

Erosión local en traviesas de protección en cauces

MARTÍN VIDE, J.P. (*)
DEL AGUA RAZQUÍN, J. (*)

RESUMEN El artículo presenta los resultados de un estudio experimental sobre la erosión local en el pie de obras transversales de pequeña altura (umbrales de fondo o traviesas), empleadas para controlar el perfil longitudinal de un cauce o para proteger de la erosión la cimentación de obras verticales (pilas de puente, etc.). En el régimen estudiado la traviesa no se encuentra sumergida ni existe caída libre del agua al cauce, sino que por efecto del nivel aguas abajo se forma un resalto débil u ondulado. El material erosionable es una arena muy uniforme. Se analizan los resultados cuantitativos mostrando que la magnitud de la erosión decrece al aumentar el caudal, pues el foso de erosión se desarrolla aumentando en longitud. También se muestra que la erosión transitoria inicial y final de un ensayo puede ser más importante que la erosión permanente. Con los resultados cuantitativos se elabora un diagrama adimensional útil para el proyecto de estas estructuras en condiciones hidráulicas semejantes a las ensayadas (caudal y condición de contorno aguas abajo). La comparación con algunas fórmulas (Schoklitsch y Mason) utilizadas en la práctica para el cálculo de la erosión local en traviesas ofrece grandes discrepancias. Asimismo, se hace una descripción cualitativa del proceso de erosión.

LOCAL SCOUR IN SILLS

ABSTRACT This article presents the results of an experimental study on local scour at the base of transverse training works of small height (sills) used to control the longitudinal bed profile, or to protect foundations of vertical works (bridge piers, etc.) from scour. In the case studied, the sill is not submerged, nor is there a free overfall to the river bed. On the contrary, a weak or undular jump is formed due to the effect of the tailwater level downstream. The erodible material is very uniform sand. The results are analysed quantitatively, showing the scour depth decreasing as the discharge increases, since the scour hole increases in length. This article also shows that the transient scour at the start and completion of the test can be more substantial than the steady scour. Using the quantitative results, a dimensionless diagram is drawn up for the design of these structures in hydraulic conditions similar to those tested (discharge and downstream boundary condition). Comparison with some formulae (Schoklitsch and Mason) used in practice to calculate local scour in sills, reveals considerable discrepancies. The erosion process is also described qualitatively.

Palabras clave: Traviesa; Erosión local.

1. INTRODUCCIÓN

Uno de los problemas a los que se enfrentan las obras de ingeniería fluvial, así como las construidas o cimentadas en las cercanías de los ríos, es el hecho de que el fondo del río está constituido la mayoría de las veces por material que puede sufrir erosión, especialmente en el transcurso de una crecida. Este fenómeno puede ser enteramente natural y determinado por la mecánica del transporte de sedimentos: así durante la fase de crecimiento de la avenida el fondo generalmente desciende por erosión, para después ascender por sedimentación en la fase de decrecimiento de la avenida. De modo también natural, o bien condicionado por intervenciones humanas en el río (encauzamiento, extracción de áridos, ...), puede ocurrir una erosión a largo plazo, producto probablemente de las erosiones remanentes en los sucesos impor-

tales que son las avenidas. Unas y otras erosiones pueden causar inconvenientes a diversas obras en los ríos.

Es una idea común en la ingeniería fluvial que el fondo de un río puede estabilizarse mediante la construcción de obras transversales, de orilla a orilla, de muy pequeña altura o incluso sin sobresalir del fondo, conocidas como traviesas, rastrillos, riostras o umbrales de fondo. Se encuentran por ejemplo aguas abajo de puentes, en el extremo final de encauzamientos, revestimientos y defensas, etc., admitiéndose que su papel es impedir que la erosión progrese por debajo de la cota de la traviesa. En líneas generales, la traviesa puede efectivamente actuar como un punto fijo del perfil del río, que controle las cotas de fondo aguas arriba y su evolución, por lo que respecta a la erosión a largo plazo. No es tan claro de qué modo actúa la traviesa ante las erosiones transitorias durante una avenida.

La integridad de la traviesa en el río se ve amenazada, a su vez, por varios efectos erosivos. Uno es el efecto de la erosión a largo plazo aguas abajo de ella, que cause un descenso del fondo (quizá este descenso ocurra limitadamente, bajo el control de otra traviesa a cierta distancia aguas

(*) Departamento de Ingeniería Hidráulica, Marítima y Ambiental Escuela I.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Barcelona.

abajo, como acostumbra a proyectarse en medidas de estabilización generales del fondo). Otro es la erosión transitoria aguas abajo durante una avenida. Estos dos efectos, llamados de erosión general, son de difícil evaluación en un cauce real. El tercer efecto es la erosión local que ocurre al pie de la traviesa, como resultado del flujo particular del agua que atraviesa o cae por encima de la estructura. La erosión local puede producir fosos de erosión de considerable magnitud, en profundidad y extensión, situados precisamente en el terreno de cimentación de la obra.

Este artículo presenta los resultados de una investigación experimental sobre la erosión local en traviesas monolíticas (normalmente de hormigón) de pequeña o mediana altura, como las que podrían encontrarse protegiendo puentes o encauzamientos en ríos de pendiente suave. La profundidad de erosión local debe sumarse a la erosión general que pueda producirse en el río. Los resultados cuantitativos pueden aplicarse al problema de elegir la cota de cimentación de las traviesas, es decir su dimensión vertical en el cauce.

