

XX CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA

COMPORTAMIENTO DE DIFERENTES ELEMENTOS DE CONTROL DE LA EROSIÓN EN MÁRGENES FLUVIALES

José Daniel Brea (1), César Loschacoff (1), Marcela Busquets (1),
Fernando Pérez (2), Pablo Porri (2)

(1) Instituto Nacional del Agua.

CC 21, 1802 Aeropuerto Ezeiza. Tel. 011-44804500. E mail: dbrea@ina.gov.ar

(2) Maccaferri de Argentina.

Güemes 320, 1621 Benavídez, Buenos Aires. Tel. 03327-457522. E mail: fperez@maccaferri-arg.com.ar

RESUMEN

Se presentan los resultados obtenidos en un estudio comparativo de tres tipos de protecciones de márgenes frente a la acción de las corrientes: colchones de alambre rellenos de piedra, bloques de hormigón ligados a un geotextil, y bloques de hormigón intertrabados.

Las comparaciones se efectuaron en referencia al comportamiento de cada tipo de protección ubicado sobre un talud deformable y al pie del mismo, al grado de acomodamiento de las distintas protecciones frente a la fosa de erosión localizada, y al valor de los coeficientes de rugosidad de Manning, según los materiales que las componen y para las configuraciones de colocación analizadas

Los diferentes elementos de protección fueron proyectados de acuerdo a las fórmulas de diseño correspondientes en cada caso, para una misma solicitud, siendo colocados sobre las zonas a proteger de la forma especificada por cada fabricante, obteniendo de este modo una base comparativa común para todos los elementos analizados.

ABSTRACT

The results obtained in a comparative study of three types of bank protection facing the stream current action: mattresses made with wire filled with stones, concrete blocks connected to geotextile mats and interlocked concrete blocks, are presented in this paper.

The comparisons were made in reference to the behavior of each pattern of bank revetment located over the deformable side slope and over its basement (toe), to the degree of arrangement of every different protection in front of the local scour hole, and to the values of Manning coefficient, according to the component materials and to the arrangement analyzed.

The different protection elements were projected in agreement with the respective design formulae in each case, for the same stress, being located in zones to protect under specification of each manufacturer, getting in this way, a common comparison base for all elements analyzed.

1. INTRODUCCIÓN

Se ha realizado un estudio comparativo de tres tipos de protecciones de márgenes frente a la acción de las corrientes, sobre la base de ensayos en modelo físico a fondo móvil. Dentro de la gran variedad de elementos para el control de erosión de márgenes fluviales, se consideraron para el estudio tres de los más utilizados en los ríos de nuestro continente: colchones de alambre rellenos de piedra, bloques de hormigón ligados a un geotextil, y bloques de hormigón intertrabados.

En función de las necesidades de información que se presentan al tener que decidir por uno u otro tipo de protección, los objetivos del estudio fueron:

- analizar el comportamiento de cada tipo de protección frente a las erosiones producidas por las corrientes sobre un talud deformable y al pie del mismo,
- evaluar el grado de acomodamiento de las distintas protecciones frente a la fosa de erosión localizada que se produce al pie de un obstáculo transversal a la corriente, como un estribo de puente,
- determinar los coeficientes de rugosidad de Manning (n) de los distintos tipos de protecciones según los materiales que las componen y para las configuraciones de colocación analizadas.

En este artículo se describen someramente la metodología empleada y las protecciones ensayadas, efectuando el análisis de los resultados obtenidos de los ensayos para todas las situaciones planteadas, y las conclusiones correspondientes.

2. CARACTERÍSTICAS DEL MODELO FÍSICO.

El estudio sobre modelo físico se basó en la metodología probada de semejanza hidráulica. El fenómeno analizado en esta investigación es típico de una obra fluvial, existiendo un predominio de las fuerzas de gravedad e inercia, por lo cual el cumplimiento de la semejanza hidrodinámica está garantizado por la igualdad del número de Froude en prototipo (p) y en modelo (m), esto es:

$$F_p = F_m$$

Considerando las instalaciones disponibles y la necesidad de minimizar los efectos de escala, se adoptó una escala de longitudes igual a 10.

