

ALGUNAS CONSIDERACIONES SOBRE EL CÁLCULO DE PROTECCIONES DE MÁRGENES EN RÍOS

C.S.Loschacoff, J.D.Brea, M.Busquets, P.Ormazabal

Instituto Nacional del Agua (INA) Casilla de Correo 21 – Ezeiza - 1804

E-mail: dbrea@[ina.gov.ar](mailto:dbrea@ina.gov.ar); sloschac@[ina.gov.ar](mailto:sloschac@ina.gov.ar); mbusquet@[ina.gov.ar](mailto:mbusquet@ina.gov.ar); pormazabal@[ina.gov.ar](mailto:pormazabal@ina.gov.ar)

www.ina.gov.ar

RESUMEN

En la actualidad se encuentran disponibles diversos sistemas para proteger márgenes de ríos o canales de los efectos erosivos causados por la acción de las corrientes. Un material tradicional es el Rip Rap o enrocado; a partir de una derivación de este tipo de protección, surgió hace muchos años la colchoneta tipo Reno, en la que el enrocado es confinado dándole mayor eficiencia. En estos últimos años se emplean en nuestro país otros sistemas como bloques de hormigón intertrabados y bloques adheridos a un geotextil. Todos estos tipos de coberturas tienen una gran aplicación en Argentina.

Pilarczyk, en su fórmula derivada para el dimensionamiento de las coberturas sometidas a la acción de las corrientes, ha sido capaz de incluir diferentes sistemas de protección y también de considerar diversas variables que participan en la estabilidad de los mismos. El objetivo de este trabajo fue analizar la aplicación de las expresiones matemáticas de Pilarczyk para el Rip Rap, colchones Reno y mantas de bloques adheridos a geotextil, de modo de tratar de explicar algunas particularidades que surgen de su aplicación.

ABSTRACT

Nowadays there are available several systems to protect river or channels banks of erosive effects caused by currents action. A traditional material is Rip Rap: from a derivation of this type of protection, many years ago, the RENO mattress appeared, for which the rip rap is confined into wire boxes, giving it greater efficiency. In these last years other systems as blockmats are used in our country. These all types of revetments have huge application in Argentina.

Pilarczyk, in its formula derived for the dimensioning of revetments under currents, has been able to include different protection systems and also to consider diverse variables that participate in the stability of the systems. The objective of this present paper was to analyze the application of the Pilarczyk's mathematical expression to rip rap, RENO mattresses and blockmats, to try to explain some particularities.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad existen diversos sistemas de protección de márgenes fluviales o canales de efectos erosivos ocasionados por la acción de las corrientes. Como material tradicional se encuentra el rip-rap o enrocado; a partir de una derivación de este tipo de protección surgió hace muchos años la colchoneta de alambre tipo Reno, en la que se confina al enrocado dándole mayor eficiencia. Y en estos últimos años se emplean en nuestro país otros sistemas como bloques de hormigón intertrabados o adheridos a un geotextil.

Estos tipos de cubierta tienen amplia aplicación en Argentina. Adquieren importancia por su valor económico cuando el área a cubrir es extensa o por la complejidad para su ejecución, así como también por las consecuencias que podría significar su falla, por ejemplo la rotura de estribos de puentes, el colapso de un terraplén de control de inundaciones, la invasión del río a sectores productivos, etc.

A partir de los resultados de un estudio comparativo de tres tipos de protecciones de márgenes

frente a la acción de las corrientes, realizado sobre la base de ensayos en modelo físico a fondo móvil (Brea, 2002), surgieron algunos aspectos de interés que fueron más allá de los objetivos específicos del estudio, y que fueron motivos de estudios posteriores.

Entre ellos, en el presente trabajo se describe la evaluación de algunas expresiones de cálculo disponibles para protecciones sometidas a la acción de las corrientes, de modo de tratar de explicar algunas particularidades que surgen de su aplicación.

Pilarczyk (1995, 1998, 2001), en su fórmula derivada para el dimensionamiento de cubiertas de protección sometidas a la acción de las corrientes, ha podido englobar a diferentes sistemas de protección, considerando diversas variables que participan en la estabilidad de estos sistemas.

El objetivo del presente trabajo fue analizar la aplicación de la fórmula de Pilarczyk para enrocado, colchonetas de alambre y mantas de bloques de hormigón adherido a un geotextil, comparando los resultados con los obtenidos de modelos físicos, y con otras expresiones de cálculo, cuando resultó posible.

ANÁLISIS REALIZADOS

El trabajo se dividió en tres etapas. En la primera se analizó la aplicación de la expresión de Pilarczyk para el dimensionamiento de enrocado. Principalmente se consideró el coeficiente Ψ_{cr} comparando el sugerido por Pilarczyk con otros investigadores entre ellos Paintal (Van Rijn, 1993), como así también el determinado a partir de la curva de Shields.