2. RÉGIMEN HIDRÁULICO

El tipo de obra a que nos referimos y los distintos regímenes hidráulicos en que puede trabajar se representan en la figura 1. El primer régimen corresponde a una caída libre del agua tras pasar sobre la traviesa, con separación y aireación de la lámina y con régimen semejante al de un chorro llegando a un cuenco. El segundo es el caso en que el agua pasa sin sufrir caída libre y se forma un resalto cuya naturaleza es débil porque es pequeño el desnivel de caída. El tercero es sólo ligeramente distinto, pues se forma un resalto ondulado, aún más débil que el anterior. Estos tres regímenes tienen en común que las condiciones de paso sobre la traviesa son independientes de las condiciones aguas abajo de la estructura: el régimen de la corriente es lento aguas arriba y se acelera hasta el régimen crítico sobre ella. En el cuarto y último régimen, la corriente pasa por encima de la traviesa sin que pueda hablarse de caída alguna:

puede decirse que la estructura está sumergida y que las condiciones de paso sobre ella dependen de las condiciones hidráulicas aguas abajo, si el régimen de la corriente es lento. La estructura también puede estar sumergida en una corriente en régimen rápido: por eso el flujo y la erosión local de este cuarto caso dependen del número de Froude de la corriente. Sin embargo, en los tres primeros casos no dependen del mismo porque sobre la estructura coinciden en tener número de Froude igual a uno (régimen crítico).

Los cuatro regímenes pueden presentarse en una misma traviesa sucesivamente, por ejemplo si el caudal de agua crece gradualmente en un cauce. El río sube de nivel hasta sumergir la estructura. También puede imaginarse la sucesión de los cuatro casos, en orden inverso, con un mismo caudal si la traviesa es recrecida gradualmente.

La investigación se ha centrado en los regímenes primero a tercero, estudiando la erosión local correspondiente. Como las traviesas de nuestro interés son de muy baja altura, estos regímenes ocurren solamente con caudales no muy elevados, es decir en lo que podríamos llamar aguas bajas del río, mientras que las condiciones de avenida corresponderían frecuentemente al régimen cuarto. La erosión local depende obviamente del tipo de régimen hidráulico y también del transporte sólido. A este respecto es distinta la erosión si la corriente no transporta sedimentos que en caso contrario. La investigación se ha centrado en el primer caso, llamado también régimen de aguas claras, que no es extraño cuando el río se encuentra en aguas bajas.

3. DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO EXPERIMENTAL

El trabajo experimental se ha realizado aprovechando la instalación de un modelo reducido fluvial. Se ha construido la traviesa, de 3,76 cm de altura, al borde de una zanja rellena de material erosionable (figura 2) y se ha ensayado con caudales comprendidos entre 14 y 95 l/s. Aunque la instalación no es exactamente bidimensional como da a entender la figura 2, la anchura disponible (superior a 2 m) y las caracte-