Para el caso de las protecciones propuestas, la semejanza de los fenómenos de iniciación de arrastre y suspensión de sedimentos se logra si las distribuciones granulométricas son semejantes y si se cumple la igualdad del número de movilidad en prototipo y modelo. Es decir:

$$Y_p = Y_m$$

En estas condiciones, si los materiales del modelo y prototipo tienen la misma densidad, la escala de diámetros es igual a la escala de longitudes:

$$e_d = e_L = 10$$

El modelo físico se desarrolló en un canal de 33 m. de longitud, con un ancho total de 2.50 m, siendo la capacidad de bombeo del sistema de 500 l/s. Los taludes ensayados

fueron de pendientes 1:2,5 y 1: 1.5. Para el talud protegido y el fondo móvil se utilizó arena con un diámetro medio representativo (d_{50}) de 340 μm . Se ensayaron caudales variables entre 0.120 m^3/s y 0.480 m^3/s , de modo tal que el escurrimiento desarrollara velocidades de distintas magnitudes con el fin de verificar el rango apto de utilización de cada protección.

3. DESCRIPCIÓN DE LAS PROTECCIONES ENSAYADAS

Como ya se expresara, el estudio se desarrolló sobre tres tipos de protecciones: colchones de alambre rellenos de piedra, bloques de hormigón ligados a un geotextil y bloques de hormigón intertrabados.

En el primer caso se representaron colchones tipo (Referencia 1), con dimensiones en prototipo de 2 m de ancho por 4 m de largo y por 0.23 m de espesor aproximadamente. El diámetro que representa al 90% de la curva granulométrica acumulada (d_{90}) de la piedra de relleno en prototipo es de 0.20 m. El dimensionamiento de los colchones se realizó de acuerdo a la tabla presentada en la citada referencia, para una velocidad del flujo admisible en prototipo de 3.6 m/s.

Las propiedades del alambre empleado en la fabricación de los colchones (diámetro, elasticidad, etc.), no se encuentra en escala en el modelo, pudiendo resultar un colchón menos flexible que en el prototipo. En la Foto 1 puede apreciarse un detalle de la protección de colchones colocada.



Foto 1

Cada colchón pesó en modelo 3.35 kg, lo que en prototipo corresponde a un peso por unidad de superficie de 418.75 kg/m^2 . Considerando un peso específico de 2600 kg/m^3 para la piedra en prototipo, y una relación de vacíos del 30%, el peso por unidad de superficie del colchón de 0.23 m en prototipo resulta de 418.6 kg/m^2 .

Las dimensiones de los bloques de hormigón ligados a geotextil se calcularon según la fórmula de Pilarczyk (Referencia 3), que es la usualmente empleada para la determinación de protecciones de características similares. Dicha fórmula se presenta a continuación:

$$u^2 = \frac{\Delta \times D \times 2 \times g \times \Psi_{cr} \times K_s}{\Phi_s \times K_t \times 0.035 \times K_h}$$

donde Δ es la densidad relativa, D el espesor característico, D_{adop} el espesor adoptado (tiene en cuenta el porcentaje de vacíos), g la aceleración de la gravedad, Ψ_{cr} el parámetro de Shields, K_t el factor de turbulencia, K_s el parámetro de pendiente, α el

ángulo del talud, K_h el parámetro de profundidad, h el tirante mínimo, k_r la rugosidad, y Φ_s el parámetro de estabilidad.

Si se adopta un espesor de 0.10 m, la aplicación de la fórmula anterior da como resultado una velocidad de 3.60 m/s, la que debería ser resistida por un bloque del citado espesor. En consecuencia se adoptaron para el modelo bloques cuyas dimensiones en prototipo resultan de 0.5 m. de largo por 0.2 m. de ancho y 0.1 m. de alto, cubriendo un área de manta de 6 m. de largo por 2 m. de ancho. El espacio entre bloques no se rellenó con material granular, y la relación de vacíos adoptada para el cálculo fue la que surgió de evaluar la manta diseñada.

