

INFLUENCIA DE LA RUGOSIDAD RELATIVA EN EL COMIENZO DE ARRASTRE DE LA ESCOLLERA EN ENCAUZAMIENTOS

ANGEL LARA DOMINGUEZ (*)

RESUMEN. En este artículo se pasa revista a distintos criterios de comienzo de arrastre utilizados en el cálculo del tamaño de escolleras en encauzamientos, poniéndose de manifiesto la influencia de la rugosidad relativa.

ABSTRACT. In this report, a review is done about different criteria of beginning of motion used for the design of riprap for channel protection. The influence of relative roughness is emphasized.

1. INTRODUCCION

La escollera, por sus características, es un material de uso común en el proyecto y construcción de encauzamientos. Para elegir su tamaño, es necesario utilizar algún criterio de comienzo de arrastre que correlacione las características del flujo con el tamaño del material que resulte estable a las solicitaciones que sobre él se ejercen.

Generalmente, estos criterios utilizan la velocidad media o la tensión tangencial en el fondo como variables representativas del flujo. En esta exposición se hará referencia a ambas formas de abordar el problema. Sin embargo, a la hora de elegir un criterio de cálculo, se ha optado por uno del segundo tipo por considerarle más elaborado, fundamentalmente en lo relativo al dimensionamiento de la escollera en las márgenes.

2. TENSION TANGENCIAL CRITICA

Al analizar el comienzo de arrastre, tomando la tensión tangencial como variable representativa de las condiciones del flujo en el fondo, se estudia el equilibrio de acciones sobre una partícula en el instante de iniciarse el movimiento. Las fuerzas actuantes son el empuje hidrodinámico sobre la partícula y el peso sumergido de la misma.

A su vez el empuje hidrodinámico se puede suponer proporcional a la tensión tangencial en el fondo y al cuadrado del diámetro característico del árido, mientras que el peso sumergido es proporcional al cubo de dicho diámetro.

Planteando las ecuaciones de equilibrio, y mediante

ajuste experimental de los coeficientes, se obtiene el valor de la tensión tangencial crítica en el fondo τ_c para la que se produce el comienzo de arrastre. Si esta tensión es menor o igual que la existente, $\tau_c \leq \tau_e$, se producirá el arrastre del árido, permaneciendo éste inmóvil en caso contrario.

El análisis dimensional (referencia 1) indica que en canales de ancho indefinido y árido de granulometría uniforme

$$\frac{\tau_c}{(\Omega_s - \Omega) d} = f\left(\frac{d}{h}, \frac{\Omega_s}{\Omega}, R_{e*}\right) \quad (1)$$

τ_c = tensión tangencial crítica.

h = calado.

d = diámetro de la partícula.

Ω_s = peso específico del material del lecho.

Ω = peso específico del agua.

R_{e*} = n.º de Reynolds de arrastre.

Para partículas finas, el efecto de d/h puede ser despreciado. Por otra parte, si se considera un material de peso específico Ω_s determinado, la influencia de $\frac{\Omega_s}{\Omega}$ puede ser incluida en el coeficiente de la expresión resultante. Así, pues, en este caso la ecuación (1) adopta la forma:

$$\frac{\tau_c}{(\Omega_s - \Omega) d} = f(R_{e*})$$

La conocida curva de Shields es de este tipo. Si además, tal y como suele ocurrir, el flujo en el lecho es turbulento rugoso, los valores de R_{e*} son suficientemente altos como para que las fuerzas de viscosidad dejen de

(*) Laboratorio de Hidráulica del Centro de Estudios Hidrográficos. CEDEX.

tener influencia en el fenómeno, y entonces se cumple que:

$$\frac{\tau_c}{(\Omega_s - \Omega) d} = \text{constante}$$

Sin embargo, para partículas gruesas, tal es el caso de la escollera que nos ocupa, no puede despreciarse el efecto de d/h .

3. CALCULO DEL TAMAÑO DE LA ESCOLLERA

Stevens, Simons y Lewis, conocidos especialistas en hidráulica fluvial, proporcionan un método para estimar el diámetro de escollera de revestimiento del lecho y márgenes (referencia 2), estudiando la relación existente entre los momentos de las fuerzas que tienden a mantener la partícula en su posición y los de las que tienden a hacerla girar. Dicha relación define el denominado coeficiente de seguridad.

