

AVANCES PARA EL ESTUDIO DEL EFECTO DE LA VISCOSIDAD EN EL DIMENSIONADO DE ENROCADOS DE PROTECCIÓN DE PILAS DE PUENTES

ADVANCES FOR STUDYING THE EFFECT OF VISCOSITY IN RIPRAP SIZING FOR BRIDGE PIER PROTECTION

Vilaseca, Federico; Chreties, Christian y Teixeira Luis¹

Resumen

En la experimentación sobre dimensionamiento de enrocados de protección de pilas de puentes es habitual el considerar despreciables los efectos de la viscosidad del agua sobre los resultados y excluir del análisis dimensional al grupo adimensional representante de dichos efectos. Sin embargo la experiencia en ensayos de laboratorio de diques de escollera marítimos ha demostrado que para ciertas escalas el flujo entre las capas de enrocado puede variar de régimen introduciendo efectos de escala significativos. En ese marco el objetivo de este trabajo fue el de realizar avances en el estudio de la influencia de la viscosidad para ensayos de enrocados de protección de pilas de puentes. Se realizaron en el canal sedimentológico del IMFIA tres pares de ensayos. En cada par se mantuvieron constantes los grupos adimensionales que influyen en el problema a excepción del representante de la viscosidad. En dos de los tres ensayos se constató un cambio significativo en el tirante necesario para el movimiento del enrocado al variar el representante de la viscosidad, por lo que se concluyó que su influencia no debería ser descartada a priori. Se remarca la necesidad de continuar la línea de investigación ampliando los ensayos a mayores tamaños de enrocado.

Palabras clave: enrocado de protección, fundaciones de puentes, erosión local, viscosidad.

Abstract

In experimentation on riprap sizing for bridge pier protection against local scour it is usual to consider that the effects of water viscosity on the results are negligible and to exclude from dimensional analysis the dimensionless group representative of the mentioned effects. However, laboratory experimentation on breakwater dam models has shown that, for certain scales, the water flowing between the layers of rip-rap can change its regime, producing significant scale effects. The objective of the present work was to advance in the study of the influence of viscosity on the results of rip-rap sizing experiments for bridge pier protection against local scour. Three pairs of tests were run in IMFIA's sedimentologic flume. For each pair of tests the dimensionless groups that influence the results were kept constant except for the one representing viscosity. The results in two of the three tests show a significant change in the water depth necessary to move the rip-rap stones after changing the dimensionless group representing viscosity. This led to the initial conclusion that the influence of viscosity on the results should not be discarded and that more testing should be done extending the experimentation for bigger rip-rap sizes.

Keywords: riprap protection, bridge foundations, local scour, viscosity.

1. INTRODUCCIÓN

Tradicionalmente el estudio del diseño de enrocados de protección de pilas de puente se realiza mediante modelación física, debido a la complejidad que presenta la interacción entre el flujo vorticoso tridimensional, el lecho de sedimentos, el enrocado y la pila. Los ensayos de laboratorio habituales para definir el tamaño de los elementos de la protección consisten en colocar un manto de enrocado en torno al modelo de la pila y determinar las condiciones de flujo mínimas que producen su falla por corte. Esto se constata una vez que el flujo logra desplazar el primer elemento del enrocado de protección. En este

análisis, al igual que en ensayos para determinar profundidad de erosión en torno a pilas y estribos, es habitual despreciar los efectos viscosos del flujo (Parola, 1993; Lauchlan, 2001). Se asume que en cauces a escala real el régimen de flujo es turbulento rugoso y que lo mismo sucede a escala de laboratorio. En ese caso la viscosidad no tendría influencia en el movimiento de los elementos del enrocado. Sin embargo, en el caso del enrocado de protección de diques de escollera marítimos, se ha constatado que en modelos de escala muy pequeña el flujo entre las capas de enrocado puede variar de régimen respecto

¹ IMFIA-Facultad de Ingeniería, Universidad de la República.
Julio Herrera y Reissig 565, Montevideo, Uruguay. CP 11300
fvilaseca@fing.edu.uy; chreties@fing.edu.uy; luistei@fing.edu.uy

al prototipo, introduciendo así efectos de escala significativos (Hughes, 1993). En consecuencia, para ese tipo de modelos, se definen tamaños mínimos de enrocado a ser utilizados en laboratorio que aseguran régimen de flujo independiente de la viscosidad. Un efecto similar podría aparecer en ensayos de enrocado de protección de pilas de puentes, lo que motivó este trabajo.

