

ESTUDIO DEL CAMPO DE VELOCIDADES EN UN CANAL DE LABORATORIO CON CURVATURA COMPUESTA EN PLANTA

CA. Caballero¹, AA. Jiménez¹, RA. Mendoza², AA. Martínez¹, M. Berezowsky¹ y J. Castillo¹

¹Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, México.

²División de Ciencias Básicas e Ingeniería, Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad - Lerma, México.

E-mail: CCaballeroC@ingen.unam.mx, AJimenezC@ingen.unam.mx, AMendozaR@ingen.unam.mx, AMartinezA@ingen.unam.mx, MBerezowskyV@ingen.unam.mx, Castillo@ingen.unam.mx

Antecedentes

En Jiménez y Berezowsky (2004) se describe un modelo matemático para calcular el campo de velocidades en canales, con base en la hipótesis de flujo bidimensional horizontal (2DH) cuyas fronteras laterales tienen curvatura; el funcionamiento del modelo matemático se verificó con resultados de cinco series de mediciones en laboratorio. En el caso, de un canal con curvatura compuesta, las comparaciones muestran resultados aceptables en gran parte del canal, excepto en una pequeña zona. Posteriormente en Caballero *et al.* (2017) se utilizó el sistema de modelación matemática *Telemac – Mascaret 2D*, para calcular el mismo caso; se obtuvo que las discrepancias entre lo medido y calculado persisten, por lo que se optó por desarrollar nuevamente los experimentos. En la Figura 1 se presenta la vista en planta del tramo del canal que se estudió en esa ocasión; la zona cercana a la margen izquierda del canal (delimitada por un óvalo), corresponde al lugar en el que se presentan las diferencias en las velocidades medidas y calculadas.

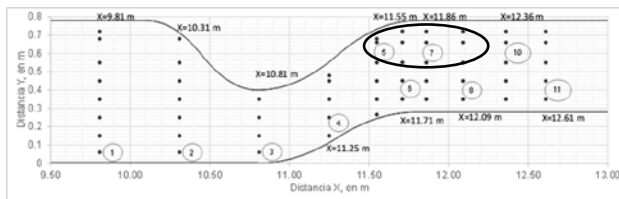


Figura 1.- Localización de las diferencias de velocidad entre lo medido y calculado.

Objetivo

Medir el campo de velocidades que se presenta en el dispositivo experimental con curvas horizontales, considerando un flujo permanente. Después, se compara este campo de velocidades con los resultados obtenidos con un modelo numérico 3D. El análisis presenta cuantitativamente la diferencia de la modelación numérica con respecto a lo observado en laboratorio. Además, permite mejorar la comprensión de la hidrodinámica en un canal con curvas horizontales y con ancho variable.

Dispositivo experimental

El dispositivo experimental está integrado por dos bombas (con capacidad un poco mayor que 5 l/s cada una), una cisterna, un vertedor triangular de cresta delgada con ángulo central de 90°; dos limnímetros: uno para medir la carga sobre la cresta del vertedor y el otro para medir el tirante en el extremo final, y una compuerta plana vertical para controlar el nivel del agua. La plantilla y las paredes laterales del canal son con acabado de mortero y aplanado liso. Los tres componentes de velocidad se obtienen mediante un equipo de laboratorio Doppler Acústico (MicroADV 16MHz). El equipo se colocó en un soporte de acero, que permite desplazar al aparato tanto en el sentido horizontal como en el vertical.

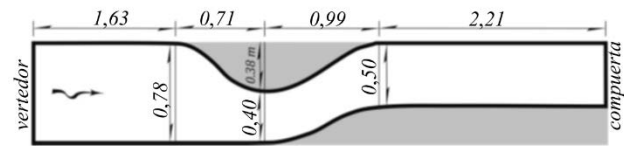


Figura 2.- Geometría del canal

Los resultados numéricos y experimentales permiten identificar que al considerar un flujo unidimensional, la superficie libre del agua es prácticamente horizontal. El funcionamiento hidráulico del canal se debe al efecto de remanso producido por la operación de la compuerta instalada al final del canal. En la Figura 3 se presenta la distribución de los puntos de medición en once secciones en las que se registraron los componentes (u, v, w). En cuanto a la condición del flujo que entra al canal, aguas arriba de la sección 1, se colocó un sistema de estructuras para que éste ingrese con una distribución lo más uniforme posible.