Se llega así a las siguientes expresiones:

$$S = \frac{\cos \Theta \tan \Phi}{\mu' \tan \Phi + \sin \Theta \cos \beta}$$

$$\mu = \frac{21 \tau_c}{(\Omega_s - \Omega) d} \quad (2)$$

$$\mu' = \frac{1 + \sin(\alpha + \beta)}{2} \mu$$

$$\beta = \arctg \left(\frac{\cos \alpha}{\frac{2 \sin \Theta}{\mu \tan \Phi} + \sin \alpha} \right)$$

- S : coeficiente de seguridad.
 Θ : ángulo del talud.
 Φ : ángulo de reposo del material.
 α : ángulo que forma la dirección de la corriente con la horizontal del plano del talud.
 τ_c : tensión tangencial.
 Ω_s : peso específico del material.
 Ω : peso específico del agua.
 d : diámetro de la partícula.

Si el coeficiente de seguridad es mayor que 1, la partícula será estable. No obstante, suelen fijarse valores iguales o superiores a 1,5.

Conviene aclarar aquí que este criterio no es aplicable a aquellos casos en los que se desarrollen grandes turbulencias, tal y como ocurre, por ejemplo, en las inmediaciones de las pilas o estribos de un puente, en zonas de resalto hidráulico, etc.

4. INFLUENCIA DE LA RUGOSIDAD RELATIVA

La ecuación (2) ha sido obtenida (referencia 2) teniendo en cuenta que en condiciones de comienzo de arrastre

sobre lecho horizontal $S = 1$, $\mu = 1$ y suponiendo que el parámetro de Shields $\tau_c/(\Omega_s - \Omega) d$ adopta el valor 0,047, de acuerdo con Gessler. No se ha considerado, pues, el efecto de d/h .

Para tener en cuenta este efecto utilizaremos algunas otras expresiones de comienzo de arrastre. Neill (referencias 3, 4 y 9) propone una curva media entre cuatro curvas utilizadas por agencias norteamericanas (California Division of Highways, Bureau of Reclamation, Corps of Engineers, Bureau of Public Roads).

$$\frac{U^2}{\frac{\Omega_s - \Omega}{\Omega} g d} = 2,5 \left(\frac{h}{d} \right)^{0,2} \quad (3)$$

- U : velocidad media de comienzo de arrastre.
 g : aceleración de la gravedad.

Para pasar a una expresión en tensiones tangenciales puede utilizarse una expresión de resistencia (referencia 1):

$$\frac{U}{U_*} = 8,12 \left(\frac{h}{d} \right)^{1/6} \quad (4)$$

$$U_* = \text{velocidad de arrastre} = \sqrt{g \tau / \Omega}$$

De (3) y (4) se obtiene:

$$\frac{\tau_c}{(\Omega_s - \Omega) d} = 0,038 \left(\frac{d}{h} \right)^{0,138} \quad (5)$$

Maza y García dan la relación (referencia 6):

$$\frac{U^2}{(\Omega_s / \Omega - 1) g d} = 2,25 \left(\frac{h}{d} \right)^{0,3} \quad (6)$$

De (4) y (6) se tiene que:

$$\frac{\tau_c}{(\Omega_s - \Omega) d} = 0,034 \left(\frac{d}{h} \right)^{0,033} \quad (7)$$

El ASCE Task Committee on Preparation of Sedimentation Manual recomienda para flujo sobre lecho horizontal (referencia 2):

$$\frac{0,347 U^2}{(\Omega_s / \Omega - 1) g d} = 1 \quad (8)$$

De (4) y (8) resulta:

$$\frac{\tau_c}{(\Omega_s - \Omega) d} = 0,044 \left(\frac{d}{h} \right)^{0,353} \quad (9)$$

d/h	NEILL	MAZA/GARCIA	ASCE	MAYNORD	REF. 7	REF. 8	FUENTES/AGUIRRE-PE
0,015	0,022	0,030	0,011	0,046	0,029	0,034	0,031
0,025	0,023	0,030	0,013	0,050	0,029	0,034	0,031
0,05	0,026	0,031	0,016	0,054	0,029	0,034	0,031
0,1	0,028	0,032	0,020	0,060	0,029	0,034	0,030
0,2	0,031	0,032	0,026	0,065	0,029	0,034	0,031

TABLA 1. Valores de $\tau_c/(\Omega_s - \Omega) d$.