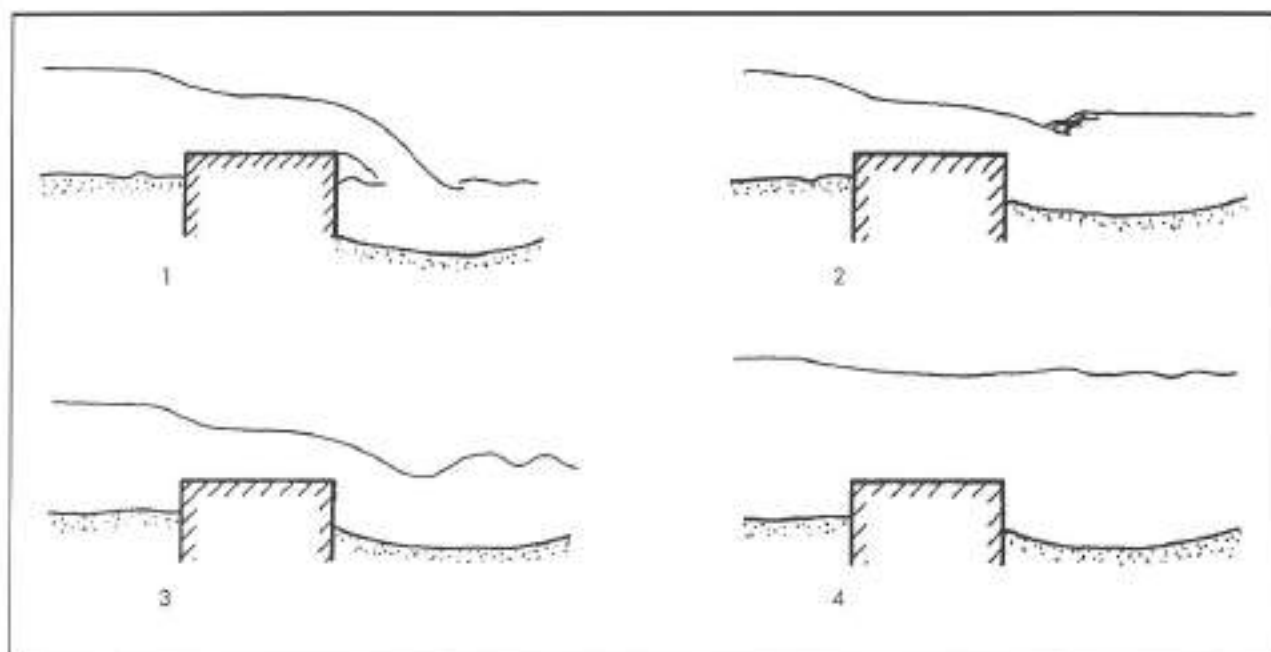


FIGURA 1. Esquema de los tipos de régimen hidráulico sobre una traviesa

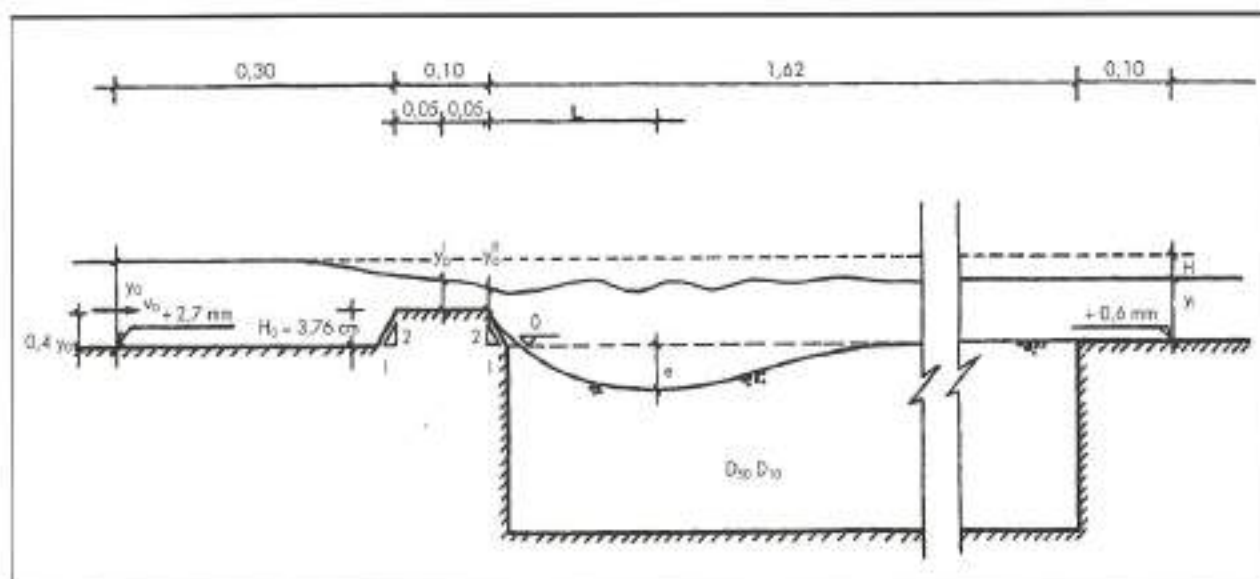


FIGURA 2. Características geométricas, puntos de medida y variables medidas en los experimentos.

terísticas del flujo observadas permiten sintetizar el ensayo mediante el esquema bidimensional de la figura. Aguas abajo, se tiene un dispositivo de control del nivel de agua en el que se ha mantenido un desagüe libre. Con los caudales elegidos y esta condición de contorno aguas abajo, el régimen hidráulico permanente ensayado ha sido del tipo segundo y tercero. La arena empleada en el ensayo, que llena la zanja erosionable a ras de cauce, tiene diámetro característico $D_{25} = 0,81 \text{ mm}$, densidad relativa 2,63 y composición granulométrica bastante uniforme, con una desviación típica granulométrica, $\sigma = \sqrt{D_{64} / D_{25}} = 1,55$.

Se ha elegido una arena uniforme para no contar en los ensayos con ningún efecto apreciable de acorazamiento. El acorazamiento ocurre cuando las partículas finas y medias son arrastradas, pero no así las gruesas, que permanecen y protegen de la erosión las capas inferiores del lecho, a modo de coraza. Puede actuar por ejemplo en la socavación de pilas de puente. El acorazamiento impide que se alcancen las profundidades de erosión potenciales en un lecho de material uniforme. Como el sentido de la investigación es determinar máximas erosiones posibles para el proyecto de traviesas, se elige una arena que no desarrolle acorazamiento.

Los caudales de ensayo no superan la condición de inicio del movimiento del fondo erosionable. Esto significa que en ausencia de la traviesa o lejos de los efectos particulares del flujo que ella crea, no existe movimiento del fondo o erosión general. Esto se ha comprobado visualmente durante los ensayos y verificado mediante criterios analíticos (criterio de Shields, tabla 1). Gracias a esta precaución, toda la erosión que ocurre en el ensayo es exclusivamente local y, por otra parte, tiene más sentido el ensayo con agua clara. La condición de inicio del movimiento se ha tenido en cuenta al elegir el tamaño de la arena y las condiciones de ensayo (caudal y nivel aguas abajo).

Todas las medidas planeadas se representan en la figura 2. Se miden velocidad y calado de aguas arriba (cuyo producto da el caudal unitario, variable de ensayo), calado aguas abajo y sobre la traviesa y posición (L) y magnitud (e) de la máxima erosión. Esto último se hace varias veces durante el ensayo y al final, para conocer la evolución tempe-

ral de la erosión. El ensayo en régimen permanente dura 2 horas, tiempo suficiente para alcanzarse un equilibrio en las características del foso de erosión.

A la hora de analizar los resultados y proponer conclusiones prácticas se emplea la semejanza de Froude. Se estima que en la experimentación no hay efectos de escala importantes: el número de Reynolds mínimo en el régimen aguas arriba es 8.000 y el número de Reynolds granular mínimo en la zona erosionable es 105.

