

EFFECTO DE LA REOLOGÍA EN LAS FORMAS DE FONDO GENERADAS POR FLUJOS OSCILATORIOS EN DUCTOS A PRESIÓN

Kevin Vidal¹, Joaquín Moreno² y Aldo Tamburrino^{3,4}

¹Ingeniero Civil, mención Ingeniería Hidráulica, Sanitaria y Ambiental, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile – Chile.

²Estudiante de pregrado, 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: kevin.vidal@ing.uchile.cl, joaquin.moreno@ing.uchile.cl, atamburr@ing.uchile.cl

Resumen

Las formas de fondo son el resultado de la interacción acoplada entre flujo y el lecho, y su presencia provoca cambios locales de la cinemática del flujo que condicionan tanto la resistencia hidráulica como el transporte de sedimentos, y en consecuencia, es de gran interés determinar bajo qué condiciones se originan y cómo influyen en los procesos hidrodinámicos. Los estudios reportados en torno a esta área son vastos, ya sea cuando el flujo responsable sea puramente unidireccional, oscilatorio, o combinaciones de estos (pulsante), y el medio fluido es agua. Sin embargo, cuando el fluido es no newtoniano, la literatura es escasa para el caso unidireccional y prácticamente inexistente para los casos con flujo oscilatorio o pulsante.

En el presente trabajo se presentan resultados experimentales respecto a las características de las formas de fondo que se generan debido al flujo oscilatorio en un ducto a presión de un fluido pseudoplástico. La utilización de fluidos pseudoplásticos permite contrastar las diferencias que existe en el arrastre de sedimento frente al caso newtoniano para un mismo diámetro de partícula y observar cuál es el efecto de la reología tanto en la condición umbral para el arrastre de sedimento como en las características morfológicas resultantes sobre el lecho.

Instalación experimental

La instalación experimental está constituida por un tubo en U como se muestra en la figura 1. Esta fue diseñada con el propósito de estudiar la morfodinámica de un lecho granular debido a la acción de flujos oscilatorios, unidireccionales y combinaciones de ellos. Las ramas verticales del tubo son de sección circular y poseen un diámetro de 0,15 y 0,2 m respectivamente. La de diámetro mayor se encuentra abierta a la atmósfera mientras que en la de menor diámetro se encuentra un pistón accionado por un sistema de control mecánico. La interacción conjunta de estos elementos permite desplazar el fluido confinado en la rama y generar la oscilación del flujo. El sistema mecánico permite que el pistón se desplace en un rango de amplitudes que va desde los 0 hasta los 12 cm, a una frecuencia constante en un rango entre 0 y 30 rpm. La rama horizontal del tubo es de sección rectangular de 0,2x0,15 m² y abarca una longitud total de 2,0 m. Esta rama, en ausencia de oscilación, funciona como una tubería ligada a un sistema de recirculación que permite la imposición de un flujo base por medio de un caudal impulsado por una bomba centrífuga.

El lecho está constituido por arena de cuarzo de granulometría uniforme caracterizada por su diámetro medio, y este se dispone a lo largo de la longitud completa de la rama horizontal y compromete un espesor de 0,1 m del alto completo de la sección. Los 0,1 m restantes del alto, corresponden a la sección de escurrimiento por donde se desplaza el fluido que interactúa con el material granular. Los fluidos empleados corresponden a agua y soluciones acuosas de carboximetilcelulosa (CMC). La reología

de las soluciones con CMC se describen por medio de un modelo del tipo ley de potencia, $\tau = K\dot{\gamma}^n$, donde τ es el esfuerzo de corte, $\dot{\gamma}$ es la tasa de deformación, K es el coeficiente de consistencia y n es el índice de flujo. La reología se determinó mediante un réometro Anton Paar modelo Rheolab QC. La temperatura de la mezcla se controla a través de un intercambiador de calor y su valor instantáneo se mide por medio de una termocupla conectada a una de las paredes de la tubería.

Las características geométricas del lecho se determinaron por medio del registro de fotografías y la velocidad orbital del flujo a partir de la implementación del método de velocimetría por procesamiento de imágenes (PIV).

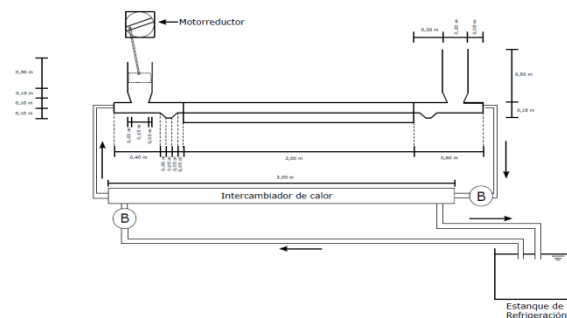


Figura 1.- Esquema instalación experimental.

