ESTUDIO NUMÉRICO MEDIANTE SIMULACIONES DE GRANDES VORTICES (LES) DE LA TURBULENCIA EN CANALES CON LECHO DE GRAVA

Gustavo Estay Abiuso¹, Yarko Niño Campos² y Fabian Bombardelli³

¹Departamento de Ingeniería Civil Universidad de Chile. Santiago, Chile.

²Departamento de Ingeniería Civil & Advanced Mining Technology Center, Universidad de Chile. Santiago, Chile.

³Profesor Gerald T. and Lilian P. Orlob, Departmento de Ingenieria Civil y Ambiental, Universidad de California, Davis.

E-mail: gustavo.estay@gmail.com, ynino@ing.uchile.cl, fabianbombardelli2@gmail.com

Introducción

Los ríos se caracterizan por la disminución de la pendiente, de la capacidad de arrastre y el tamaño de los sedimentos hacia aguas abajo. Debido a las características geográficas de Chile, es común encontrar ríos de altas pendientes y sedimentos de gran tamaño. Por ejemplo en el estudio de Niño (2002), se puede apreciar que en ríos chilenos el diámetro medio del sedimento puede llegar incluso a valores de 30 cm. De este modo, el tamaño de la rugosidad provocada por el lecho es importante al ser comparada con la altura de escurrimiento. Por ello, no son aplicables los resultados teóricos que se obtienen para canales de bajas rugosidades.

Para estos casos se ha propuesto una base teórica a partir del doble promedio de las ecuaciones de flujo (Nikora et al., 2013, 2001, 2004). Esto es, complementar las ecuaciones de Navier-Stokes promediadas temporalmente, realizando promedios espaciales en planos paralelos al lecho del canal.

Validar experimentalmente este enfoque presenta dificultades técnicas relacionadas con la obtención de un número adecuado de mediciones para realizar promedios espaciales significativos. Es por esto que es conveniente utilizar simulaciones numéricas para abordar este problema. Los enfoques numéricos del tipo RANS, comunes en el ámbito de la ingeniería, no son adecuados para enfrentar este problema. Esto se debe a que en estos casos dominan los efectos de turbulencia de gran escala (McSherry et al., 2016). Se han realizado estudios aplicando la técnica Large Eddy Simulation (LES), la cual permite resolver los efectos turbulentos de gran escala (Bomminayuni and Stoesser, 2011; McSherry et al., 2016). En estos trabajos se ha representando la rugosidad del lecho mediante una capa de esferas o de semiesferas. Sin embargo, los estudios mencionados no incorporan el efecto de la fuerza de gravedad en las ecuaciones. Consideran que el flujo se mueve a partir de un gradiente horizontal de presiones. El problema de esta metodología es que el campo de presiones obtenido conlleva a problemas de interpretación física. Además de lo anterior, no es posible introducir directamente la pendiente del canal como parámetro del problema.

En este trabajo se realizarán simulaciones numéricas del tipo LES para el estudio de un canal con lecho de grava. La rugosidad se representará mediante una capa de semiesferas en el fondo. En este caso se resolverán las ecuaciones de flujo incluyendo directamente el término asociado a la fuerza de gravedad. Para esto se utilizará el software libre y de código abierto OpenFOAM. Éste tiene componentes que permiten realizar las distintas etapas de un proceso de simulación numérica, a saber, generación de la malla, resolución de las ecuaciones de flujo y post proceso de resultados. Esto permite obtener perfiles verticales doblemente promediados de las propiedades del flujo. Los resultados numéricos son comparados con los resultados experimentales obtenidos por Nakagawa and Nezu (1993), Nikora et al. (2001) y Aceituno (2017). Ademas de lo anterior se visualizan las estructuras coherentes del flujo mediante el criterio Q (Kolář 2007).

Metodología

En primer lugar se genera una malla mediante las aplicaciones blockMesh y snappyHexMesh incorporadas en el software OpenFOAM. La geometría corresponde a un canal rectangular de 40.5 cm de largo, 13.5 cm de ancho y altura de escurrimiento de 10.25 cm medida desde el fondo. El lecho de grava se representa mediante una capa de semiesferas de 4.5 cm de diámetro apoyadas en el fondo. Las semiesferas se distribuyen mediante un empaquetamiento cúbico simple.