Para los ensayos los bloques se adhirieron a un geotextil no tejido de 200 g/m². Si bien el geotextil no se encuentra en escala, se utilizó el mismo para los tres tipos de protecciones analizadas, de modo de efectuar las comparaciones de su comportamiento frente a las erosiones y deformaciones, partiendo de una base común.

En el modelo cada bloque se adhirió al geotextil mediante pegamento sintético. Esta unión, en la práctica habitual, se realiza hormigonando el bloque directamente sobre el geotextil, en un rulo o pin que se deja a tal efecto. Para lograr la vinculación entre las mantas, se deja un espacio libre de geotextil, es decir, sin bloques, de modo de poder lograr la unión mediante el simple solapado, o de realizar una costura especial.

El peso de la manta en modelo se encuentra en el orden de los 2.25 kg., por lo que en prototipo, la protección pesa 188 kg/m² aproximadamente.

Finalmente se analizó el comportamiento de bloques de hormigón intertrabados en forma de doble T. Cada pieza tiene un largo de 0.4 m., y un ancho de las alas superior e inferior de 0.3 m. El espacio libre que se deja para la trabazón es de 0.2 m y el espesor se adoptó de 0.10 m. Este último es verificado con las mismas ecuaciones de Pilarczyk que en el caso anterior, ya que es una ecuación general adaptable a distintos tipos de protecciones. Con dicho espesor, dando los valores adecuados a las variables intervinientes, se obtuvo un valor de la velocidad de 3.6 m/s.

La bibliografía específica del tema no incluye una metodología de cálculo específica del peso o dimensiones del bloque intertrabado para resistir una velocidad dada. El cálculo aquí efectuado resulta el más cercano a la realidad física del problema, aunque el bloque en realidad no está aislado. En estas condiciones, la protección estaría del lado de la seguridad, ya que existe un factor de resistencia adicional dado por la trabazón, no tenido en cuenta en el cálculo.

En el modelo el peso de cada pieza fue de 0.020 kg., lo que representa en prototipo un peso de 250 kg/m².

4. COMPORTAMIENTO FRENTE A LA EROSIÓN AL PIE Y DEFORMACIÓN DE TALUD.

Se configuró en el canal de ensayo, sobre margen derecha, un talud deformable, con pendientes de 1:2.5 y 1:1.5. La longitud de la protección al pie en el sentido transversal al escurrimiento, se adoptó, por razones constructivas, igual a 0.30 m., lo que representa 3 m. en prototipo. En la Foto 2 se observa el canal, finalizado un ensayo de colchones de alambre.



Foto 2

La protección al pie debe establecerse en función de la erosión esperada al pie de la misma, por lo que se procedió al cálculo de la misma para evaluar la longitud necesaria de protección. Estos cálculos indicaron que la protección al pie colocada era insuficiente para controlar la erosión en las condiciones de diseño. De todos modos, se adoptó la longitud señalada, igual en todos los casos, e igual a 0.30 m (Referencia 2).

A partir de los ensayos realizados, merecen destacarse las siguientes conclusiones.

Para los dos taludes ensayados, los colchones de alambre rellenos de piedra sufrieron pequeños corrimientos y separaciones cuando se colocaron no vinculados. Estos corrimientos se verificaron para velocidades medias superiores a los 2 m/s, con el talud 1:1.5, y a 3 m/s, para el talud más tendido.

En todos los casos estudiados la protección de colchones resultó estable a las velocidades que desarrolla el escurrimiento, acompañando a la erosión, siguiendo la forma de la fosa al pie (Foto 3). El perfil de erosión en la fosa al pie adquiere una pendiente abrupta, que pudo estar condicionada por la menor flexibilidad del colchón en el modelo, debida a que la malla de alambre no estuvo en escala.