Maynord (referencia 5) proporciona la expresión:

$$\frac{d}{h} = 0,3 \left(\left(\frac{\Omega}{\Omega_s - \Omega} \right)^{0,5} - \frac{U}{\sqrt{gh}} \right)^{2,5} \quad (10)$$

De (4) y (10) se obtiene, para $\Omega_s = 2,6 \text{ T/m}^3$:

$$\frac{\tau_c}{(\Omega_s - \Omega) d} = 0,081 \left(\frac{d}{h} \right)^{0,133} \quad (11)$$

En las referencias (7) y (8) figura la expresión:

$$\frac{V^2}{\frac{\Omega_s - \Omega}{\Omega} g d} = A \left(\frac{h}{d} \right)^{1/3} \quad (12)$$

$A = 1,93$ (referencia 7); $A = 2,25$ (referencia 8).

De (4) y (12):

$$\frac{\tau_c}{(\Omega_s - \Omega) d} = \frac{A}{66} \quad (13)$$

que es independiente de la rugosidad relativa

En una reciente comunicación al XXIV Congreso de la IAHR (referencia 9), Fuentes y Aguirre-Pe presentan una expresión que, para lecho horizontal, adopta la forma:

$$F_c = \frac{U}{\left(\frac{\Omega_s - \Omega}{\Omega} g d \tan \Phi \right)^{0,5}} = 0,9 + 0,5 \ln \left(\frac{h}{d} \right) + 1,3 \frac{d}{h} \quad (14)$$

De (4) y (14) resulta:

$$\frac{\tau_c}{(\Omega_s - \Omega) d} = \frac{F_c^2 \tan \Phi}{66 (h/d)^{1/3}} \quad (15)$$

A efectos comparativos, en la tabla n.º 1 figuran los valores de $\tau_c/(\Omega_s - \Omega) d$ para las distintas expresiones analizadas, en función de la rugosidad relativa, para el rango de d/h habitual en encauzamientos revestidos de escollera ($0,015 \leq d/h \leq 0,2$).

Como se puede observar, las únicas formulaciones que acusan un cierto cambio con d/h , dentro del rango considerado de dicha variable, son las de Neill, ASCE y Maynord. Los mayores valores proporcionados por esta última son debidos, en parte, a la utilización de d_{90} como diámetro característico. En cualquier caso, todas las restantes presentan valores de $\tau_c/(\Omega_s - \Omega) d < 0,047$ utilizado en el procedimiento de cálculo citado en el apartado 3.

Para $0,015 \leq d/h \leq 0,2$ todas las expresiones anteriores se pueden poner en la forma general:

$$\frac{\tau_c}{(\Omega_s - \Omega) d} = M \left(\frac{d}{h} \right)^N \quad (16)$$

que muestra la influencia de la rugosidad relativa en el fenómeno. En la tabla n.º 2 se resumen los valores de M y N correspondientes a los distintos autores y se resaltan sus diferencias.

AUTOR	M	N
Neill	0,038	0,133
Maza/García	0,034	0,033
ASCE	0,044	0,333
Maynord	0,081	0,133
Referencia 7	0,029	0
Referencia 8	0,034	0
Fuentes/Aguirre-Pe	0,031	0

TABLA 2.

Estas diferencias son ya clásicas en las relaciones de comienzo de arrastre y se deben, entre otras causas, a las distintas condiciones experimentales que sirvieron de base para su establecimiento. En este caso, para obviar el efecto de los distintos diámetros característicos adoptados por cada autor en sus correspondientes formulaciones y el relativo a tener que adoptar otro diámetro (d_{90}) como representativo de la rugosidad en la fórmula de resistencia, se ha considerado en toda la exposición una escollera de granulometría prácticamente uniforme. Asimismo, se ha supuesto que la sección es lo suficientemente ancha como para poder asimilar el radio hidráulico al calado.