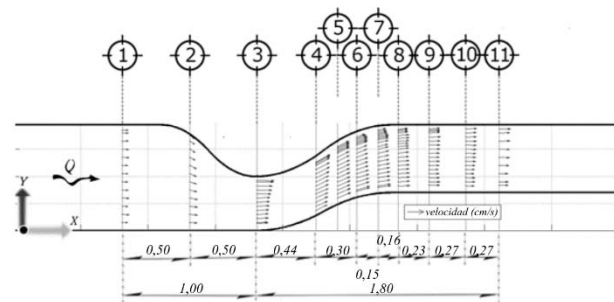


Figura 3.- Secciones de medición y vectores de velocidad.

En la Figura 4 se presenta la fotografía del dispositivo experimental; inicia en un tramo recto con ancho constante de $b = 0,78 \text{ m}$, por la presencia de la curva (cóncava a convexa) llega a un ancho mínimo de $0,40 \text{ m}$ (sección 3), invierte el desarrollo de la curva (convexa a cóncava) de manera gradual hasta alcanzar un ancho de $0,50 \text{ m}$ y retomar nuevamente la trayectoria original (recta).

Pruebas experimentales

Se desarrollaron siete pruebas; el caudal empleado en cada prueba fue de $Q \cong 0,01055 \text{ m}^3/\text{s}$, con tirantes $y \cong 0,15 \text{ m}$, medido en la sección 11 ($X = 12,61 \text{ m}$). En cada punto indicado en la Figura 3, se realizó el registro de los tres componentes de la velocidad a una profundidad de $0,4 \text{ y}$ medido desde la plantilla del canal. Los datos se filtraron con los parámetros de calidad superior al 20 dB y 90% de correlación, aunque estos parámetros dependen de las partículas que viajan en el fluido. El intervalo de tiempo de medición se estableció de 180 s en todos los casos. En el trabajo se describen brevemente las condiciones para los escenarios restantes.



Figura 4.- Dispositivo experimental.

Descripción de resultados experimentales

En la Figura 5 se incluyen las distribuciones medidas de las tres primeras pruebas realizadas a la misma profundidad ($0,4y \cong 0,06\text{ m}$), en la sección 6. Se observa que hasta el 80% del ancho del canal, la relación u/U (componente/velocidad de referencia) es similar, sin embargo, en el 20% restante existen diferencias, lo que indica que en esa zona la velocidad no se distribuye de manera uniforme, en condiciones similares.

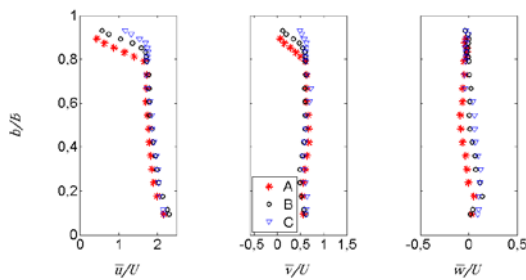


Figura 5.- Distribuciones de la velocidad $0,4y$ (Pruebas A, B y C, a la misma profundidad).

Posteriormente, se realizaron dos mediciones a dos profundidades distintas de 4 y 2 cm (medido desde la plantilla del canal), pruebas D y E, respectivamente; las distribuciones obtenidas en la sección 6 se presentan en la Figura 6. Se observa que la relación u/U de 0 hasta el 80% del ancho del canal es similar en la profundidad, no así en el 20% restante en donde el patrón difiere.

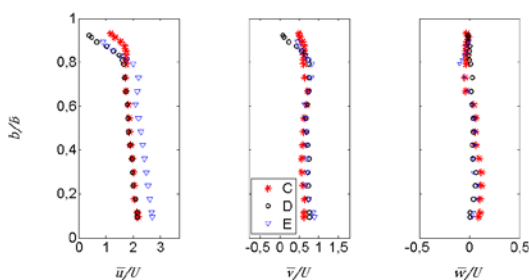


Figura 6.- Distribuciones de la velocidad (Pruebas C, D y E, a distinta profundidad).