Foto 3

Para el caso de bloques de hormigón ligados a geotextil, se ha observado que las mantas de protección resultan flexibles sobre el talud y el pie del mismo. En este caso, el desarrollo de la fosa de erosión al pie tiene distinta configuración.

Desde el punto de vista de la estabilidad, se observó que el comportamiento es fuertemente dependiente de la unión entre las mantas y de la sujeción en los extremos. El simple solapado de las mantas ensayadas en corrientes con velocidades superiores a los 2.00 m/s, no resultó suficiente, siendo necesario para mantener su estabilidad, además de la costura entre las mantas, el anclado en el borde superior y en los extremos libres de aguas arriba y aguas abajo. Las mantas colocadas sin ningún tipo de costura y sujeción, resultaron levantadas por la corriente, enrolladas sobre sí mismas, y arrastradas hacia

aguas abajo. En el caso del talud 1:1.5, con las mantas están cosidas entre sí, pero no ancladas en los extremos superior ni de aguas arriba, se produjo el deslizamiento del conjunto.

Si bien el espesor de los bloques según el cálculo antes explicado, verifica la velocidad del escurrimiento para la protección tipo manta (en conjunto), al ejecutar el método constructivo de solapado, cualquier movimiento relativo entre las mismas hace que la protección deje de trabajar en conjunto en los bordes, con lo cual se produce el arrastre observado en los ensayos, y por lo tanto el colapso del revestimiento.

Para todos los ensayos con velocidades del orden de 2.0 m/s y superior, y para todos los tipos de vinculación entre las mantas, el talud protegido presentó hundimientos locales, lo largo de su desarrollo (Foto 4). Este efecto no se apreció en la protección con colchones de alambre. Esto se podría deber a la acción dinámica que la corriente ejerce sobre las mantas, generando el flameo, y el deslizamiento de los granos del suelo por debajo de las mismas. Se debería analizar la influencia de las dimensiones y peso de las mantas en la ocurrencia de este fenómeno, como así también, la estructura del talud (material de base y filtros).

Lo hasta aquí expresado permite concluir que, en virtud de los ensayos realizados, las protecciones de bloques de hormigón unidos a geotextil son estables para la velocidad de diseño, cuando se encuentran unidas y ancladas superiormente, resistiendo como manta en conjunto. Simplemente solapadas, resultan inestables para velocidades superiores a la mitad de la de cálculo.

Para el caso de bloques intertrabados de hormigón, se ha observado en términos generales que la protección no resulta lo suficientemente deformable como para acompañar la erosión al pie, quedando en voladizo. Además los bloques se destraban, cayendo al lecho (Foto 5).

El efecto de voladizo se da en mayor medida en el pie del talud, ocasionando que se erosione aún más el resto del mismo. La protección se deforma a medida que los bloques van cediendo, produciéndose deslizamientos en el cuerpo del talud. En este caso, los bordes rígidos de los bloques quedan enfrentados al escurrimiento, con lo que se favorece el desprendimiento de las piezas.

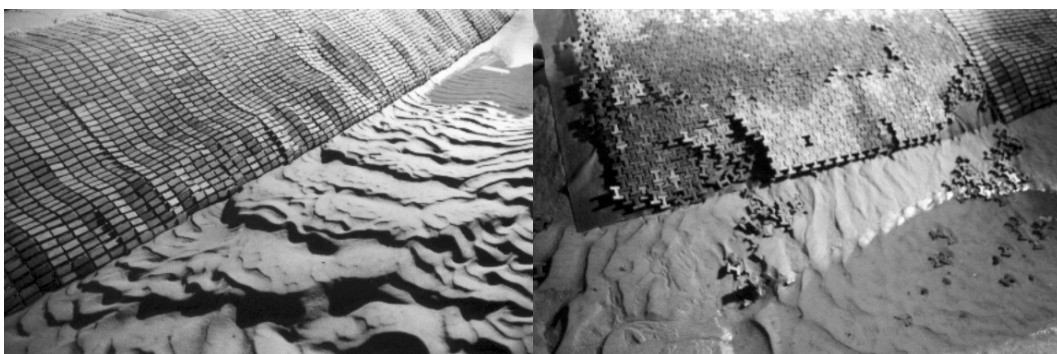


Foto 4

Foto 5

En cuanto a la estabilidad de la protección, la misma resultó en general más estable a la acción de las corrientes en el cuerpo del talud que en el caso de los bloques de hormigón unidos a geotextil.