Como se puede observar, aunque parece que existe un cierto consenso en admitir que la rugosidad relativa influye en la forma indicada por la expresión (16), no existe acuerdo a la hora de cuantificar dicha influencia. Aún cuando los valores de la tabla n.º 1 permiten al lector obtener sus propias conclusiones, en tanto en cuanto no exista un mayor apoyo experimental sobre estos temas, el autor se inclina por la formulación de Neill, por tratarse de una expresión de tipo medio del lado de la seguridad.

5. CONSIDERACION FINAL

No quisiera terminar estas reflexiones sin hacer alguna consideración de tipo práctico a efectos del cálculo del tamaño de la escollera de revestimiento en lecho y márgenes de un encauzamiento. En este sentido, el autor

propone el procedimiento de Stevens, Simons y Lewis, pero sustituyendo el valor de μ dado por la ecuación (2) por:

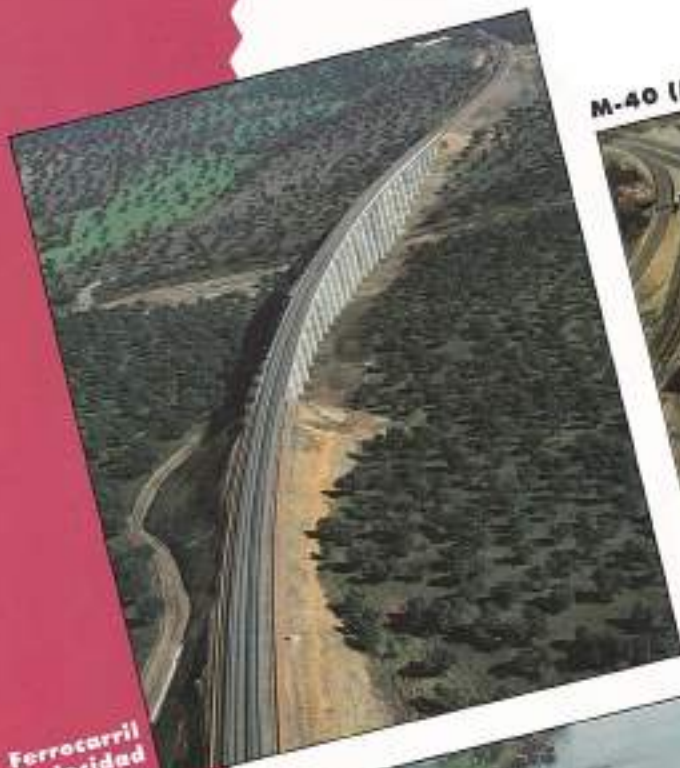
$$\mu = \frac{26 \tau_a}{(\Omega_s - \Omega) d} \left(\frac{h}{d} \right)^{0.133}$$

Para obtener esta expresión, que tiene en cuenta el efecto de la rugosidad relativa, se ha adoptado para $\tau_a/(\Omega_s - \Omega) d$ el valor correspondiente a la formulación de Neill.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. SIMONS y SENTURK (1977). Sediment transport technology.
2. STEVENS, SIMONS y LEWIS (1976). Safety factors for riprap protection. *Journal of Hydraulic Division ASCE*. Mayo.
3. RUI MARTINS (1984). Utilização de enrocamentos em estruturas hidráulicas. LNEC. Lisboa.
4. HOWARD H. CHANG (1988). Fluvial Processes in river engineering.
5. MAYNORD, RUFF y ABT (1989). Riprap design. *Journal of Hydraulic Engineering*. ASCE. Julio.
6. (1978). Mean velocities for the initiation of particles movement. 8.º Congreso Latinoamericano de la IAHR. Quito.
7. TEMEZ, J. R. (1974). Control de la erosión fluvial en puentes.
8. (1988). Control de la erosión fluvial en puentes. Dirección General de Carreteras. MOPU.
9. (1991). Movement of big particles in steep, macro-rough streams. XXIV IAHR Congress. Madrid.