2. OBJETIVO

El objetivo de este trabajo es avanzar en el estudio de la influencia de la viscosidad en el dimensionado del tamaño del enrocado de protección de pilas de puentes en laboratorio.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Análisis dimensional

Fue realizado en primer término un análisis dimensional de las variables que intervienen en el fenómeno de erosión en pilas y luego en el dimensionado del tamaño de protección. Así, la profundidad de erosión de equilibrio frente a la pila puede escribirse como una función de:

$$d_{se} = f(u, h, \rho, \vartheta, \rho_s, d_{50}, \sigma_g, b, d, g) \quad (1)$$

Siendo “ u ” la velocidad media del flujo; “ h ” el tirante, ambos en la zona no perturbada del flujo; “ ρ ” la densidad del agua; “ ϑ ” la viscosidad cinemática del agua; “ ρ_s ” la densidad del sedimento; “ d_{50} ” el tamaño medio del sedimento; “ σ_g ” la dispersión granulométrica del sedimento; “ b ” el ancho del canal; “ d ” el diámetro de la pila cilíndrica; “ g ” la aceleración gravitatoria y “ d_{se} ” la profundidad de erosión de equilibrio frente a la pila. Cabe aclarar que dicho análisis aplica únicamente cuando la sección del canal considerado es rectangular. Aplicando el teorema π a la ecuación [1], puede obtenerse la ecuación [2] (Chreties, 2008), en la cual se define “ q ” el caudal por unidad de ancho como el cociente entre el caudal de flujo y el ancho del canal “ b ”.

$$\frac{d_{se}}{d} = f\left(\frac{q}{d\sqrt{gd}}, \frac{h}{d}, \frac{\rho_s}{\rho}, \sigma_g, \frac{b}{d}, \frac{ud_{50}}{\vartheta}\right) \quad (2)$$

Se hace notar que el último grupo adimensional es un número de Reynolds asociado al sedimento “ Re_{d50} ”. Realizando un desarrollo análogo para la dependencia del tamaño mínimo del enrocado de protección (dr_{50}) de la pila se obtiene:

$$\frac{dr_{50}}{d} = f\left(\frac{q}{d\sqrt{gd}}, \frac{h}{d}, \frac{\rho_s}{\rho}, \sigma_g, \frac{b}{d}, Re_{d50}\right) \quad (3)$$

siendo el primer número adimensional dentro de la función un número de Froude modificado, representante del caudal; y el último un representante de los efectos viscosos.

A los efectos prácticos de la experimentación se considerará que la relación entre densidades será constante durante los ensayos. Además, los áridos utilizados en el lecho y protección pueden considerarse de granulometría uniformes (). El máximo diámetro de pila utilizado fue de 22,5 cm, tamaño que no alcanza a cubrir 1/6 del ancho total del canal, por lo que se desprecian los efectos de contracción y por ende se excluye b/d del análisis. De esta forma la formulación final queda:

$$\frac{dr_{50}}{d} = f\left(\frac{q}{d\sqrt{gd}}, \frac{h}{d}, Re_{d50}\right) \quad (4)$$

Habitualmente se deprecia el efecto de la viscosidad y se elimina el representante de la misma del análisis. En este caso se mantendrán los tres grupos adimensionales de forma de estudiar la influencia de la viscosidad en los resultados obtenidos mediante los ensayos tradicionales.

3.2 Descripción de la instalación

Los ensayos se realizaron en el canal sedimentológico del laboratorio del IMFIA de la Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, Uruguay (Herrero, 2013). Dicho canal tiene 18 m de largo y 1.5 m de ancho y cuenta en su tramo medio con un cuenco de trabajo de 1 metro de profundidad. En dicho cuenco se instalaron las pilas de 0.16 y 0.225 m de diámetro exterior, construidas en PVC. Se utilizaron los siguientes diámetros medios como enrocado de protección: 0.8, 1.4, 1.65 y 6.0 mm, todos de granulometría considerada uniforme. En la Figura 1 se presenta una foto del canal sedimentológico en proceso de preparación para ensayar.



