

ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LAS FORMAS DE FONDO GENERADAS POR FLUIDOS PSEUDOPLÁSTICOS EN CANALES

Rodrigo Varas¹, Cristóbal Traslaviña², Constanza Vásquez¹ y Aldo Tamburrino^{3,4}

¹Estudiante de pregrado, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile – Chile.

²Ingeniero Civil, mención Ingeniería Hidráulica, Sanitaria y Ambiental, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile – Chile.

³Profesor Asociado, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile – Chile.

⁴Investigador Asociado, Centro Avanzado de Tecnología para la Minería, AMTC – Chile.

E-mail: rodrigo.varas@ug.uchile.cl, cristobal.traslavina@gmail.com, constanza.vasquezd@gmail.com, atamburr@ing.uchile.cl

Introducción

Bajo ciertas condiciones, la interacción entre un lecho granular no cohesivo y un fluido puede propiciar la aparición de ondas sedimentarios como dunas o rizos. Estas formaciones se encuentran típicamente en cauces naturales con lechos de arena y en zonas costeras, modificando la geomorfología del terreno. También se pueden encontrar en procesos industriales y en la minería. Por ejemplo, el concentrado de cobre y los desechos de relave son transportados como una mezcla sólido – líquida en suspensión, pero en caso de detenciones programadas o accidentales el material grueso tiende sedimentar, formando un lecho que puede ser propenso a la aparición de ondas sedimentarias cuando se reinicia el flujo. Las formas de fondo no son deseables en estos sistemas porque obstaculizan el flujo y producen una pérdida de energía adicional (Tamburrino et al., 2016).

Simultáneamente, en estas mismas áreas es común encontrar fluidos de reología no newtoniana, que habitualmente se generan de una mezcla de agua con material particulado fino.

Los fenómenos físicos asociados al transporte hidráulico de sólidos no han sido entendidos a cabalidad. Mas aún, prácticamente no existen trabajos donde se investigue el efecto de la reología en el transporte de sedimentos. El objetivo de esta investigación es cuantificar experimentalmente el gasto sólido de fondo y las características de las formas de fondo generadas por el flujo de un fluido pseudoplástico sobre un lecho granular no/cohesivo, utilizando una metodología no intrusiva para determinar la variación de la geometría del lecho en función del tiempo.

Antecedentes

Los fluidos no newtonianos son aquellos donde la relación entre el esfuerzo de corte τ y la tasa de deformación angular $\dot{\gamma}$ es una función no lineal. En particular, en los fluidos pseudoplásticos se cumple que $\tau = K\dot{\gamma}^n$, para flujos uniformes bidimensionales, donde K se denomina índice de consistencia y n de flujo.

Estos fluidos generalmente tienen alta viscosidad, encontrándose frecuentemente en régimen laminar (Chhabra & Richardson, 2011). El régimen de flujo es un factor importante en la aparición, desarrollo y migración de las formas de fondo. Diversos autores han propuesto modelos para estudiar la estabilidad de un lecho bajo la acción de un flujo laminar, identificando mecanismos estabilizantes y desestabilizantes (Valance & Langlois, 2005; Charru & Mouilleron-Arnould, 2002). Charru & Hinch (2006), basados en observaciones experimentales, proponen un modelo donde los aumentos en la viscosidad del fluido producen la detención en el crecimiento de dunas.

Como ley resistencia, se utiliza la relación encontrada por Burger et al. (2010), que relaciona el factor de fricción de Fanning y un número de Reynolds para fluidos pseudoplásticos en régimen laminar, definido como:

$$Re = \frac{\rho v^{2-n} R_h^n}{2^{n-3} K} \quad [1]$$

donde ρ es la densidad del fluido, v la velocidad media del flujo

y R_h el radio hidráulico. Para una sección transversal rectangular, $f = \frac{k}{Re}$, donde la constante k es igual a 16.4.