La segunda etapa consistió en analizar el dimensionamiento de colchonetas de alambre aplicando la misma expresión, comparando con las indicaciones dadas por el fabricante, en las que a veces se emplean velocidades de diseño (Maccaferri, 1981), y en otras los resultados de ensayos efectuados en modelo físico (Colorado State University, 1984).

Para el primer caso se estableció un tirante de 2m y otro que cumpliera la condición $h / kr < 5$, a fin de poder calcular el K_h empleado en la expresión, y relacionarlo a las velocidades de diseño. En el segundo caso se consideraron las tensiones de corte, realizando el cálculo al igual que el indicado por Pilarczyk, donde se dimensiona en primer término la piedra de relleno, la cual adquiere un valor de Ψ_{cr} superior al correspondiente a el enrocado libre, y luego la colchoneta con su Ψ_{cr} correspondiente.

En la tercera etapa, teniendo en cuenta los resultados de la modelación física, se analizó la aplicación de la expresión para mantas de bloques adheridos a un geotextil. Para este caso se observó en el modelo que para ciertas metodologías constructivas resultaban inestables y en otras se producían algunas deformaciones en el talud sobre el que se apoyaban (conformado de arena). Las mantas con bloques adheridos utilizadas en el modelo fueron dimensionadas a partir de aplicación de la fórmula en cuestión, resultando el peso por metro cuadrado aproximadamente igual a la mitad de una colchoneta Reno o un cuarto de un enrocado, para la misma sollicitación de diseño.

El análisis de esta última etapa permitió interpretar mejor algunos de los coeficientes, surgiendo paralelamente la necesidad de continuar investigando sobre el tema, realizando ensayos en modelos físicos a escalas adecuadas, y recopilando información de prototipo,

debido a que para este sistema, por ser relativamente nuevo, aún no existen datos suficientes o tareas de investigación que permitan ajustar mejor los coeficientes involucrados respecto al material.

DERIVACIÓN DE LA FÓRMULA DE DISEÑO.

La ecuación de Shields de inicio de movimiento, se obtiene a partir de la tensión de corte sobre el fondo.

La tensión de corte sobre el fondo se define como:

$$\tau_b = \rho g h I \quad (1)$$

donde

ρ : densidad específica del agua.

g : aceleración de la gravedad.

h : tirante

I : pendiente de la superficie libre

El parámetro de movilidad de Shields se define como:

$$\psi = u_*^2 / [(s-1)g d] = \tau_b / [(\rho_s - \rho)g d] \quad (2)$$

s : ρ_s / ρ

ρ_s : densidad específica de la piedra.

Si consideramos el parámetro de Shields para el cual se inicia el movimiento del material de fondo, se lo llama como parámetro de Shields crítico y se lo define como:

$$\psi_{cr} = \tau_{b,cr} / [(\rho_s - \rho)g D_{50}] \quad (3)$$

$$\text{de (1) se tiene que: } \tau_b = \rho g U^2 / C^2 \quad (4)$$

donde:

U : velocidad media en la vertical.

C : coeficiente de Chezy

Si reemplazamos (4) en (3) transformamos la ecuación de estabilidad en términos de la velocidad media de la corriente en la vertical, resultando la siguiente ecuación:

$$\psi_{cr} = \rho g U^2 / C^2 / [(\rho_s - \rho)g D_{50}] \quad (5)$$

de (5) se obtiene:

$$(U^2 / 2g) / (\Delta D_{50}) = (C^2 / 2g) \psi_{cr} \quad (6)$$

$\Delta = s-1$: densidad relativa

Para un perfil logarítmico de velocidad el coeficiente de Chezy tiene la siguiente expresión:

$$C = 18 \log (12h / k_r) \quad (7)$$

Donde

k_r : rugosidad efectiva.

Reemplazando (7) en (6) resulta la siguiente expresión:

$$(U^2 / 2g) / (\Delta D_{50}) = \{ [18 \log (12h / k_r)]^2 / 2g \} \psi_{cr} = 16.5 [\log (12h / k_r)]^2 \psi_{cr} \quad (8)$$

$$\text{llamando factor de profundidad a } \Lambda_h = 16.5 [\log (12h / k_r)]^2 \quad (9)$$

la expresión (8) nos queda:

$$(U^2 / 2g) / (\Delta D_{50}) = \Lambda_h \psi_{cr} \quad (10)$$

Resumiendo la expresión (10) es igual a la de Shields pero expresada en términos de la velocidad media en la vertical y de un factor que tiene en cuenta el tirante y la rugosidad equivalente que se deriva a partir del coeficiente de Chezy.

En el caso de protecciones de márgenes debe tenerse en cuenta la influencia del talud pues la expresión de Shields se deriva a partir de considerar un fondo plano. Esta influencia se la tiene en cuenta a través de un coeficiente (K_s), cuyo efecto es una reducción del de la resistencia de la protección, o sea la disminución del parámetro de Shields.

$$K_s = (1 - \text{sen}^2 \alpha / \text{sen}^2 \theta)^{0.5} \quad (11)$$

Donde:

K_s : factor de reducción por pendiente del talud.