Procedimiento experimental

Cada rutina experimental considera un lecho inicialmente plano caracterizado por un diámetro medio D_s y densidad del grano ρ_s , sometido a los efectos del flujo de un fluido (newtoniano o pseudoplástico) de densidad ρ y viscosidad ν . En primer lugar, se fija la amplitud del movimiento del pistón, que es constante para cada experimento, y se varía gradualmente la frecuencia del motor que induce el flujo oscilatorio. El resultado de la interacción flujo-sedimento se clasifica en tres categorías diferentes, que dependen del movimiento apreciable de las partículas sobre el lecho: sin movimiento (NM), movimiento incipiente (IM) y movimiento generalizado (GM). Cada nivel se establece visualmente, y para efectos de esta investigación, se habla de movimiento incipiente cuando algunas pocas partículas del lecho presentan un desplazamiento en torno a su posición de equilibrio en al menos dos sectores diferentes del eje horizontal de la tubería. Cuando la frecuencia del flujo aumenta, se incrementa el arrastre de sedimento tanto en la dirección longitudinal como en la sección transversal de la tubería. Se entiende por movimiento generalizado cuando el arrastre de partículas se vuelve uniforme a lo largo de la sección transversal. Cuando el arrastre compromete a toda la sección, se comienza con el registro fotográfico de las formas de fondo. Para los distintos niveles de movimiento observados, se registra la frecuencia, la temperatura y se determinan las características del flujo, definidas por: la velocidad orbital en las

cercanías del fondo U_m , que se obtiene mediante la implementación de PIV; la máxima semi-excurción orbital A , que se calcula por medio de un balance volumétrico entre el fluido que se desplaza entre la rama vertical confinada y la tubería de sección cuadrada; y la frecuencia de oscilación ω , que se mide mediante un tacómetro digital.

La reología del fluido se incorpora por medio del uso de la viscosidad efectiva propuesta por Kozicki et al. (1966), $v_{eff} = \frac{FK}{\rho} \left(\frac{U}{d}\right)^{n-1}$, donde U es la velocidad media, d es una longitud característica del flujo, K es el coeficiente de consistencia y F es una función que depende del índice de flujo n y se obtiene al conocer el perfil de velocidades del flujo y la geometría de la sección. Para efectos de este estudio se utiliza la relación propuesta por Kozicki et al. (1966) para tuberías de sección rectangular dada por:

$$v_{eff} = \frac{K}{\rho} \left(\frac{a+bn}{n}\right)^n \left(\frac{8U_m}{4R_H}\right)^{n-1} \quad [1]$$

Donde a y b , son constantes dependientes de la geometría de la sección, R_H es el radio hidráulico y la velocidad característica del flujo es reemplazada por la velocidad orbital U_m .

Resultados

Los principales resultados obtenidos a la fecha corresponden a la caracterización geométrica de las formas de fondo que se generan sobre un lecho de granulometría uniforme, considerando los casos en que el fluido es newtoniano y pseudoplástico. El diámetro medio de la arena utilizada es $D_s = 0,55$ mm con una densidad referencial $\rho_s = 2650$ kg/m³. Para el caso newtoniano, se empleó agua, cuyos coeficientes reológicos están dados por: $n = 1$ y $K = 0,001$ Pa·s, (19 °C). Para el caso pseudoplástico, se utilizó una solución acuosa de CMC con coeficientes reológicos iguales a: $n = 0,7676$ y $K = 0,0547$ Pa·s. Durante las rutinas experimentales, la temperatura de los fluidos se mantuvo relativamente constante en torno a los 19°C para el agua y 25°C para el CMC. En ambas situaciones se usa como valor referencial la densidad del agua a esa temperatura, es decir: $\rho_{H2O} = 998,5$ kg/m³ y $\rho_{CMC} = 997,1$ kg/m³. En cada experimento la amplitud del pistón es de 10 cm, que resulta en una máxima semi-excurción orbital igual a $A = 0,118$ m. Acorde al criterio de Kamphuis (1975), que clasifica el régimen de flujo para el caso oscilatorio según el número de Reynolds $Re_w = U_m A / \nu$, los experimentos se encuentran bajo el límite del régimen laminar igual a 10^4 , con valores de Re_w entre 1807 y 3614 para los experimentos con agua, mientras que para el CMC el rango de Re_w varía entre 29,7 y 135,3. Con respecto al arrastre generado por ambos fluidos, para el agua el estado IM se alcanza para una frecuencia de oscilación igual a 11,2 rpm, mientras que para el CMC la frecuencia del estado IM es ligeramente superior e igual a 11,6 rpm. En adición a lo anterior, el arrastre de sedimento se vuelve uniforme a lo largo de la sección transversal de la tubería a una frecuencia de 20 rpm cuando el fluido es agua, mientras que para el CMC lo hace a un valor de 24,2 rpm.