Montaje experimental

La instalación experimental consiste en un canal de acrílico, de sección transversal rectangular, de 360 centímetros de largo, 11.5 de ancho y 14 de alto, con pendiente i variable. Desde su extremo de aguas arriba recibe un flujo de caudal Q , que es recirculado en un circuito cerrado gracias a la acción una bomba centrífuga. El lecho es contenido dentro del canal por dos gradas triangulares de 3 centímetros de altura, colocadas cerca de ambos extremos. Para los experimentos se utilizó arena de cuarzo de granulometría uniforme de diámetro característico $d_s = 0.33$ milímetros.

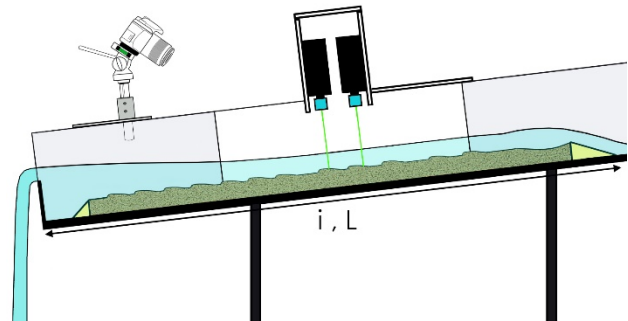


Figura 1.- Esquema de la instalación experimental.

Al centro del canal se ubica la zona de estudio donde se registran las formas de fondo generadas experimentalmente. Para esto se construyó una plataforma desmontable, compuesta por una cámara fotográfica Canon EOS REBEL T3i y dos láseres de 300 mW con potencia ajustable. La cámara es colocada encima del canal a una distancia vertical L desde el fondo, con su eje de colimación inclinado en un ángulo θ . Los láseres se colocan en posición vertical, separados a 2,4 cm entre ellos, emitiendo dos rayos perpendiculares a la dirección del flujo los que generan dos planos de iluminación al pasar por lentes cilíndricos.

La zona es iluminada lateralmente por una hilera de luces LED instaladas detrás de una placa de acrílico blanco, que tiene como función atenuar la luz emitida por los láseres.

Metodología

Para generar fluidos pseudoplásticos se utilizaron mezclas de agua con carboximetilcelulosa (CMC) en concentraciones cercanas a un 0.2% en peso. Las formas de fondo fueron generadas al someter el lecho granular, inicialmente plano, a la acción de un flujo con caudal constante. Los experimentos fueron registrados durante una hora, asegurándose que el flujo alcance altura de escurrimiento uniforme en la zona de estudio. Las condiciones experimentales se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1.- Condiciones experimentales.

Variable	Valor mínimo	Valor máximo
Q [L / s]	0,5	1,0
h [cm]	1,0	1,6
Re	500	1000
F_r	1,2	3,0
K [Pa · s]	0,06	0,11
n	0,65	0,75
τ_0 [Pa]	2,7	3,1
τ_*	0,5	0,6

Las formas de fondo, al pasar bajo los láseres, deforman la línea proyectada, demarcando su contorno. Mediante un procesamiento digital de imágenes (corrigiendo los efectos por perspectiva y refracción), es posible obtener el contorno deformado registrado en la imagen, y posteriormente, tomando un lecho de referencia, obtener las dimensiones de la duna. En la Figura 2 se presenta el perfil transversal de una forma de fondo procesada (línea azul) y luego corregida por refracción (línea roja).

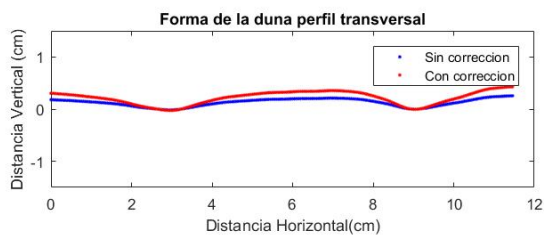


Figura 2.- Procesamiento de imágenes.

Resultados

A partir de los registros de imágenes, se determinó el perfil de alturas en la dirección transversal del flujo por cada láser, en función del tiempo. Con esto se obtiene la amplitud y celeridad de todas las formas de fondo que transitan por la zona de estudio durante el experimento.