El deterioro observado en la protección con bloques intertrabados tiene sus orígenes principalmente en la falta de flexibilidad, que impide acompañar las erosiones al pie

correctamente, generando deformaciones del manto protector en la zona adyacente, destrabando las piezas que lo componen, las que al quedar expuestas a la acción de las corrientes, son removidas, agudizando el proceso de deterioro. El peso de los bloques en el talud resulta insuficiente para evitar deslizamientos y deformaciones del mismo.

De la comparación entre las distintas protecciones estudiadas, resulta que la magnitud de la erosión en el pie del talud revestido es del mismo orden en todos los casos, resultando algo menor para bloques de hormigón unidos a geotextil.

Es de resaltar que según las tablas y ecuaciones de dimensionamiento, para la misma velocidad de diseño, los colchones de alambre rellenos de piedra resultan con el doble de espesor y consecuentemente, casi el doble de peso, que las mantas de geotextil con bloques de hormigón unidos y los bloques intertrabados.

Existe otro tipo de deformación sobre los taludes que se ha observado tanto para colchones de alambre como para las mantas de geotextil con bloques adheridos, que se produce por la insuficiente longitud de protección al pie. Al erosionarse el lecho en el borde adyacente al pie del talud, el perfil del suelo adopta una pendiente más empinada, que genera una inestabilidad.

5. COMPORTAMIENTO FRENTE A LA EROSIÓN LOCAL PROVOCADA POR LA PRESENCIA DE UN OBSTÁCULO TRANSVERSAL A LA CORRIENTE UNIDO A LA MARGEN.

Para evaluar el comportamiento de los distintos tipos de protección analizados frente a la erosión local provocada por la presencia de un obstáculo transversal a la corriente unido a la margen, se representó un estribo de puente unido a la margen derecha.

En el caso de colchones de alambre rellenos de piedra, los ensayos se llevaron a cabo con un caudal modelo de $0.300 \text{ m}^3/\text{s}$, y duraciones de dos y seis horas. Las velocidades medidas en las zonas cercanas al estribo resultaron todas mayores a 2 m/s (prototipo), siendo sobre el pie del talud mayor a 2.30 m/s (prototipo).

Sobre el pie del talud de aguas abajo se produjo deposición de material, mientras que el resto del borde del pie del talud se rodeó la fosa de erosión. En todos los ensayos la protección del estribo se realizó con los colchones vinculados entre sí.

También en este caso, la protección al pie en el modelo tuvo una longitud de 0.30 m , verificándose también que la misma era insuficiente, lo que produjo erosiones por debajo de la misma, haciendo que la pendiente del talud resulte mayor que la de equilibrio. La protección con colchones se deforma y resulta estable, ya que permanece en el talud, recomendándose no obstante colocar una protección al pie de mayores dimensiones que sea acorde con la magnitud de las erosiones esperadas (Foto 6).



Foto 6

Para el caso de la protección con bloques de hormigón unidos a geotextil, se construyó en el mismo canal un estribo de iguales dimensiones al anterior, realizándose idénticos ensayos.

Tal como se describiera en el punto anterior, también en estos ensayos se verificó la necesidad de una unión firme entre las mantas para soportar las corrientes con velocidades medias superiores a los 2.00 m/s. Las erosiones al pie del talud, y las dimensiones de la fosa de erosión, se encuentran más limitadas dada su capacidad de deformación.