α : ángulo del talud con la horizontal

θ : ángulo de fricción interna de la protección.

Otro fenómeno que puede ocurrir localmente, pero que tiene un considerable impacto sobre la estabilidad de una protección, es el efecto de turbulencia. La turbulencia es expresada en intensidad (r), la cual se define como la relación entre la fluctuación de la componente de velocidad (u') que genera un incremento en la velocidad instantánea efectiva ($u' + u$) y la velocidad media local (u). La desviación standard de la velocidad local (σ_u) es una medida práctica de u' . Por lo tanto la intensidad de turbulencia "r" se puede expresar como:

$$r = \sigma_u / u \quad (12)$$

El efecto de turbulencia se tiene en cuenta en la fórmula de dimensionamiento de la protección a través del factor de turbulencia k_t que equivaldría a un incremento de velocidad media en la vertical por efecto de turbulencia y cuya expresión es la siguiente:

$$k_t = (1 + 3 r) / 1.45 \quad (13)$$

Una intensidad de turbulencia normal para enrocado en el caso de tramos rectos y flujo uniforme es de aproximadamente 0.15 ($r = 0.15$ o 15%), por lo que para esta situación $k_t = 1$,

por ejemplo para el caso aguas abajo de un resalto hidráulico la intensidad de turbulencia puede tener un valor de 0.5 y $k_t = 1.7$.

Por lo tanto en la ecuación (10) tiene en cuenta el efecto de turbulencia si se reemplaza la velocidad de la corriente por otra corregida por dicho efecto o sea $U_t = k_t U$.

Si a la expresión (10) se introducen los efectos de talud y de turbulencia nos queda:

$$[(k_t U)^2 / 2g] / (\Delta D_{50}) = \Lambda_h K_s \psi_{cr} \Rightarrow (U^2 / 2g) / (\Delta D_{50}) = \Lambda_h K_s k_t^{-2} \psi_{cr} \quad (14)$$

Pilarczyk aplicó esta última expresión para enrocado, renombrando algunos coeficientes para arribar a una expresión particular, que generalizó para otros sistemas de protecciones.

A continuación se trata de llegar a la expresión de Pilarczyk, para ello, en principio, se reemplazan algunos de los coeficientes de la (14) por los siguientes:

$$D_n = 0.84 D_{50} \quad \Rightarrow D_{50} = D_n / 0.84$$

D_n : Diámetro nominal de para enrocado.

$$K_h = 33 / \Lambda_h \quad \Rightarrow \Lambda_h = 33 / K_h$$

K_h : Parámetro de profundidad.

$$K_t = k_t^2$$

K_t : factor de ajuste por turbulencia.

Resultando la siguiente expresión:

$$(U^2 / 2g) / (\Delta D_n / 0.84) = (33 / K_h) K_s K_t^{-1} \psi_{cr} \Rightarrow$$

$$\Delta D_n = (0.84 / 33) K_h K_s^{-1} K_t \psi_{cr}^{-1} (U^2 / 2g) \quad (15)$$

Se supone que Pilarczyk substituyó el valor $(0.84 / 33)$ por $(0.035 \phi_s)$ siendo 0.035 igual al parámetro de Shields de referencia para enrocado y ϕ_s al que llamó parámetro de estabilidad, asignándole a un enrocado continuo el valor de 0.75, por lo tanto se verifica que: $(0.84 / 33) \cong (0.035 * 0.75)$.

Finalmente la expresión de Pilarczyk resulta:

$$\Delta D_n = (0.035 / \psi_{cr}) \phi_s K_h K_s^{-1} K_t (U^2 / 2g) \quad (16)$$

Esta expresión le permitió generalizar el dimensionamiento para otros sistemas diferentes al enrocado, como por ejemplo colchonetas tipo reno, bloques de hormigón independientes, mantas de bloques de hormigón adheridos a un geotextil, etc., variando la definición de Δ y de D_n y el valor de ψ_{cr} para cada sistema. Los valores de ϕ_s difieren también para cada sistema pero también tiene en cuenta el aspecto constructivo (hace diferencia si la protección corresponde a una zona continua o a la zona de bordes o transiciones).

APLICACIÓN PARA ENROCADO

Valores de ψ_{cr} .

En la aplicación de la expresión de Pilarczyk para enrocado se observaron diferencias en la bibliografía consultada en el valor del coeficiente ψ_{cr} . A continuación se hace una síntesis de dichas diferencias.

El CUR (report 169) dice que la curva de Shields asume una frontera abrupta entre movimiento y no-movimiento de granos, pero esto no es tan así debido al carácter estocástico de la tensión de corte, tamaños de granos, etc. Debido a la incerteza acerca del valor exacto de la tensión de corte este report recomienda el criterio de utilizar el valor de $\psi_{cr} = 0.03$ para definir el punto para el cual el enrocado comience a moverse, y un limitado movimiento es representado por $\psi_{cr} = 0.05$. Esto permite definir a ψ_{cr} como un “parámetro de daño” de acuerdo a los valores adoptados y que indiquen el grado de movilidad que se le permite a la protección con enrocado.