4. DESCRIPCIÓN CUALITATIVA DEL PROCESO DE EROSIÓN LOCAL

La experimentación ha dado la ocasión de observar detalladamente el proceso de erosión local en traviesas. La figura 3 es una serie cronológica de dibujos de los distintos estados del proceso. Con leves diferencias la descripción es válida para todos los ensayos realizados. El ensayo empieza con la arena enrasada (1). El caudal del modelo se hace crecer lentamente, hasta el caudal permanente de ensayo. Cuando empieza a verter por la traviesa, la lámina desliza por la cara de la estructura y produce una fosa bastante profunda (2). A medida que el caudal aumenta, la lámina de vertido, más gruesa, se va orientando hacia la dirección horizontal y la fosa de erosión se desplaza hacia aguas abajo (3). La transición de forma de la fosa a medida que crece el caudal es gradual, aumentando la longitud y disminuyendo la profundidad (4). El régimen hidráulico en estas fases transitorias es el segundo, resalto débil (3). El chorro que ingresa al foso, orientado hacia el fondo, da lugar a dos corrientes principales de circulación en sentido opuesto (3). Ambas arrastran granos de arena en su circulación. La de sentido antihorario impulsa a cierta parte de los granos fuera de la fosa, formando la barra. La acción de este mecanismo va moldeando la fosa (4) y a su vez la evolución del fondo va transformando las características del flujo.

Al término de la fase transitoria, alcanzado el caudal de ensayo, el chorro llega a un punto en que es lo bastante horizontal y la fosa lo bastante suave para producir un cambio repentino de régimen hidráulico, de resalto débil a resalto ondulado (5). En el régimen tercero la evolución de la fosa es

n°	q ₀ (m³/s)	h ₀ (m)	q (l/s/m)	y ₁ (m)	y ₂ (m)	y ₃ (m)	τ (-)	e ⁰ (cm)	L ⁰ (m)	e ¹ (cm)	L ¹ (m)	e ² (cm)	L ² (m)	e ³ (cm)	L ³ (m)	q ⁰ (l/s/m)	q ¹ (l/s/m)	q ² (l/s/m)	q ³ (l/s/m)	e ⁰ /H ^{0.5} (cm/m ^{0.5})	q ⁰ /q _{cr} (-)
1	0,132	5,90	7,6	2,02	1,39	0,61	0,0055	7,18	0,09	7,18	0,10	6,82	0,09	8,18	0,06	1,06	0,480	2,13	0,54	61	2,97
2	0,151	6,03	9,1	2,54	1,70	0,91	0,0070	6,84	—	6,84	0,11	6,37	0,10	7,79	0,06	0,98	0,541	2,05	0,68	63	3,29
3	0,169	6,41	10,8	2,84	1,57	0,79	0,0086	6,57	0,12	6,03	0,10	6,54	0,11	7,86	0,055	1,01	0,607	2,08	0,76	72	4,02
4	0,180	6,08	12,0	3,12	—	—	0,0097	7,35	0,13	7,91	0,12	5,28	0,12	7,82	0,065	1,00	0,651	2,08	0,83	63	4,42
5	0,190	6,09	13,1	3,37	—	—	0,0107	5,40	0,14	5,37	0,13	4,76	0,24	7,82	0,06	1,02	0,690	2,11	0,87	114	4,92
6	0,203	7,23	14,8	3,47	2,64	1,71	0,0122	5,98	0,14	6,31	0,13	5,17	0,29	8,39	0,06	1,06	0,749	2,21	0,92	130	5,78
7	0,219	7,50	16,5	3,56	—	—	0,0138	3,71	0,14	4,99	0,22	5,87	0,38	8,26	0,05	1,10	0,805	2,28	0,95	223	6,69
8	0,240	8,05	19,4	3,98	2,73	1,69	0,0162	2,94	0,30	3,99	0,39	4,73	0,45	7,92	0,06	1,14	0,997	2,31	1,06	213	8,15
9	0,271	8,66	23,5	4,54	3,67	2,59	0,0201	3,32	0,41	3,77	0,48	4,84	0,50	7,56	0,05	1,15	1,02	2,01	1,21	347	9,96
10	0,278	8,75	24,5	4,92	3,36	2,58	0,0211	3,87	0,42	3,72	0,47	4,42	0,48	8,16	0,045	1,07	1,04	2,17	1,31	212	9,58
11	0,285	9,23	26,2	5,44	3,89	2,98	0,0215	3,13	0,40	3,29	0,47	—	—	—	—	1,06	1,10	—	1,45	—	10,2
12	0,303	9,62	29,2	5,62	4,35	3,37	0,0243	2,92	0,43	4,39	0,52	4,57	0,61	8,25	0,05	1,12	1,18	2,18	1,49	279	12,1
13	0,330	9,83	32,9	6,37	4,75	3,65	0,0295	2,62	0,42	3,35	0,49	3,89	0,60	7,97	0,045	0,98	1,28	2,12	1,69	233	11,9
14	0,349	10,01	34,9	7,18	4,67	3,79	0,0318	—	—	4,47	0,61	4,85	0,64	—	—	0,81	1,33	—	1,91	310	10,4

TABLA 1. Resultados de los ensayos. Los símbolos están definidos en la figura 2 o en el texto: τ: parámetro de Shields $\frac{\tau}{\rho g \frac{y_1 - y_2}{D_{50}}}$, cuyo valor

característico de principio de movimiento es 0,056. La velocidad de corte se obtiene como $\frac{\tau_0}{\rho} = \tau_{0,cr} \left(\frac{y_2}{D_{50}} \right)^{\frac{1}{4}} - \gamma_c$; colada crítica $\frac{q}{\tau}$; H: Diferencia de niveles de la superficie libre $H = y_0 - y_1 + 2,1$ mm (fig. 2).

lenta y consiste en que se alarga, se hace menos profunda y la barra va rebajándose (6). Al mismo tiempo aparece un frente de arena que rellena el fondo remontando hasta el vértice de la traviesa (6). El flujo que da lugar a esta evolución presenta una corriente superficial separada netamente de un remolino inferior. En el fondo de arena se distingue un punto de parada, frontera entre trayectorias distintas del grano: circulando hacia dentro o siendo transportado hacia fuera (7).