Figura 1.- Canal sedimentológico del IMFIA

La medición del flujo en el canal se realizó por medio de un caudalímetro de inserción para alta temperatura Burkert® modelo 8041, instalado en la tubería de

ingreso y el tirante cuya regulación se realiza con una válvula de guillotina en la tubería de desagüe del canal, es medido con un limnómetro de precisión. El enrocado de protección es colocado en todo el ancho del canal, a efectos de evitar el fallo por borde. Para evitar el fallo por tubificación o “winnowing” (Simarro, 2011) entre la capa de enrocado y la arena existente en el canal (por debajo de la capa de enrocado), se interpuso una membrana de geotextil. La capa de enrocado se coloca al mismo nivel de la capa de sedimento del resto del canal.

3. PROCEDIMIENTO Y PLAN DE ENSAYOS

El procedimiento consiste en realizar ensayos a efectos de verificar si la falla por corte de un tamaño de enrocado dado, para distintas condiciones de viscosidad, resulta en condiciones de flujo diferentes.

Para ello, partiendo de los tamaños de enrocado disponibles se organizan los ensayos reagrupando la ecuación [4] en la siguiente expresión

$$\frac{h}{d} = f\left(\frac{q}{d\sqrt{gd}}, \frac{d_{r50}}{d}, Re_{d50}\right) \quad (5)$$

Específicamente se buscaron pares de ensayos donde se mantienen constantes, y variando Re_{d50} hasta los límites posibles de la instalación, obteniendo en cada ensayo el valor de h/d que produce el inicio de movimiento del enrocado en torno a la pila. En la Tabla 1, se presentan las características de cada ensayo. Si la viscosidad no interviene en el problema, los valores resultantes de h/d serían iguales en cada par de ensayos. Como puede observarse en la tabla, los valores de $dr50/d$ son muy similares dentro de cada par, por lo que se consideran iguales, debido a la dificultad de obtener tamaños de sedimentos y pilas de diámetro preciso.

Tabla 1.- Características de los ensayos

Ensayo	$dr50/d$	Frd	Re_{d50}	Par
Ensayo 1	0.005	0.219	144	Par 1
Ensayo 2	0.006	0.219	282	Par 1
Ensayo 3	0.009	0.219	262	Par 2
Ensayo 4	0.016	0.219	1501	Par 2
Ensayo 5	0.022	0.219	1458	Par 3
Ensayo 6	0.026	0.269	541	Par 3

4. RESULTADOS

En la Figura 2 se presentan los resultados obtenidos en los 3 pares de h/d en función del número de Reynolds de sedimento correspondiente. Se observa que los valores de h/d obtenidos para los ensayos del primer par son similares, así como también lo es su Reynolds

de sedimento. En cambio para los pares restantes, se dan variaciones de Reynolds significativamente mayores, resultando una diferencia considerable en los valores de h/d obtenidos. Conviene destacar que cada par de ensayos mantiene los primeros dos grupos adimensionales del lado derecho de la ecuación [5] constantes, variando únicamente el Reynolds. De esta forma se obtiene para cada par de ensayos definido, la influencia del Reynolds en el resultado de h/d .

Se determinaron (expresiones [6] y [7]) para cada resultado los valores de Reynolds de pared, denotado Re_* , que permite definir si el flujo turbulento es liso, de transición o rugoso; y el diámetro adimensional de granos d_* que permite realizar la misma definición en el ábaco de Shields. En dichas expresiones u^* es la velocidad de corte.

$$Re_* = \frac{dr_{50}u_*}{\vartheta} \quad (6)$$

$$d_* = \sqrt[3]{\frac{g\left(\frac{\rho_s - \rho}{\rho}\right)d_{r50}^3}{\vartheta^2}} \quad (7)$$