De acuerdo con el estudio de Burger et al. (2010) todos los experimentos están en régimen laminar. Por otra parte, el número de Froude indica que las dunas se obtuvieron en régimen supercrítico. Las formas de fondo generadas se caracterizan por tener un frente plano, curvándose cerca de las paredes. Ocasionalmente, se presentan frentes de dunas más redondeados con su centro de gravedad próximo a la pared o frentes dobles.

En la Figura 3 se observan dos ondas sedimentarias registradas durante un experimento, donde el flujo se desplaza hacia abajo en la foto. La de aguas abajo se caracteriza por tener un frente doble y la otra tiene un frente más plano.

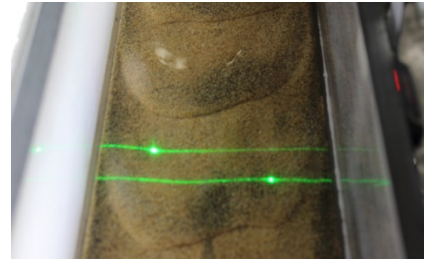


Figura 3.- Vista frontal de las formas de fondo.

En la Figura 4 se presenta la altura del punto central de las dunas al pasar bajo cada láser, en un intervalo del experimento. Se observa un desfase entre ambos perfiles que responde a la demora que toman las dunas en llegar a cada láser. Las formas de fondo conservan sus características geométricas mientras recorren el tramo entre los láseres.

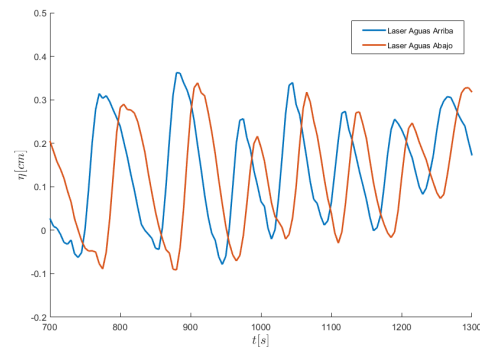


Figura 4.- Altura del punto central de los perfiles.

La celeridad de las ondas es entre 2 y 3 órdenes de magnitud más lenta que la velocidad del flujo, por lo tanto, durante un experimento alcanzan a pasar entre 20 y 40 dunas por la zona de estudio. La amplitud de las ondas varía entre 0.12 y 0.36 veces la altura de flujo, suficiente para que la superficie libre no se deforme. Con esta información se calculará posteriormente el gasto sólido de fondo.

Agradecimientos

Los autores agradecen el financiamiento otorgado por FONDECYT/Chile mediante el proyecto 1161751.

Referencias bibliográficas

- Burger, J., Haldenwang, R., & Alderman, N. (2010). "Friction factor-Reynolds number relationship for laminar flow of non-Newtonian fluids in open channels of different cross-sectional shapes". *Chemical Engineering Science*, 65(11), 3549-3556.
- Charru, F., & Hinch, E. J. (2006). Ripple formation on a particle bed sheared by a viscous liquid. Part 1. Steady flow. *Journal of Fluid Mechanics*, 550, 111-121.
- Charru, F., & Mouilleron-Arnould, H. (2002). Instability of a bed of particles sheared by a viscous flow. *Journal of Fluid Mechanics*, 452, 303-323.
- Chhabra, R. P., & Richardson, J. F. (2011). *Non-Newtonian flow and applied rheology: engineering applications*. Butterworth-Heinemann.
- Tamburrino, A., Carrillo, D., Negrete, F., & Ihle, C. F. (2016). Critical shear stress for incipient motion of non-cohesive particles in open channel flows of pseudoplastic fluids. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 94(6), 1084-1091.
- Valance, A., & Langlois, V. (2005). Ripple formation over a sand bed submitted to a laminar shear flow. *The European Physical Journal B-Condensed Matter and Complex Systems*, 43(2), 283-294.