Este estado de lenta evolución no desemboca en un equilibrio, sino que se trunca bruscamente. Las ondas del resalto ondulado se rompen y se forma un resalto débil (régimen segundo). El resalto débil dura poco (de 2 a 10 s) y es seguido nuevamente por un resalto ondulado que dura más (de 10 s a 5 minutos). La alternancia entre el régimen tercero y segundo es periódica. Este es un curioso fenómeno de interacción entre el flujo y el fondo con la particularidad de que cada flujo trabaja para moldear una fosa en la que el mismo se hace inestable. La inestabilidad es un cambio de naturaleza del resalto (y de la forma de la superficie libre) pero también un cambio súbito en la orientación del chorro que ingresa a la fosa, superficial en el régimen tercero y profundo en el segundo. Cada vez que se forma el resalto débil se agita la arena, se profundiza un poco la fosa y parte de la arena se desplaza aguas abajo en el foso (8). Esta acción enérgica es seguida por la lenta actuación del régimen tercero, cuyo remolino inferior devuelve hacia la estructura parte de la arena, mientras la depositada a la derecha del punto de parada es arrastrada fuera (9). Esta alternancia de formas de fondo llega a largo plazo a dar un transporte mínimo de arena fuera de la fosa.

Al finalizar el ensayo, el caudal se hace decrecer lentamente. La fase transitoria es semejante a la de aumento del caudal, con un resalto débil pero sin arrastre neto de arena fuera del foso, sino tan sólo un cambio de forma (10). Se profundiza mucho la fosa junto a la estructura y se vuelve a formar una barra.

5. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS

Los resultados de los ensayos se recogen en la tabla 1. El significado de las variables y los puntos exactos de medida se encuentran en la figura 2. La diferencia principal entre los 14 ensayos es el caudal unitario de ensayo. Lo más destacado de los resultados son los siguientes hechos:

- 1) la erosión final (e_f) al término de la fase transitoria, del orden de 8 cm, es mayor que cualquier erosión en régimen permanente. Esto estaba claro en la descripción cualitativa del proceso;
- 2) la profundidad de la erosión (e) en régimen permanente es menor cuanto mayor es el caudal, mientras la distancia a la estructura del punto de máxima erosión (L) es mayor cuanto mayor es el caudal. Ambas magnitudes crecen con el tiempo.

Para facilitar la síntesis de los resultados y su análisis y discusión presentamos una representación gráfica (fig. 4) del resultado principal: la erosión (e) en función del caudal unitario (q). Estas variables se hacen adimensionales tras un análisis del fenómeno físico general, del ensayo particular realizado y de la relevancia y conveniencia de distintos números adimensionales. El hecho de estudiar los regímenes

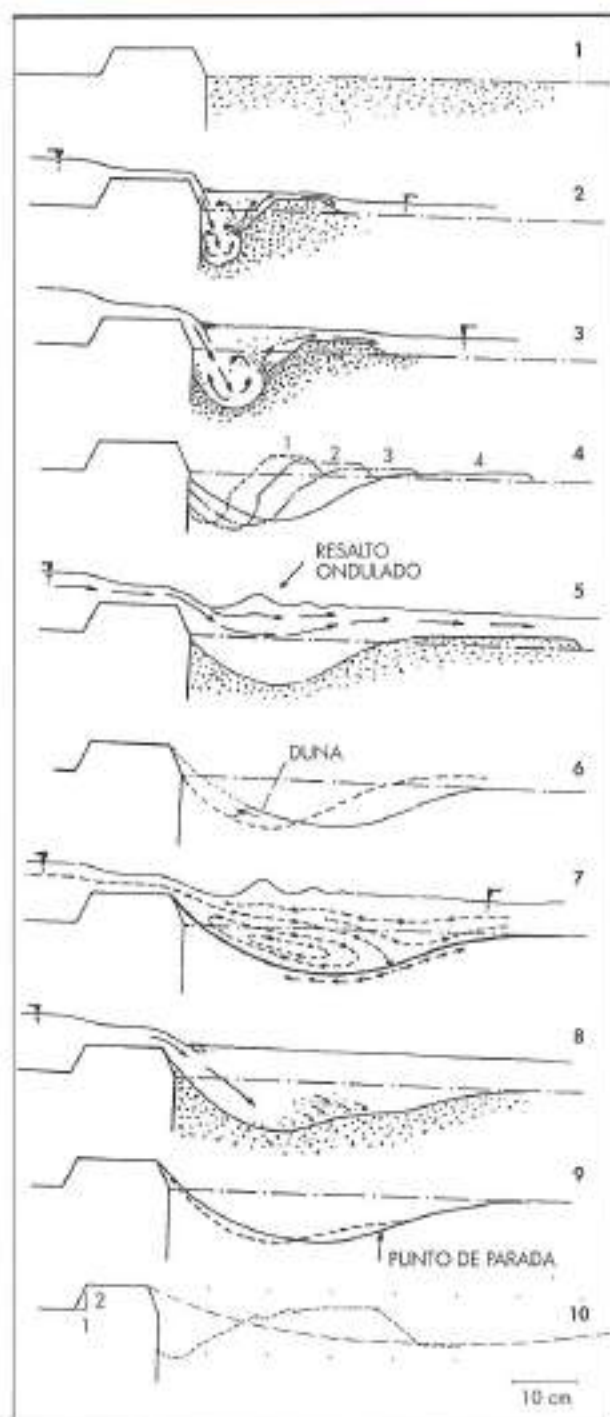


FIGURA 3. Dibujos de las fases del proceso de erosión local.