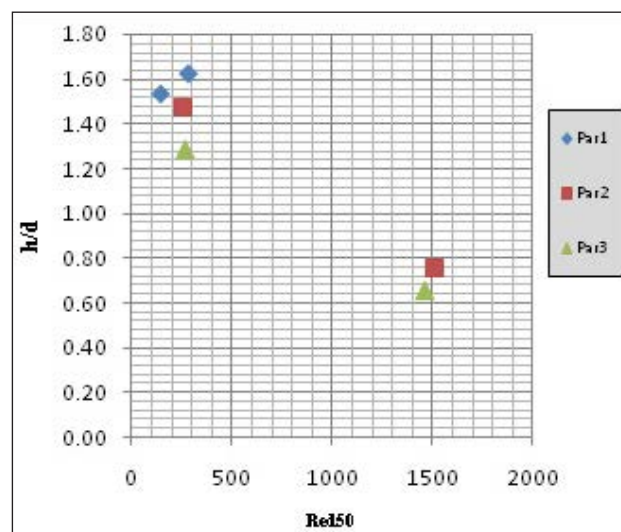


Figura 2.- Resultados de los ensayos de protección para cada par de ensayos.

Tabla 2.- Reynolds de pared y diámetro adimensional de grano para cada ensayo

Ensayo	h/D	Re^*	d^*	Par
Ensayo 1	1.53	12.4	20	PAR 1
Ensayo 2	1.62	26.5	35	
Ensayo 3	1.47	21.2	35	PAR 2
Ensayo 4	0.76	45.2	89	
Ensayo 5	0.66	35.5	89	PAR 3
Ensayo 6	1.29	14.7	42	

Para todos los ensayos el régimen de flujo en el canal es turbulento de transición ya que se mantiene Re , entre 5 y 70 y d , entre 25 y 150.

5. CONCLUSIONES

Del análisis de resultados se puede concluir de manera preliminar que existe una influencia apreciable de los efectos viscosos sobre los resultados en ensayos de dimensionado de enrocados de protección de pilas de puentes y por lo tanto dicha influencia no debería ser descartada a priori. Será necesario avanzar en el desarrollo de nuevos ensayos especialmente ampliando los tamaños de enrocado de protección a efectos de profundizar estas conclusiones preliminares.

De constatarse posteriormente estos resultados preliminares será importante a futuro tomar en cuenta los efectos viscosos al realizar ensayos de dimensionado de enrocados de protección. De otra forma se estaría reproduciendo en el laboratorio un fenómeno que no se ajusta a lo que ocurrirá a escala de ingeniería y los enrocados de protección que se diseñen podrían no cumplir adecuadamente su función. Esto podría generar que se perdieran los elementos de protección, llevando a grandes gastos de mantenimiento y reparación e inclusive a comprometer la estabilidad de las estructuras civiles.

AGRADECIMIENTO

Todas las actividades presentadas en este trabajo se realizaron en el marco de una beca de iniciación en la investigación financiada por la Agencia Nacional de Investigación e Innovación.

BIBLIOGRAFÍA

- Chreties, C., Simarro, G., and Teixeira, L. 2008. "New Experimental Method to Find Equilibrium Scour at Bridge Piers." *J. Hydraul. Eng.*, 10.1061/(ASCE)0733-9429(2008)134:10(1491), 1491-1495.
- Herrero, H., García C, López G, Pedocchi F. 2013. "Evaluación experimental de una analogía para la caracterización del flujo turbulento en confluencias." III Simposio sobre Métodos Experimentales en Hidráulica, Santa Fe, Argentina.
- Hughes, S.A. 1993. "Physical Models and Laboratory Techniques in Coastal Engineering", World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., Singapore.
- Lauchlan, C. S. and Melville, B. W. 2001. "Riprap protection at bridge piers." *Journal of Hydraulic Engineering*, 127(5), 412-418
- Parola, A. C. 1993. "Stability of riprap at bridge piers." *Journal of Hydraulic Engineering*, 119(10), 1080-1093
- Simarro, G., Chreties, C., and Teixeira, L. 2011. "Riprap Sizing for Pile Groups." *J. Hydraul. Eng.*, 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000458, 1676-1679.