Pilarczyk indica un valor de $\psi_{cr} = 0.035$ en enrocado y $\psi_{cr} = 0.025$ cuando se requiere absoluta estabilidad. En el caso de situaciones temporarias, recomienda emplear $\psi_{cr} = 0.05$.

Van Rijn en su libro presenta las fórmulas de Neill y Maynard para determinar velocidades críticas en enrocado, de las cuales se pueden deducir los respectivos valores de ψ_{cr} .

$$U_{cr} = 1.4 [(s-1)g D_{50}]^{0.5} (h/D_{50})^{(1/6)} \quad \text{Neill}$$

$$U_{cr} = 1.3 [(s-1)g D_{50}]^{0.5} (h/D_{50})^{(1/6)} \quad \text{Maynard}$$

Estas expresiones incluyen el valor del coeficiente de Chezy según Strikler, que tiene la forma:

$$C = 25 (h / D_{50})^{(1/6)}$$

De ellas, y a partir de la expresión (3) se determinan los valores de ψ_{cr} :

$\psi_{cr} = 0.03$ para Neill y $\psi_{cr} = 0.026$ para Maynard.

También Van Rijn presenta algunos de los resultados obtenidos por Paintal en el año 1971 para enrocado, que se resumen en la siguiente tabla:

Diámetro de piedra D_{50} (m)	$\psi_{cr} = 0.02$	$\psi_{cr} = 0.025$	$\psi_{cr} = 0.03$
0.05	N = 0.6	N = 6	N = 60
0.10	N = 0.2	N = 2	N = 20
0.30	N = 0.04	N = 0.4	N = 4

Tabla 1

Siendo N el número de piedras que se mueven por metro de ancho por día.

De estos resultados se deduce que $\psi_{cr} = 0.02$ resulta un valor seguro que significa escaso movimiento del enrocado.

Valores de K_h .

El término K_h es el que marca la influencia de la relación tirante del escurrimiento y rugosidad de la protección en la fórmula (16) para el dimensionamiento o verificación de la cobertura de protección de márgenes.

- Pilarczyk define las siguientes expresiones de K_h :

$$K_h = 2 / [\log (12h / k_r)]^2 \quad \text{para un perfil logarítmico de velocidad.}$$

$$K_h = (h / k_r)^{-0.2} \quad \text{para un perfil no desarrollado de velocidad}$$

$$K_h = 1 \quad \text{para un escurrimiento muy rugoso } (h / k_r) < 5$$

Donde:

h: tirante del escurrimiento.

k_r : rugosidad equivalente.

De la bibliografía consultada se observaron diferencias en la definición del parámetro k_r , inclusive por el mismo Pilarczyk . A continuación se presentan las diferentes definiciones:

- Van Rijn indica: $k_r = \alpha D_{90}$, donde $\alpha = 1$ para enrocado, asumiendo $D_{90} = 2D_{50}$
 $\Rightarrow k_r = 2D_{50}$.
- En (CUR, 1995) se indica: $k_r = 2 D_{90}$, asumiendo $D_{90} \cong 2D_{50}$
 $\Rightarrow k_r = 4 D_{50}$.
- En las distintas publicaciones de Pilarczyk surgen diferentes valores de “ k_r ”, por ejemplo en (Prezedwojski, 1995) indica: $k_r = D_n = 0.84 D_{50}$; en (Pilarczyk, 2001) indica: $k_r = (1 \text{ a } 2) D_n$; en (Pilarczyk, 1998) indica: $k_r = 2 D_n$; y en el artículo “Simplified Unification of Stability Formulae for Rock and other Revetments under Current and Wave attack” indica $k_r = (1 \text{ a } 3) D_n$.

Frente a esta variedad de relaciones que dan el valor de la rugosidad “ k_r ” y para poder evaluar la influencia que tiene en el parámetro K_h , se efectuó el cálculo de K_h para un perfil logarítmico de velocidad y las todas la posibilidad es rugosidades relativas señaladas. Se confeccionaron los gráficos para tirantes de 2m, 5m, 10m, 20m y valores de diámetros (D_{50}) entre 0.05 m a 0.5m. A continuación se presentan las cuatro gráficas:

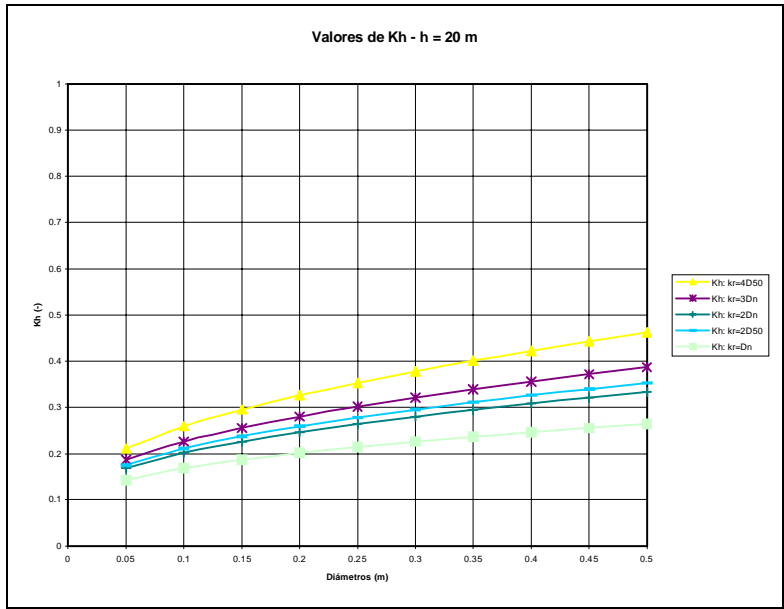


Figura 1

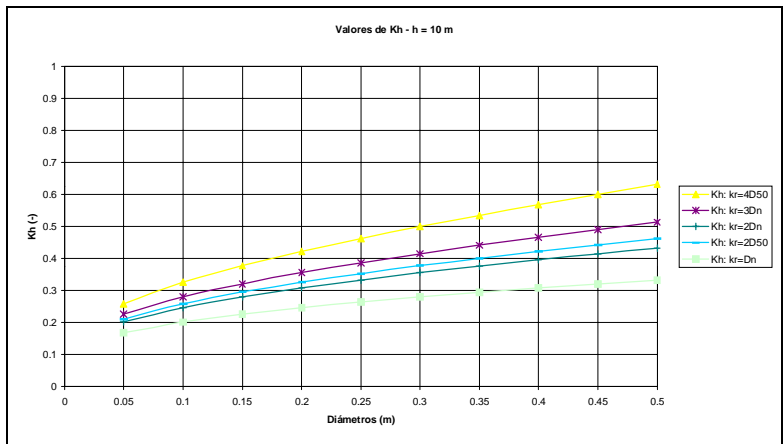


Figura 2

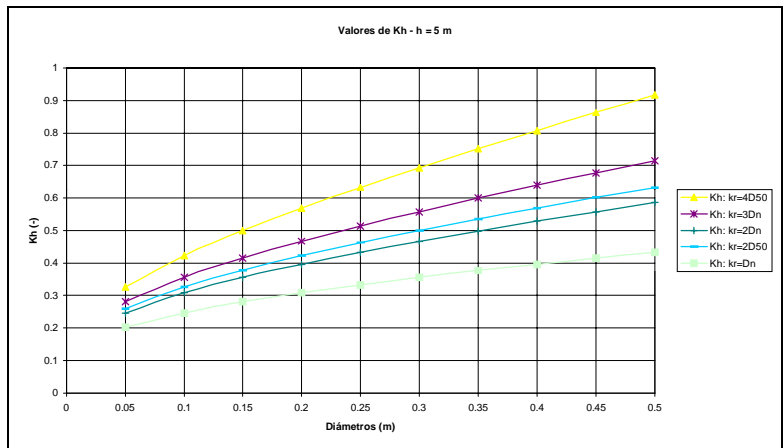


Figura 3

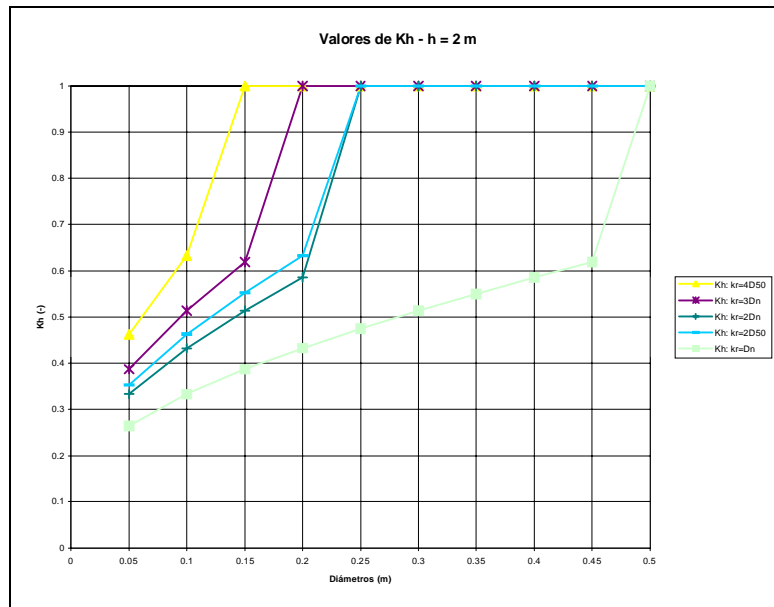


Figura 4

De los gráficos presentados se observa que, para tirantes pequeños, se tiene la mayor influencia de k_r sobre la determinación del coeficiente K_h . En esta situación en el cálculo de la velocidad que resiste un dado diámetro de piedra, pueden alcanzarse diferencias del orden del 35 % entre los valores extremos de k_r ($k_r = 4 D_{50}$ y $k_r = D_n$).