nes segundo y tercero autoriza a sintetizar el régimen hidráulico y el flujo de llegada mediante las condiciones sobre la estructura. Así se emplea el número adimensional

$\frac{q^{2/3}}{g^{1/3}H_0}$, para la variable caudal unitario, cuyo significado es el cociente del calado crítico teórico $y = \frac{1}{3} \frac{q^2}{g}$ y la altura de la estructura H_0 . La erosión e se divide por la misma altura H_0 .

Un factor importante en la erosión local es la altura de agua aguas abajo, que da lugar a un colchón de agua al pie de la traviesa y determina por ello el flujo de salida. En nuestro caso esta magnitud no se ha variado independientemente de la otra (el caudal). Como magnitud representativa se ha medido la diferencia de niveles H entre aguas arriba y aguas abajo y se evalúa el número adimensional H/H_0 . En la tabla 1 se observa que este número permanece prácticamente constante en los ensayos. De hecho éstos han explorado el mismo tipo de regímenes hidráulicos (segundo y tercero) para los que H/H_0 lógicamente no debe variar.

La erosión local en traviesas es función de otras variables, principalmente la geometría de la estructura y las características del sedimento, que no han sido variadas en los ensayos, así como de variables del transporte sólido que tampoco son relevantes toda vez que el ensayo ha sido de agua clara. Así pues el gráfico adimensional en la figura 4 (y los resultados de los ensayos, tabla 1) es completo para el análisis. En él se incluye también el tiempo, además de la erosión y el caudal.

Las curvas de trazo continuo representadas en la figura 4

son las relaciones potenciales $\frac{e}{H_0} = \alpha \left(\frac{q^{2/3}}{g^{1/3}H_0} \right)^b$ que mejor se ajustan a los datos experimentales. El coeficiente α y el exponente b valen $\alpha = 0,92$, $b = -1,15$ en el minuto 30; $\alpha = 1,12$, $b = -0,73$ en el minuto 60 y $\alpha = 1,27$, $b = -0,42$ en el minuto 120. La recta de mejor ajuste de los datos de erosión, una vez finalizado el ensayo, es $\frac{e}{H_0} = 2,09 + 0,043 \left(\frac{q^{2/3}}{g^{1/3}H_0} \right)$.

6. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Desde un punto de vista práctico, la conclusión principal es que una cota máxima de la erosión registrada al pie de la estructura, independientemente del caudal, puede cifrarse en 2,4 veces la altura de la traviesa sobre el cauce original, H_0 . Esta cifra puede emplearse en el dimensionamiento de una traviesa (en su profundidad de cimentación) de características semejantes a la estudiada bajo régimen semejante. No obstante, el régimen que ha dado lugar a esta máxima erosión no ha sido investigado sistemáticamente, sino que se ha presentado por necesidad del proceso de ensayo, en sus fases transitorias. Por ello, preferimos destacar las conclusiones cualitativas de este hecho, que son dos: 1) hay que prestar atención a los caudales pequeños por lo que se refiere a la erosión local y 2) la erosión es más aguda cuando el régimen se acerca al primero descrito en el apartado 2: en efecto, aunque sin separación del paramento y sin aireación de la lámina, el régimen responsable de la máxima erosión es semejante al de caída libre, especialmente por la orientación del chorro. Esta consideración 2) lleva a la 1), porque son precisamente los pequeños caudales los que dan lugar al primer régimen.

Otra observación relacionada es prestar atención al régimen que se puede esperar sobre la estructura. Según sea este régimen, el proceso de erosión será cualitativamente diferente y también la magnitud de la erosión. Lo que se ha investigado es el segundo y tercer régimen, los cuales a la postre parecen menos desfavorables que el primero (no investigado sistemáticamente), pese a circular un mayor caudal. Si se analiza la tabla 1 se observa hasta qué punto se ha respetado el régimen de ensayo: a) la caída de la superficie libre de un lado a otro de la estructura es aproximadamente constante (columna H/H_0) y relativamente pe-