En la figura 2 se contrastan los resultados obtenidos para ambos fluidos considerando como parámetros el esfuerzo de Shields $\tau_* = \tau / ((\rho_s - \rho)gD_s)$ y el número de Reynolds de la partícula $Re_p = U_m D_s / \nu$, usado para evaluar el arrastre de sedimento en flujos oscilatorios propuesto por Rigler & Collins (1983). El esfuerzo de corte τ se obtiene mediante la relación propuesta por

Jonsson (1966) para flujo laminar igual $\tau = 0,5 \rho f_w U_m^2$ con $f_w = 2/\sqrt{Re_w}$. En la figura 2, las tres categorías de movimiento de la partícula se presentan con diferentes colores: NM= gris claro, IM=gris y GM=negro. En dicha figura se observa que las soluciones con CMC generan flujos asociados a Reynolds de la partícula de hasta dos órdenes de magnitud menor que los resultantes con agua, sin embargo, los esfuerzos de corte son de hasta un orden magnitud mayor para todos los estados de movimiento. En particular, se distingue que la reología es un factor que segrega los resultados según el tipo de fluido.

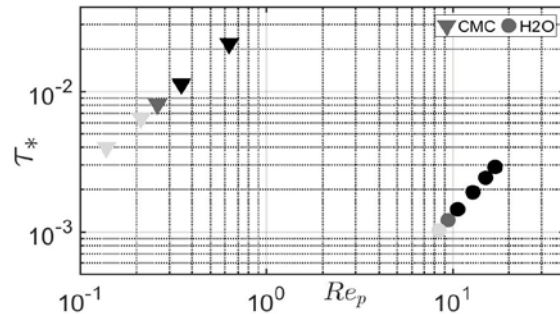


Figura 2.- Categorías de movimiento de las partículas para los dos fluidos analizados al momento de redactar este Resumen Extendido.

La caracterización de las formas de fondo comienza con el último registro de GM para cada experimento, y para cada caso se realizó un seguimiento durante un período de 2 horas. Para el final de cada experimento, tanto para el realizado con agua como con CMC, el lecho presenta ondulaciones relativamente uniformes las unas con las otras que se distribuyen uniformemente a lo largo de toda su extensión. Según la clasificación propuesta por Perillo et al. (2014), ambos fluidos generan morfologías que caen dentro de la clasificación de rizos (altura menor a 5 cm y longitud menor a 50 cm). Para el caso del agua se observan rizos con alturas que varían entre 1,37 y 2,78 cm y longitudes de onda que varían entre 6,27 y 8,02 cm. Para el caso pseudoplástico, se observan rizos con alturas que varían entre 1,94 y 3,62 cm y longitudes de onda entre 5,18 y 8,22 cm. Los rizos obtenidos con agua son más uniformes entre sí que los resultantes con CMC.

Al momento de redacción de este Resumen Extendido se continúa con el trabajo experimental, el que contempla dos fluidos pseudoplásticos de mayor viscosidad y otro tamaño de grano en adición a los acá presentados.

Agradecimientos

Los autores agradecen el financiamiento otorgado por FONDECYT-Chile mediante el proyecto de investigación 1161751.

Referencias

- Jonsson, I. G. (1966). Wave boundary layers and friction factors. Coastal Engineering, pp. 127-148.
- Kamphuis, J. W. (1975). Friction factor under oscillatory waves. Journal of the Waterways, Harbors and Coastal Engineering Division, 101(2), 135-144.
- Kozicki, W., Chou, C. H., & Tiu, C. (1966). Non-Newtonian flow in ducts of arbitrary cross-sectional shape. Chemical Engineering Science, 21(8), 665-679.
- Rigler, J. K., & Collins, M. B. (1983). Initial grain motion under oscillatory flow: a comparison of some threshold criteria. Geo-Marine Letters, 3(1), 43-48.
- Perillo, M. M., Best, J. L., & Garcia, M. H. (2014). A new phase diagram for combined-flow bedforms. J. Sedimentary Research, 84(4), 301-313.