APLICACIÓN A COLCHONETAS.

Las colchonetas de alambre tipo Reno son empleadas desde hace muchos años en protecciones de márgenes sometidas a la acción de las corrientes. Su eficacia consiste en confinar la piedra, permitiendo emplear en su interior piedras de tamaño bastante menor a las que resultarían de aplicar un Rip Rap como protección. Además permite utilizar un espesor de la colchoneta menor al del enrocado, lo que implica el beneficio de emplear menor volumen de piedra con tamaños más pequeños (más fáciles de conseguir) respecto al enrocado.

Usualmente para su dimensionamiento se emplean velocidades de diseño (Colorado State University, 1984; Maccaferri, 1981), las que se presentan a continuación:

Velocidad de la corriente	Espesor del revestimiento
0.9 m/s a 1.8 m/s	0.15 m
1.8 m/s a 3.6 m/s	0.15 m a 0.23 m
3.6 m/s a 4.5 m/s	0.23 m a 0.30 m
4.5 m/s a 5.4 m/s	0.30 m a 0.45 m

Tabla 2

La Universidad de Colorado realizó para Maccaferri ensayos en modelo físico, que permitieron obtener resultados relacionados con la resistencia de las colchonetas. Por una parte se determinaron velocidades y tensiones críticas tanto de la piedra de relleno como de la de la colchoneta. Este mismo criterio parece ser el que empleó Pilarczyk para particularizar su expresión (16) a las colchonetas tipo Reno.

Para colchonetas sugiere las siguientes definiciones de los parámetros correspondientes a este sistema de protección:

$$\Delta : (1-n) (\Delta_p)$$

n : porosidad del material de relleno de la colchoneta.

Δ_p : Densidad relativa de la piedra.

D_n = espesor de la colchoneta.

También sugiere los siguientes valores ψ_{cr} y ϕ_s para las colchonetas:

$$\psi_{cr} = 0.07$$

$\phi_s = 0.5$ a 0.75 para zona de protección continua.

$\phi_s = 0.75$ a 1 para zona de bordes y transiciones.

En el caso de la piedra de relleno indica calcularla como $Rip - Rap$, pero utilizando el parámetro $\psi_{cr} < 0.1$, igual al resultado obtenido en los ensayos de la Universidad de Colorado.

Con el propósito de tener cierto grado de comparación entre las velocidades de diseño presentadas en la Tabla 2, con los resultados de los ensayos de la Universidad de Colorado para las velocidades críticas en función del espesor de la colchoneta y la expresión de Pilarczyk (únicamente para el espesor de colchoneta), se calculó esta última para las siguientes condiciones: protección en el fondo (significa $K_s = 1$); el K_h suponiendo un tirante de 2 m para un perfil de velocidad logarítmico y otro perfil de velocidad no desarrollado, y otro tirante que cumpla la relación $h / k_r < 5 \Rightarrow K_h = 1$; se adopta: $\phi_s=0.75$, $\psi_{cr} = 0.07$, el $D_{n,piedra} = 4'' (\approx 10 \text{ cm})$ y $k_r = 2 D_{n, piedra}$.

En el gráfico siguiente presenta el resultado de los cálculos realizados.

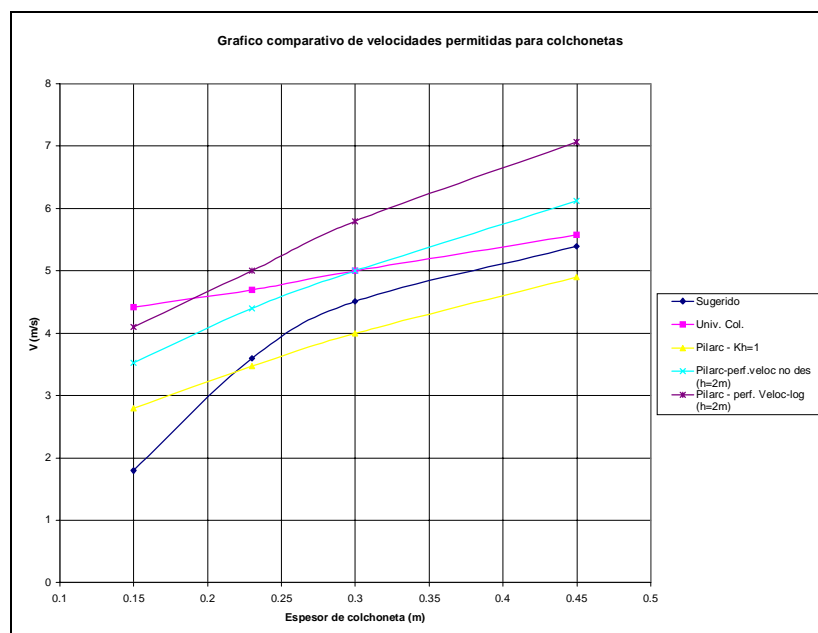


Figura 5

Como se observa en el gráfico, para las condiciones planteadas el espesor de diseño sugerido en los manuales, resulta en general mayor a los espesores calculados, a igual velocidad, lo que estaría otorgando un margen de seguridad. La situación sólo es inversa para el caso de escurrimientos muy rugosos ($h/k_r < 5$), aunque con diferencias del orden del 10 %.