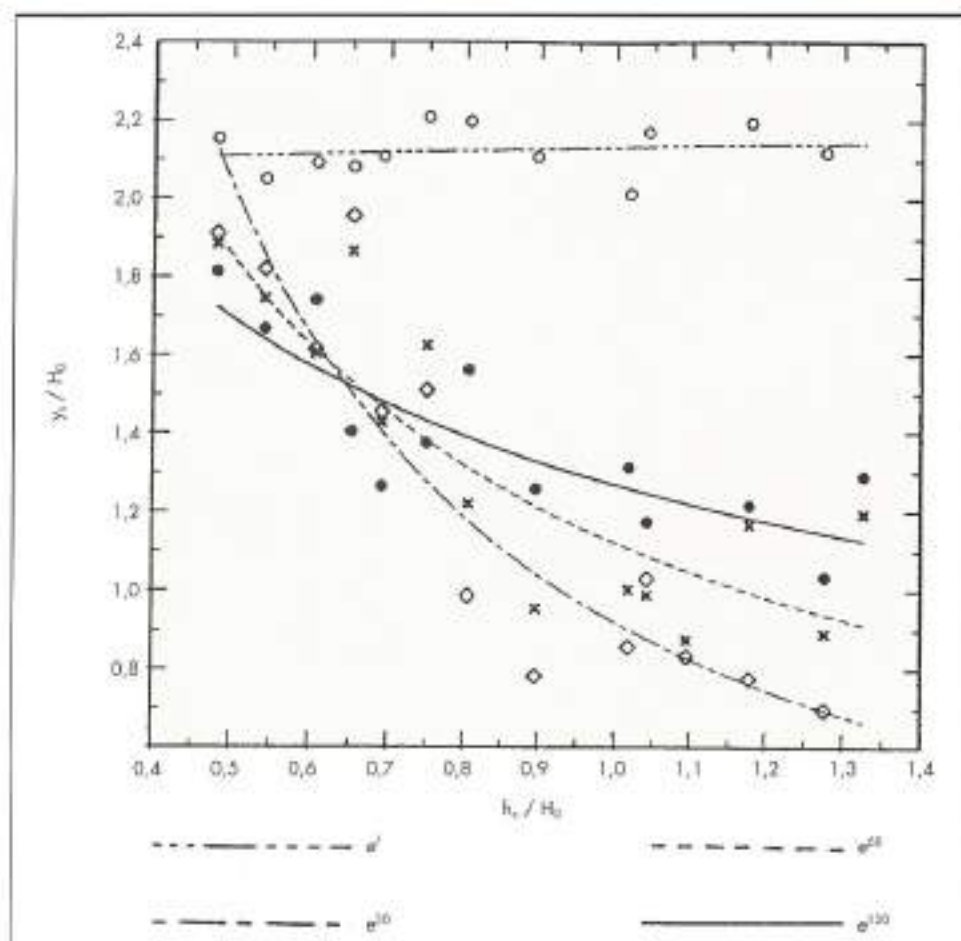


FIGURA 4. Representación adimensional de los resultados de erosión local frente a caudal unitario.

queña, b) el calado sobre la estructura y_0^* es próximo (ligeramente inferior) al calado crítico teórico, de valor $q^{2/3}/g^{1/3}$. Entre las columnas del caudal q y el calado y_0^* se tiene la correlación $y_0^* = 0.87q^{0.79}$, c) el calado aguas abajo de la estructura y_1 crece según una condición de desagüe libre, muy semejante a la anterior pues la correlación entre las columnas correspondientes es $y_1 = 0.79q^{0.74}$. Así pues en la serie progresiva de 14 ensayos aumenta el caudal y aumentan los calados aguas arriba, sobre la estructura y aguas abajo, pero de tal modo que el régimen, el perfil de la superficie libre y la caída de ésta no se modifican sustancialmente.

En estas condiciones se da la circunstancia sorprendente de que a mayor caudal menor es la erosión e . Se observa en los ensayos que a menor caudal más horizontal es la orientación del chorro al pasar la estructura. También se puede argumentar que a mayor caudal mayor es el calado y_1 aguas abajo, es decir mayor es el colchón de agua que recibe el chorro, con lo cual en concordancia con otras investigaciones [1][2], menor es la erosión. Como se ha indicado, el parámetro y_1/H_0 no se ha variado independientemente. Con todo, el resultado es menos sorprendente si se observa que, si bien la erosión disminuye, el producto eL de la profundidad de erosión por la semilongitud de la fosa (o sea aproximadamente el área del foso de erosión) aumenta al aumentar el caudal, o bien al aumentar el producto $\gamma q H$ ($\gamma = 9.800 \text{ N/m}^3$) del caudal por la caída, el cual es una medida de la potencia disipada por el flujo.

7. COMPARACIÓN CON ALGUNAS FÓRMULAS EMPÍRICAS

La erosión local al pie de travessas de protección cuenta con fórmulas empíricas de cálculo. Los autores [5] han hecho una recopilación de 24 fórmulas de cálculo de la erosión en estructuras transversales, entre las que predominan las aplicables a un régimen con caída libre del agua y son en cambio muy escasas las adecuadas a obras de poca altura. El punto principal es advertir que cada fórmula es aplicable sólo al caso para el que ha sido obtenida y esto comprende las características geométricas, formas y dimensiones de la estructura, así como las características del régimen hidráulico, pues en una misma estructura, como se ha visto, pueden presentarse flujos muy distintos. Aplicar una fórmula a condiciones diferentes puede dar resultados disparatados. Entre las fórmulas hay poca coincidencia en los factores y variables influyentes y escaso reconocimiento de la influencia de la curva granulométrica del lecho.

Las fórmulas más utilizadas para el caso analizado en la experimentación son:

- fórmula de Schoklitsch (1932) [3]. Con la notación y significado de variables de la figura 2 se escribe

$$e + y_2(m) = 4,75 \frac{H^{0,2}(m)q^{0,5}(m^2/s)}{D_{90}^{0,32}(mm)}$$

D_{90} es el tamaño granulométrico por debajo del cual se encuentra el 90% en peso del material del fondo.

