVIESAS Y DE LAS NUEVAS PENDIENTES DE EQUILIBRIO

El comportamiento de las traviesas modificando el perfil longitudinal de un río de gran pendiente puede ilustrarse con un ejemplo: en la fig.7. se recoge el resultado final de un ensayo moderadamente erosivo del grupo de ensayos en que se aumenta el caudal líquido (se pasa de 10 l/s, en que el perfil entierra las traviesas, a 12.2 l/s con el perfil de la figura, al cabo de 3 horas y media). Como puede verse cada traviesa ejerce de punto fijo del perfil con efecto determinante hacia aguas arriba. Al pie de cada traviesa la cota de fondo viene determinada por el efecto de la siguiente traviesa aguas abajo. Por ello la traviesa 2 se encuentra mucho más desprotegida que la traviesa 1 (la mayor erosión local a causa del salto mayor en la traviesa 2 agrava el problema y la habría dejado fuera de servicio, pero no a la traviesa 1). El perfil del fondo se escalona y las traviesas, como puntos fijos, son puntos de basculamiento. Esto parece probado por nuestros ensayos, pero debemos señalar que esto sólo es válido en régimen permanente y de dirección media rectilínea.

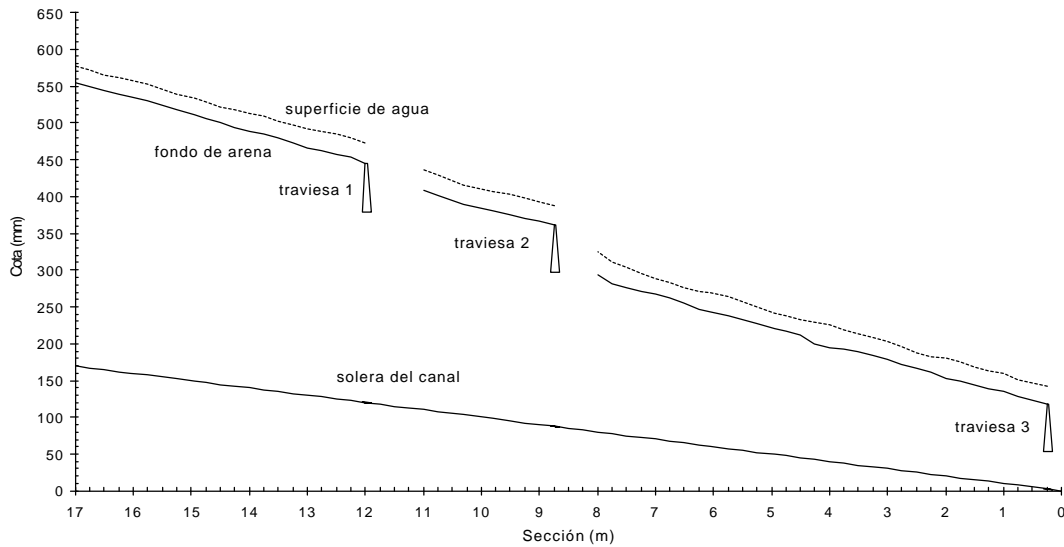


Figura 7. Representación gráfica de los resultados de los ensayos con traviesas.

Observando la figura y el conjunto de los ensayos con más detalle puede verse que las pendientes entre traviesas son distintas de la pendiente inicial y distintas entre sí. En la tabla 4 se recogen las pendientes en los dos tramos en que se divide el perfil longitudinal, determinadas del mismo modo que en los ensayos sin traviesas, pero sin tener en cuenta 1 m de longitud afectada por erosión local al pie de cada una. Puede observarse que la pendiente del tramo superior T1-T2 (1) es siempre menor que la del tramo inferior T2-T3 (2), en un 24 % como media. Por otra parte, las nuevas pendientes son siempre menores que las iniciales (sin traviesas). Esto se puede afirmar gracias a tres ensayos en que la tabla 1 (sin traviesas) y la tabla 2 (con traviesas) se hicieron coincidir. La pendiente en el tramo T1-T2 (1) llega a ser un 32% menor en media que la inicial (4), mientras en el tramo T2-T3 es sólo un 6.5 % menor. Como el perfil inicial era ligeramente convexo, también se compara la pendiente en T1-T2 (1) con la correspondiente en la misma región de los ensayos sin traviesas (3), resultando igualmente una fuerte reducción de pendiente del 25 % en media.

Q [l/s.]	Q _s [g/s.]					
	240	252	264	276	288	300
10	1.76 – 2.23					BÁSICO
	2.18 – 2.36					
10.75		1.43 – 2.14			1.98 – 2.35	1.96 – 2.40
11.45				1.67 – 2.14		1.79 – 2.30
12.2			1.47 – 2.00			1.83 – 2.17
13		1.37 – 1.84				1.44 – 2.03
						2.00 – 2.21
15						1.24 – 1.80
						1.69 – 1.91

Tabla 4. Pendientes de equilibrio expresadas en % en los ensayos con traviesas. Clave de lectura: casillas con dos números: (1)-(2); casillas con 4 números: arriba (1)-(2), abajo (3)-(4).

No hemos hallado todavía una explicación a estos fenómenos. Es muy sugestiva la hipótesis de que existe una relación de proporcionalidad inversa entre la distancia entre traviesas y la pendiente de equilibrio. También podría haber una relación entre la cota de la coronación de la traviesa y la pendiente del tramo en equilibrio aguas arriba de ella. Estas cuestiones pertenecen a los futuros desarrollos de la investigación.

CONCLUSIONES

En este trabajo hemos querido, en primer lugar, dejar constancia de la complejidad de los equipos y del esfuerzo de su calibración cuando se realizan ensayos de lecho vivo de larga duración. Es posible que las enseñanzas de nuestra experiencia sean útiles para otras personas con interés en esta clase de ensayos. Con estos equipos y metodologías se han realizado un total de 32 ensayos de lecho vivo, representativos de cauces de gran pendiente (del 1 al 3%), en régimen rápido.

En segundo lugar, se ha probado que un lecho con puntos duros se escalona al producirse un desequilibrio, ya sea por aumento de caudal líquido, por disminución de caudal sólido o por ambos al mismo tiempo. Esto es cierto en régimen permanente y flujo rectilíneo, siendo el sedimento uniforme. Las nuevas pendientes del lecho, sin embargo, son bastante menores que las iniciales. Con una ecuación de transporte sólido ajustada para el caso de ausencia de puntos duros, las pendientes observadas en presencia de éstos han sido hasta un 32 % más pequeñas. El estudio de la erosión local al pie de las traviesas, de la evolución temporal del perfil y del análisis de las causas de este cambio de pendiente son los futuros desarrollos de la investigación.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha contado con la ayuda de los proyectos HID96-0971, IN95-0590 de la CICYT. Los autores pertenecen a la Red de Hidrología Mediterránea.

BIBLIOGRAFIA

(1) Bateman, A.; Martín Vide, J.P.; Bocquet, S.; Spaliviero, F. "Estudio experimental de la erosión local al pie de una traviesa" XVII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Guayaquil, vol.4, pp.387-394.

(2) Martín Vide, J.P.; Del Agua, J. "Erosión local en traviesas de protección encauces". Ingeniería Civil, CEDEX, n.95, pp.58-64.

(3) Martín Vide, J.P. "Ingeniería Fluvial". Ediciones UPC, Barcelona 1997.