La expresión de Pilarczyk, que permite definir al proyectista todos los parámetros en juego (tirante, pendiente del talud, turbulencia, características de la piedra de relleno, etc), lo que en algunos casos puede resultar más conveniente.

Tal como ya se expresar, Pilarczyk, al igual que la Universidad de Colorado, dimensiona por un lado la piedra de relleno y por otro el espesor de la colchoneta. Para establecer la relación entre el diámetro de la piedra y el espesor de la colchoneta se puede hacer la siguiente deducción:

Si particularizamos la expresión (16) para la piedra de relleno de la colchoneta, se tiene:

$$\Delta_p D_{n, \text{piedra}} = (0.035 / \psi_{cr}) \phi_s K_h K_s^{-1} K_t (U^2 / 2g)$$

$$\psi_{cr} = 0.1$$

$$\phi_s = 1 \text{ (Rip-Rap)}$$

$$\Delta_p \approx 1.65$$

$$K_h = f [h, k_r = f (D_{n, \text{piedra}})]$$

Reemplazando valores se tiene:

$$1.65 D_{n, \text{piedra}} = (0.035 / 0.1) 1 K_h K_s^{-1} K_t (U^2 / 2g)$$

$$U^2 = 4.714 K_h^{-1} K_s K_t^{-1} 2g D_{n, \text{piedra}} \quad (17)$$

Si particularizamos la expresión (16) para el espesor de la colchoneta, se tiene:

$$\Delta D_{n, \text{colch.}} = (0.035 / \psi_{cr}) \phi_s K_h K_s^{-1} K_t (U^2 / 2g)$$

$$\psi_{cr} = 0.07$$

$$\phi_s = 0.75 \text{ (colchoneta zona de protección continua)}$$

$$\Delta = (1-n) (\Delta_p) \approx (1-0.4) 1.65 \approx 1$$

n : porosidad del material de relleno de la colchoneta. ≈ 0.4

$$K_h = f [h, k_r = f (D_{n, \text{piedra}})]$$

Reemplazando valores se tiene:

$$1 D_{n, \text{colch.}} = (0.035 / 0.07) 0.75 K_h K_s^{-1} K_t (U^2 / 2g)$$

$$U^2 = 2.67 K_h^{-1} K_s K_t^{-1} 2g D_{n, \text{colch.}} \quad (18)$$

Tanto la piedra de relleno como la colchoneta deben resistir la misma velocidad, esto significa que la expresión (17) debe ser igual a la expresión (18), sabiendo que K_h , K_s y K_t son iguales tanto para la piedra de relleno como para la colchoneta.

$$4.714 K_h^{-1} K_s K_t^{-1} 2g D_{n, \text{piedra}} = 2.67 K_h^{-1} K_s K_t^{-1} 2g D_{n, \text{colch.}}$$

$$\Rightarrow D_{n,\text{colch.}} = 4.714 / 2.67 D_{n,\text{piedra}} \quad \Rightarrow D_{n,\text{colch.}} \cong 1.8. D_{n,\text{piedra}} \quad (19)$$

La expresión (19) es igual a lo que sugiere Pilarczyk.

Esto significa que para el cálculo de colchonetas es conveniente dimensionar la piedra de relleno, teniendo en cuenta todos los parámetros, y luego seleccionar el espesor comercial de la colchoneta que al menos duplique el diámetro nominal de la piedra.

De este análisis se desprende que en el diseño de colchonetas es muy importante el correcto dimensionamiento de la piedra de relleno.

APLICACIÓN A MANTAS DE BLOQUES DE HORMIGÓN ADHERIDOS A UN GEOTEXTIL.

En el Laboratorio de Hidráulica se ha realizado un estudio comparativo de tres tipos de protecciones de márgenes frente a la acción de las corrientes. Dicho estudio se efectuó en modelo físico a fondo móvil (escala 1:10), analizándose las siguientes protecciones: colchones de alambre rellenos de piedra, bloques de hormigón ligados a un geotextil, y bloques de hormigón intratrabados en una dirección (Brea, 2002).

Las dimensiones de los bloques de hormigón ligados a geotextil se calcularon según la fórmula de Pilarczyk, para una velocidad de 3.6 m/s (prototipo) estableciéndose como hipótesis de funcionamiento el de manta continua.

Entre los objetivos del estudio estaba analizar el comportamiento de cada tipo de protección en el talud y al pie, frente a la acción de las corrientes.

Para los bloques adheridos a un geotextil, 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 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.