Para las condiciones de borde se utiliza la misma configuración que Bomminayuni and Stoesser (2011). Las caras frontal, trasera y las laterales utilizan condiciones de borde del tipo cíclicas. Tanto el fondo del lecho como las semiesferas tienen una condición de no deslizamiento. Finalmente, la cara superior que representa la superficie libre tiene una condición de borde del tipo plano de simetría. Estas condiciones de borde permiten representar un flujo uniforme.

Para resolver las ecuaciones de flujo bajo el enfoque LES se utiliza la versión 4.1 de OpenFOAM. En particular, se utiliza la aplicación pimpleFoam que está diseñada para flujo impermanente, turbulento e incompresible. La aceleración de gravedad se incorpora mediante un término fuente a las ecuaciones. Para el cierre de la turbulencia se utiliza un modelo de turbulencia del tipo WALE (Nicoud and Ducros, 1999).

Se realizan dos simulaciones numéricas utilizando la misma malla, pero variando la pendiente del canal. En una de las simulaciones se utiliza una pendiente $S=0,1\,\%$ y en la otra $S=0,25\,\%$. Para cada una de las simulaciones se realizan dos etapas. Primero se realiza una simulación lo suficientemente larga como para llegar a una solución independiente de las condiciones iniciales. Tomando como condición inicial el resultado de esta simulación se realiza una nueva simulación. Los datos obtenidos de la segunda simulación son los utilizados para el análisis de resultados que se realiza en este trabajo.

En conjunto con las simulaciones se realiza una parte del post proceso con el software OpenFOAM. En primer lugar, se obtienen los promedios temporales y fluctuaciones turbulentas de los campos de velocidad y presión. Posteriormente se promedian los campos medios en una sucesión de planos paralelos al fondo del canal. Esto permite obtener perfiles doblemente promediados de la velocidad, intensidades turbulentas, presión y otras variables del flujo.

Además de lo anterior, se utiliza el criterio Q (Kolář 2007) para encontrar estructuras coherentes en el flujo. Este consiste en el cálculo de Q, el segundo invariante del gradiente del campo de velocidades. Las estructuras corresponden a regiones conexas donde Q es positivo.

Resultados

Para validar el perfil de velocidades obtenido en las simulaciones, se compara con la regresión realizada por Nikora et al. (2001) en base a datos experimentales. También se compara con los datos experimentales de Aceituno (2017).

Para comparar los perfiles de velocidad, se grafican adimensionalizados por la velocidad de corte (Figura 1).

El eje z se adimensionaliza mediante una escala de la grava δ . Tanto las simulaciones numéricas como los experimentos realizados por Nikora et al. (2001) se realizan utilizando segmentos esféricos. Por lo tanto, en ambos casos se utiliza δ igual a la altura de los segmentos. En el caso de Aceituno (2017), los experimentos son realizados con un lecho de grava de dos capas. En este caso se considera δ igual a la mitad del diámetro medio de la grava.

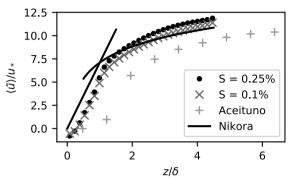


Figura 1.- Perfiles de velocidad longitudinal adimensional.

Para validar los perfiles de intensidad de turbulencia obtenidos en las simulaciones, se compararan con los ajustes realizados por Nikora et al. (2001) en base a sus datos experimentales. También se comparan con las relaciones semiteóricas propuestas por Nakagawa and Nezu (1993), las cuales son válidas lejos del lecho de grava.

Para efectos de comparación, se grafican los perfiles de intensidad de turbulencia adimensionalizados por el cuadrado de la velocidad de corte (Figura 2).

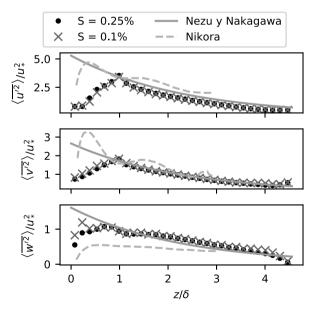


Figura 2.- Perfiles de intensidad de turbulencia adimencional.