Nº	e (cm) Schoklitsch	e (cm) Mason	e ¹²⁰ (cm) experimental
1	18,7	6,50	6,82
2	19,8	7,25	6,27
3	21,6	8,21	6,54
4	22,6	8,81	5,28
5	23,7	9,40	4,76
6	25,5	10,3	5,17
7	27,2	11,2	5,87
8	29,6	12,6	4,73
9	32,5	14,5	4,94
10	32,2	14,6	4,42
11	33,0	15,3	—
12	35,5	16,7	4,57
13	36,1	17,9	3,89
14	34,9	18,2	4,85

TABLA 2. Comparación entre los resultados experimentales y las fórmulas de Schoklitsch y Mason.

Es dimensionalmente no homogénea (por eso es necesario indicar las unidades). No es consistente con la semejanza de Froude, es decir aplicada a un prototipo λ veces mayor (λH , λD_{50} , $\lambda^{1/3} q$) no da una erosión λ veces mayor y finalmente existe una seria discrepancia en el significado de H según los autores. Para nosotros H será la diferencia de cotas entre las superficies libres (fig. 2).

— fórmula de Mason (1985) [24] que se escribe

$$e + y_1 (m) = 3,27 \frac{H^{0,66} (m) y_1^{0,15} (m) q^{1,6} (m^2/s)}{g^{0,30} (m/s^2) D_n^{0,39} (m)}$$

donde aparece el diámetro medio D_n y la aceleración de la gravedad $g = 9,81 m/s^2$.

Fue obtenida mediante análisis estadístico de diversos experimentos en modelo reducido. Es dimensionalmente homogénea y consistente con la semejanza de Froude. La principal novedad respecto a la fórmula de Schoklitsch es la presencia del colchón de agua o calado aguas abajo y_1 como variable independiente en el segundo miembro.

En la tabla 2 se comparan los resultados de estas fórmulas (entrando con los valores experimentales de las variables H , y_1 , q de la tabla 1 y con $D_{50} = 1,16 mm$ y $D_n = 0,81 mm$) con las medidas experimentales.

Es evidente la falta de coincidencia entre las fórmulas empíricas y los resultados experimentales. Por otro lado, éstas muestran la tendencia contraria a la experimental en cuanto a la disminución de la erosión al aumentar el caudal. Creemos que la razón de estos desajustes es lo específico de cada geometría y sobre todo de cada régimen hidráulico en la erosión local que se desarrolla.

8. CONCLUSIONES

Se ha estudiado experimentalmente una traviesa en un régimen hidráulico sin transporte de sedimentos y con un resalto débil u ondulado al pie. En estas condiciones, la longitud afectada por la erosión crece con el caudal circulante pero la erosión máxima decrece. Los resultados cuantitativos se pueden consultar en la tabla 1 o figura 4 (para la erosión). Asimismo la erosión mayor se ha encontrado con caudales muy pequeños y de poca duración alcanzando la cifra de 2,4 veces la altura de la traviesa sobre el cauce original.

El estudio tendría aplicación a traviesas de pequeña altura en situación de aguas bajas. La geometría y la condición de contorno aguas abajo deben ser semejantes a las experimentadas. Esta precaución es necesaria, ya que, tratándose de erosiones locales, emplear los resultados o fórmulas de una investigación particular a otra diferente encierra grandes riesgos. En este sentido se ha mostrado la incapacidad de las fórmulas más usadas en traviesas para reproducir los resultados experimentales.

BIBLIOGRAFÍA

1. ELVIRO, V. (1990). "Dimensionamiento de saltos de amortiguación de energía para vertidos sobre lechos de escollera" *Ingeniería Civil*, nº 73, pp. 79-89.
2. MASON, P.J.; ARAMUGAN, K. (1984). "Free jet scour below dams and flip buckets". *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, vol. 111, nr. 2, pp. 229-235.
3. SIMONS, D.B.; SENTURK, F. (1977). *Sediment Transport Technology*. Water Resources Publications, Fort Collins, Colorado.
4. BREUSERS, H.N.C.; RAUDKIVI, A.J. (1991). *Scouring*. IAHR Hydraulic Structures Design Manual, 2. A.A. Balkema, Rotterdam.
5. DEL AGUA, J. (1992). *Traviesas de estabilización. Bibliografía y Experimentación*. Tesina de Especialidad, Escuela T.S. de Ingenieros de Caminos, C. y P., Barcelona.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha contado con ayuda del Proyecto AMB92-0638 de la Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología.



corsán

EMPRESA CONSTRUCTORA, S.A.



Autovía del Puerto de La Mora.



Renovación de vía en el ferrocarril de Langreo.



Sede de la Diputación General de La Rioja.



Regeneración de la Playa de Torrenueva.



Encauzamiento del Barranco del Carraixet.



Presa de Caneles.

CALIDAD Y SERVICIO

Una colaboración en firme: OLEXOBIT AD



BP les ofrece ahora un producto líder en el mercado de **betunes modificados: OLEXOBIT AD**. Diseñado para aplicaciones que requieran una mejora significativa de las propiedades del ligante en casos de una demanda de alta exigencia.

La tecnología punta y distribución de **OLEXOBIT AD**, ha sido posible gracias a la investigación y experiencia de una compañía líder en el suministro de **betunes modificados** desde hace más de 10 años y a la tecnología de nuestra Planta de Castellón, la más moderna de España.

Son muchos kilómetros enfrentándonos a los problemas y encontrando las soluciones que nuestros clientes necesitan, por eso, la colaboración profesional que siempre tendrá trabajando con BP es una garantía.

BP Bítumen,
una colaboración profesional.



BP. EN MOVIMIENTO