Para algunos ensayos con velocidades superiores a 2.0 m/s y para todos los tipos de vinculación entre las mantas, el talud protegido presentó algunos hundimientos locales. 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. Por lo que 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).

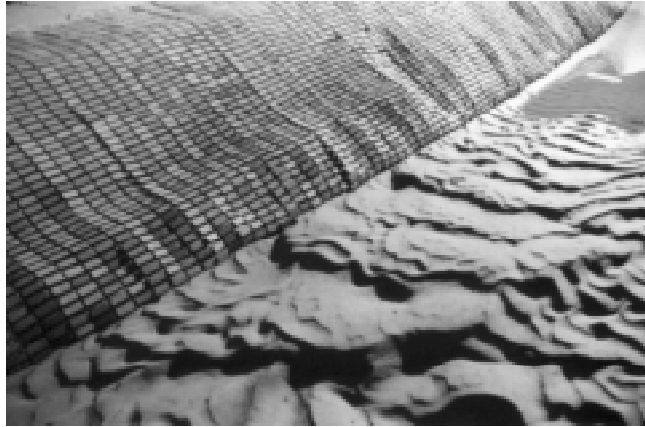


Figura 6

Analizando los valores del parámetro de estabilidad ϕ_s , en (Pilarczyk, 1998) se sugiere para mantas de bloques de hormigón utilizar $\phi_s = 0.5$ para la zona continua de la cobertura y $\phi_s = 0.75$ para bordes y transiciones, pero en (Pilarczyk, 2001) se sugiere emplear $\phi_s = 0.5$ a **0.75** para la zona continua de la cobertura y $\phi_s = 0.75$ a **1** para bordes y transiciones. Esto hace suponer, por los resultados en el modelo físico, que el sistema de unión de mantas de bloques por simple solapado no corresponde a cobertura continua sino que equivale a una zona de bordes y transiciones debiéndose emplear los valores mas altos del parámetro de estabilidad en este sistema de protección. Estos cambios en el parámetros de estabilidad conducen a espesores mayores de los bloques para una misma velocidad de diseño.

Otros de los coeficientes que pueden tener influencia en la estabilidad es el valor del parámetro de Shields " ψ_{cr} " que para mantas de bloques se sugiere igual a 0.07. En este caso, no pueden hacerse mayores análisis, siendo necesario para ello contar con nuevas investigaciones y estudios básicos.

En general, para este tipo de protección, el desarrollo de investigaciones en modelo como así también en prototipo permitirán ajustar mejor los coeficientes indicados para el cálculo. Hasta tanto se cuente con ellas, los análisis realizados indican la necesidad de considerar mayores márgenes de seguridad en el cálculo de este tipo de cubierta protectoras.

CONCLUSIONES.

Las conclusiones obtenidas de los estudios descriptos pueden resumirse en las siguientes:

- La expresión de Pilarczyk para el cálculo de coberturas de protección de márgenes permite ser aplicada en una variedad de sistemas, e incluyen todos los parámetros en juego en este tipo de proceso.
- Para enrocado y colchones de almabre, existen otras expresiones y estudios básicos, que permitieron hacer comparaciones, y determinar los grados de seguridad que pueden alcanzarse con estos tipos de protección.
- Se deben analizar correctamente los coeficientes sugeridos para su empleo en la expresión de Pilarczyk, ya que los mismos pueden resultar en diferencias muy significativas en los espesores de protección.

- Se debe evaluar la aplicación de coeficientes de seguridad para salvar errores de interpretación de los coeficientes involucrados, más aún en los tipos de protección menos estudiados y verificados en prototipo.
- Se recomienda seguir investigando sobre aspectos que permitan mejores definiciones de los coeficientes empleados en las fórmulas de diseño, y sobre algunas particularidades no demasiado desarrolladas en la bibliografía, pero que pueden ser importantes en la estabilidad del conjunto, tales como las velocidades por debajo de la cubierta protectora.

REFERENCIAS

Brea, J.D., Loschacoff, S., Busquets, M., Pérez, F., Porri, P. (2002). “Comportamiento de diferentes elementos de control de la erosión en márgenes fluviales.” XX Congreso Latinoamericano de Hidráulica. La Habana, Cuba.

Colorado State University, (1984). “Hydraulic Test to Develop Design Criteria for the use of reno mattresses.”

CUR (1995). Manual on the use of rock in Hydraulic Engineering.

Hoffmans and Verheij, (1997). “Scour Manual.” Balkema, Rotterdam.

Maccaferri Gabioes do Brasil, (1981). “Revestimientos flexibles en los canales y cursos de agua canalizados.”

Pilarczyk, K, (1998), “Dikes and Revetments, Design, Maintenance and Safety Assessment.” Balkema, Rotterdam.

Pilarczyk, K. (2001) “Unification of Stability Formulae for revetments”.

Prezedwojski, Blazejewski y Pilarczyk K.W. (1995). “River Training Techniques”. Balkema, Rotterdam.

Van Rijn, L. (1993). “Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas.” Acqua Publications.