Finalizados los ensayos, sobre el talud se observaron hundimientos locales de iguales características que los descritos en el punto anterior (Foto 7). Las mantas se acomodan a esa deformación, posiblemente causada por defecto de peso de las mismas, que produciría el flameo de las mantas y el consecuente deslizamiento de material granular del cuerpo del terraplén. Este efecto que no se manifestó en el talud revestido con colchones de alambre rellenos de piedra.

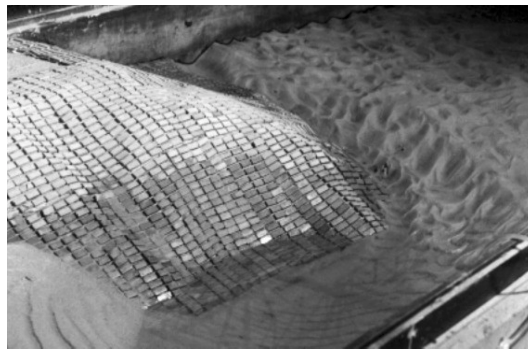


Foto 7

En el caso de bloques intertrabados de hormigón, se construyó en el mismo canal un estribo de menores dimensiones posibles para poder ser estudiado y que a su vez, los bloques disponibles alcanzaran para cubrir el área del talud y pie del talud.

Los ensayos realizados en este caso, fueron para el mismo caudal que los anteriores, estudiándose configuraciones sin fijación del pie del talud y con una especie de viga. En el caso de borde inferior libre, no fijado, con el correr del ensayo el pie del estribo pierde la mayor parte de los bloques, sucediendo similar efecto en el talud propiamente dicho.

Fijando el extremo con una viga en el borde del pie del talud. Debido a la rigidez que le confiere la viga al pie a toda la estructura, las piezas se descalzan, no sólo en el pie del talud, sino sobre el talud mismo. La viga quedó en voladizo y sufrió quebraduras (Foto 8). Gran cantidad de bloques, sobre todo los que se encuentran en el talud y pie del talud

paralelos a la dirección principal del flujo, y, del eje del estribo hacia aguas abajo, se destrabaron y se desacomodaron.

El principal problema de esta protección, con o sin fijación al pie, es la poca capacidad de deformación para adaptarse a las mayores erosiones que se producen al pie del talud. Al no adaptarse a los perfiles abruptos de deformación, se produce el destrabado localizado de las piezas (Foto 9).

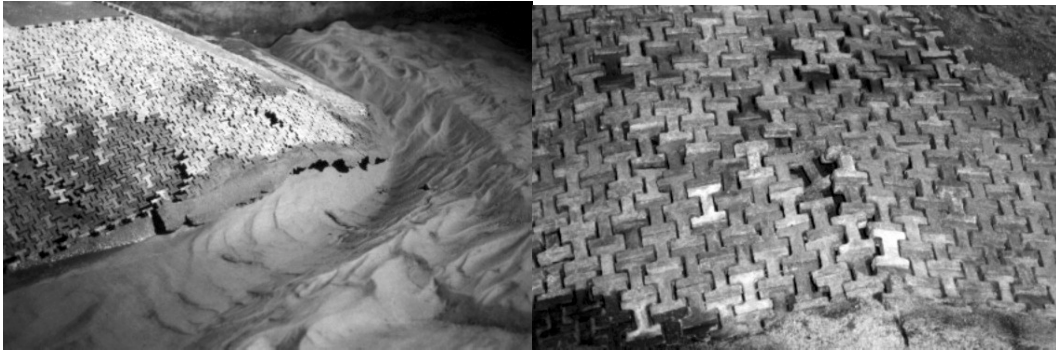


Foto 8

Foto 9

Las conclusiones de este punto resultaron en general similares a las del punto anterior. Si bien las erosiones resultaron del mismo orden en los tres casos analizados, el estribo protegido con colchones de alambre preserva completamente su forma, y no se observan deformaciones localizadas. En el caso de mantas de bloques de hormigón unidos a geotextil, se verificaron hundimientos localizados y efectos de flameo de mantas.

6. DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE RUGOSIDAD DE MANNING PARA CADA TIPO DE PROTECCIÓN

En el caso de los colchones de alambre rellenos de piedra, para la determinación del coeficiente de Manning, se revistió la totalidad del canal con los colchones.