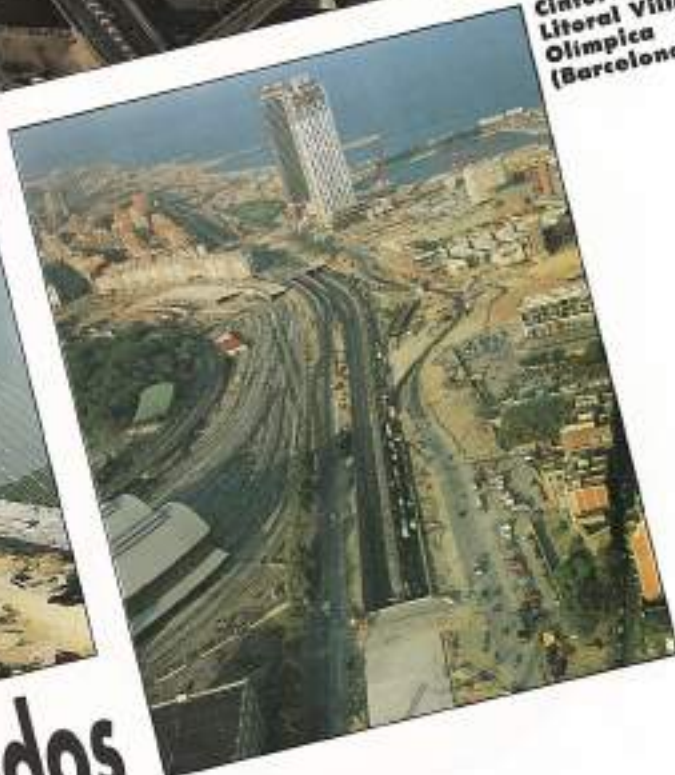
Ferrocarril
de alta velocidad
Madrid-Sevilla



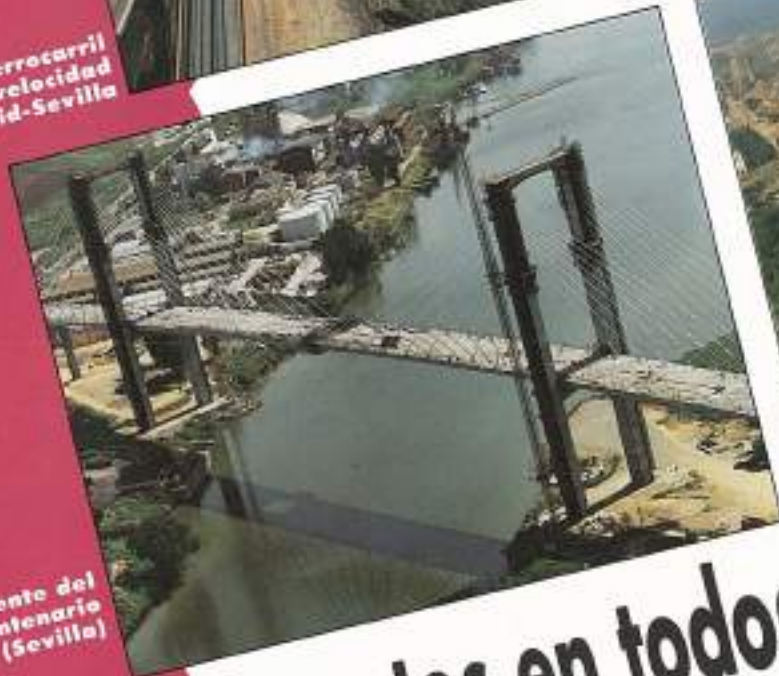
M-40 (Madrid)



Ciutat de
Litoral Villa
Olimpica
(Barcelona)



Puente del
Centenario
(Sevilla)



**Estamos presentes en todos
los acontecimientos**

CUBIERTAS
Y MZOV, S.A. CIA. GRAL. DE CONSTRUCCIONES



CENTRALES ELECTRICAS • AGRONOMIA • OBRAS HIDRAULICAS
 • CARRETERAS • PUERTOS Y COSTAS • ARQUITECTURA Y URBANISMO
 GEOLOGIA Y GEOTECNIA • MEDIO AMBIENTE • PLANTAS INDUSTRIALES



inypsa

INFORMES Y PROYECTOS, S.A.

INGENIEROS CONSULTORES

MADRID

General Diaz Portier, 49
 Telefono: (91) 400 45 52*
 Télex: 42496 inyp E
 28001 MADRID

BARCELONA

Gran Via de Carlos III, 124
 Telefono: (93) 205 08 62
 Télex: 97009 inyp E
 08054 BARCELONA