Esto demuestra físicamente que la hipótesis de flujo 2DH no se cumple en la zona de interés, y muestra claramente efectos

tridimensionales ocasionados por el desarrollo de corrientes secundarias, a menos que se incluya la corrección correspondiente (Finnie *et al.*, 1999). La discusión y características de las pruebas se amplían en la versión completa.

Modelación Matemática 3D

El cálculo de la hidrodinámica se hizo con el sistema *Telemac – Mascaret 3D* (EDF- R&R, 2016). El modelo permite resolver la versión de las ecuaciones de Navier-Stokes, con ciertas consideraciones (Hervouet, 2007); en la etapa de preproceso, se define la geometría del modelo y se establecen las condiciones de frontera, se emplea la herramienta Blue Kenue (CHC, 2011); el dominio de cálculo se define por elementos de forma triangular y se utiliza la técnica de elementos finitos. El análisis tiene en cuenta la influencia del efecto por fricción en la pared, el modelo de turbulencia $k - \epsilon$ (Nezu y Nakagawa, 1993) y la calibración del coeficiente de rugosidad de fondo. Además, se determinan las diferencias entre los componentes medidos y calculados, los cuales se describen en la versión completa del documento.

En la Figura 7 se muestran las líneas de corriente del campo de velocidades obtenido del análisis numérico, correspondiente a la versión 3D. Las líneas de corriente cerca de la superficie libre, se contraen al entrar a la sección más estrecha y después se desvían hacia la margen izquierda (MI); este efecto es mayor para las líneas de corriente que son más cercanas a la margen derecha (MD). Por otro lado, las líneas de corriente localizadas en el fondo, se desvían de las líneas de corriente superiores, y tienen una mayor gradiente transversal, llegando incluso a cruzar todo el canal, desde la MI a la MD; posteriormente siguen una trayectoria similar a la de la MD y a la salida de la curva el comportamiento es más complicado, en planta es posible ver líneas senoidales y no rectas.

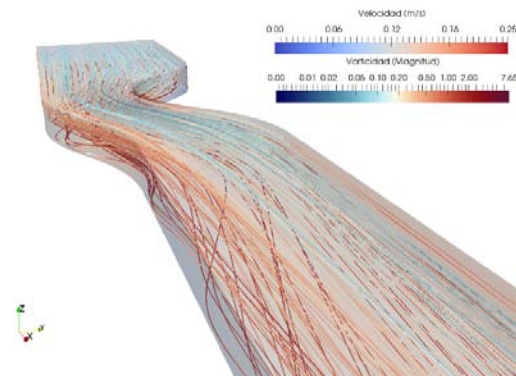


Figura 7.- Líneas de corriente.

Referencias

- Caballero, A, Jiménez, A, Berezowsky, M y Martínez, A. (2017). *Importancia del tamaño de los elementos de la malla y de la turbulencia en la modelación matemática de la hidrodinámica*, Memorias del XXIV Congreso Nacional de Hidráulica, AMH, Acapulco, Guerrero, México.
- CHC (2011). *Reference Manual*, National Research Council, Canada.
- EDF-R&D. (2016). Software, *TELEMAC MODELLING SYSTEM, 3D hydrodynamics*, Operating Manual, Release 7.1.
- Finnie, J, Donnell, B, Letter, J y Bernard, R. (1999). Secondary Flow Correction for Depth-Averaged Flow Calculations. *Journal of Engineering Mechanics*. 125 (7).
- Hervouet, J. (2007). *Hydrodynamics of free surface flows: Modelling with the finite element method*. John Wiley and Sons.
- Jiménez, A. y Berezowsky, M. (2004) "Modelación del flujo bidimensional horizontal con coordenadas curvilíneas generales", *Serie Investigación y Desarrollo (SID/641)*, Instituto de Ingeniería, UNAM, México.
- Nezu, I. y Nakagawa, H. (1993). *Turbulence in open-channel flows*, Balkema, Rotterdam.