Para visualizar estructuras coherentes, se grafican iso superficies de Q en el dominio de simulación. Por ejemplo, en la Figura 3 se muestra la superficie Q=100 para la simulación de pendiente S=0.1% en un instante de tiempo cualquiera. De forma complementaria, se muestra la magnitud de la velocidad instantánea del flujo en escala de grises.

Conclusiones

Los perfiles de velocidad obtenidos de las simulaciones se

ajustan satisfactoriamente a los obtenidos por Nikora et al. (2001). Por otro lado, podemos decir que los perfiles obtenidos por Aceituno (2017) tienen valores sistemáticamente menores a las simulaciones. Esto puede deberse a que el lecho utilizado por Aceituno (2017) se asemeja de mayor manera al de un cauce natural, es decir, existen variaciones en la forma, tamaño y distribución de sus elementos.

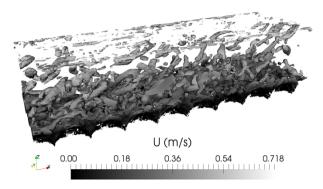


Figura 3.- Iso superficie de Q=100 para la simulación con pendiente S=0.1%.

Los perfiles de intensidad de turbulencia obtenidos de las simulaciones son consistentes con los datos de Nakagawa and Nezu (1993) en la zona superior al lecho de grava. Al comparar con los resultados de Nikora et al. (2001), se observa un comportamiento similar en las componentes x e y, con la diferencia que el valor máximo ocurre mas lejos del lecho en las simulaciones numéricas. En la componente z Nikora et al. (2001) presenta valores sistemáticamente menores a los de Nakagawa and Nezu (1993) y a los de este trabajo.

Se observa que la mayor cantidad de estructuras coherentes se encuentra en torno al lecho de grava, orientándose de forma oblicua en las direcciones x-z. También se encuentran estructuras coherentes en la superficie libre, aunque de menor tamaño, en menor cantidad y con orientación paralela a la superficie...

Referencias bibliográficas

Aceituno, N. (2017). Estudio experimental del transporte de relaves mineros debido a accidentes en un flujo con lecho de grava. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile.

Bomminayuni, S. and Stoesser, T. (2011). "Turbulence statistics in an open-channel flow over a rough bed". *J. Hyd. Eng.*, vol. 137, no 11, p. 1347-1358.

Kolář, V. (2007). "Vortex identification: New requirements and limitations". *International journal of heat and fluid flow*, vol. 28, no 4, p. 638-652.

McSherry, R., Chua, K., Stoesser, T., and Falconer, R. (2016). "Large eddy simulations of rough bed open channel flow with low submergence and free surface tracking". *River Flow 2016: Iowa City*, ASCE, USA, July 11-14, 2016, p 85.

Nakagawa, H. and Nezu, I. (1993). *Turbulence in Open Channel Flows*. IAHR Monographs, Taylor & Francis.

Nicoud, F. and Ducros, F. (1999). "Subgrid-scale stress modelling based on the square of the velocity gradient tensor". *Flow, Turbulence and Combustion*, vol. 62, no 3, p. 183-200.

Nikora, V., Ballio, F., Coleman, S., and Pokrajac, D. (2013). "Spatially averaged flows over mobile rough beds: Definitions, averaging theorems, and conservation equations". *J. Hyd. Eng.* vol. 139, no 8, p. 803-811.

Nikora, V., Goring, D., McEwan, I., and Griffiths, G. (2001). "Spatially averaged open-channel flow over rough bed". *J. Hyd. Eng.* vol. 127, no 2, p. 123-133.

Nikora, V., Koll, K., McEwan, I., McLean, S., and Dittrich, A. (2004). "Velocity distribution in the roughness layer of rough-bed flows". *J. Hyd. Eng.* vol. 130, no 10, p. 1036-1042.

Niño, Y. (2002). "Simple model for downstream variation of median sediment size in chilean rivers". J. Hyd. Eng. vol. 128, no 10, p. 934-941