Se realizaron ensayos con caudales modelo variables entre $0.120 \text{ m}^3/\text{s}$ y $0.360 \text{ m}^3/\text{s}$. Los resultados obtenidos a partir de las mediciones arrojaron valores del coeficiente n variables entre 0.033 y 0.037.

A fines comparativos, también se realizó el cálculo del n de Manning a partir de la expresión de Chezy. El d_{90} de las piedras incorporadas en los colchones fue de 0.02 m. (modelo), y considerando las variables de los ensayos, los valores del n de Manning variaron, según este cálculo, entre 0.038 y 0.040. Estos valores, mayores a los antes citados, se deben a que la piedra de relleno usada en el modelo tuvo un d_{90} mayor que el que surge de poner a escala de longitudes el material utilizado en prototipo. Esto fue así por razones operativas del modelo (tamaño de malla romboidal disponible para la construcción de los colchones).

Finalmente también se evaluó el coeficiente de rugosidad de Manning a través del método de medición de velocidades en la vertical, y en un canal de menores dimensiones. Con estos esquemas, los valores de n resultaron entre 0.029 y 0.038.

En función de los análisis descriptos se concluye que un valor medio realista del coeficiente de Manning del colchón de piedra relleno de alambre puede ubicarse en 0.035.

En el caso de bloques de hormigón unidos a geotextil, se hicieron ensayos análogos, realizando anclajes y costuras entre las mantas.

Los valores del coeficiente de rugosidad n de Manning medidos variaron entre 0.019 y 0.029. En el canal menor, los ensayos realizados arrojaron valores de n prácticamente constantes (entre 0.023 y 0.024).

Precisamente el valor de 0.024 puede considerarse como un valor medio realista del coeficiente de Manning de este tipo de protección.

Los ensayos para determinar el coeficiente de rugosidad de Manning de los bloques intertrabados de hormigón se realizaron en el canal menor debido a que, como ya se ha expresado con anterioridad, la cantidad de bloques disponibles no permitió revestir al canal mayor de igual forma que con las protecciones anteriores.

En los ensayos realizados, el coeficiente de rugosidad de Manning de esta protección varió entre 0.017 y 0.021, con valor medio de 0.019 que puede considerarse adecuado para los cálculos.

7. CONCLUSIONES

Se han presentado los resultados obtenidos del estudio comparativo de tres tipos de protecciones de márgenes frente a la acción de las corrientes, considerando su comportamiento sobre un talud deformable, y al pie del mismo, su grado de acomodamiento a una fosa de erosión localizada (estribo de puente), además de la determinación de los coeficientes de rugosidad de Manning de los distintos tipos de protecciones.

Al ser los diferentes elementos de protección ensayados, proyectados de acuerdo a las fórmulas de diseño correspondientes en cada caso, para una misma solicitud, y siendo además colocados de la forma especificada en cada caso, se obtuvo una base comparativa común para todos los elementos analizados, que valida los resultados obtenidos.

A partir de los mismos, se ofrece al proyectista una herramienta adicional a la hora de seleccionar y calcular un sistema de control de erosión de márgenes en ambientes fluviales.

BIBLIOGRAFÍA

(1) Agostini, R.; Cesario, L.; Ferraiolo, F.; Papetti, A. 1988. *Strutture flessibili in gabbioni e materassi Reno nelle aste torrentizie e fluviali. Parte seconda: Opere longitudinali*. Officine Maccaferri S.p.A. Bologna. Italia.

(2) Instituto Nacional del Agua. 2001. *Estudio en modelo físico del comportamiento de diferentes tipos de protecciones de márgenes frente a la acción de las corrientes*. Informe LHA 208-01-01.

(3) Przedwojski, B.; Blazejewski, R.; Pilarczyk, K.W. 1995. *River Training Techniques. Fundamentals, Design and Applications*. A.A.Balkema. Rotterdam.