

Medición simultánea de velocidades de las fases sólida y líquida del flujo en canales

Pedro Guido
Jorge Rojas
Guadalupe Huelsz

Universidad Nacional Autónoma de México

En el presente trabajo se desarrolla un método para la medición simultánea de campos de velocidad de la fase sólida y de la fase líquida del flujo en canales con transporte de partículas en suspensión utilizando la técnica de velocimetría por imágenes de partículas (PIV). Se propone el uso de partículas fluorescentes de diferente tamaño, una para cada fase, y el empleo de un proceso de correlación adaptable para el cálculo de velocidades en zonas con pocas partículas. Como fase sólida se usaron partículas plásticas con un diámetro de 63 a 105 μm , teñidas con rodamina, con capacidad de emitir luz con una longitud de onda de 570 nm. Para la fase líquida se utilizó agua y para determinar su velocidad se agregaron, como trazadores, microesferas fluorescentes de origen polimérico, con diámetro comprendido entre 13 y 16 μm , con una emisión de 520 nm. Se usaron dos cámaras de video; a cada una se le colocó un filtro que sólo dejó pasar la luz emitida por las partículas de una de las fases. Mediante el proceso de correlación adaptable se determinaron los campos vectoriales de velocidad correspondientes a cada fase, cuya superposición permitió el análisis del comportamiento relativo de las mismas y la verificación de la capacidad de resolución espacial y temporal del sistema utilizado. El éxito logrado con este método abre el camino para nuevos estudios de la compleja interacción entre las estructuras del flujo y las partículas en suspensión en flujos bifásicos en canales.

Palabras clave: medición de velocidad, flujo bifásico, flujo en canales, PIV.

Introducción

Sistemas donde se tiene un flujo turbulento, de gases o de líquidos, con partículas sólidas en suspensión, se pueden encontrar en múltiples procesos industriales y medioambientales. Una inadecuada predicción de las interacciones partícula-turbulencia puede ser la causa de accidentes en los sistemas neumáticos que se emplean en la conducción de materiales granulares (harina de trigo, cloruro de polivinilo o PVC, entre otros) (Maulbetsch, 1994). El transporte de sedimentos, en combinación con contaminantes, juega un papel predominante en la hidrodinámica de cuerpos de agua, grandes lagos o presas, y en las corrientes superficiales o subterráneas que los alimentan (Sivakumar y Jayawarda, 2003).

Hay muchos trabajos de investigación publicados que han contribuido al mejor entendimiento de la interacción entre el flujo de un fluido y las partículas en suspensión mediante técnicas numéricas y experimentales. Algunos ejemplos son Nakagawa y Nezu (1993), Fessler *et al.* (1994), Kaftori *et al.* (1995), García *et al.* (1995), Bennett y Best (1995), y Espinoza *et al.* (2000). No obstante los avances logrados, se requiere de más estudios, principalmente experimentales, que usen nuevas técnicas de medición y que provean información detallada sobre dicha interacción.

Las técnicas clásicas para hacer mediciones de velocidad en flujos turbulentos, tales como anemometría de hilo caliente (Bruun, 1995) y anemometría láser Doppler (Drain, 1980), dan una resolución espacial y temporal muy buena, pero tienen la desventaja de

medir en un solo punto a la vez (Goldstein, 1996). Una técnica alternativa, desarrollada hace pocos años, es la velocimetría por imágenes de partículas (PIV: *particle image velocimetry*), que tiene la ventaja de medir velocidades en un plano. Sin embargo, en la actualidad, la resolución temporal de este equipo todavía es baja (Stanislas *et al.*, 2003; Prasad, 2000).

Para la medición de velocidades en flujos bifásicos se cuenta con la técnica de análisis dinámico de partículas PDA —que mide en un punto el tamaño, la velocidad y concentración de partículas de la fase dispersa (Dantec, 2003, y Aisa *et al.*, 2002)— y con una variante de la velocimetría por imágenes de partículas que utiliza pequeñas partículas fluorescentes como trazadores para los campos de velocidad de la fase líquida y partículas no fluorescentes, de mayor diámetro, como fase sólida (Dreier *et al.*, 2000).

En este trabajo se presenta el desarrollo de un método para la medición simultánea de las velocidades de la fase líquida y de la fase sólida del flujo en canales con transporte de partículas en suspensión, usando la técnica PIV con dos cámaras, filtros ópticos y partículas fluorescentes de diferente tamaño, uno para cada fase. Se hicieron experimentos en un pequeño canal, donde se demostró la utilidad del método propuesto.

Arreglo experimental

Se utilizó un sistema PIV, marca Dantec, para la medición simultánea de velocidades, que incluyó dos cámaras, cada una dotada de un filtro, como se muestra esquemáticamente en la ilustración 1. Uno de los filtros permite el paso de la luz emitida por las partículas trazadoras de la fase líquida, con una longitud de onda de 520 nm. Con la segunda cámara y su respectivo filtro se registró la luz con una longitud de onda de 570 nm, emitida por las partículas correspondientes a la fase sólida. La resolución espacial de las cámaras es de 1,008 (horizontalmente) x 1,016 (verticalmente) píxeles y el área de cada píxel es de nueve micrones cuadrados. Las cámaras pueden tomar un máximo de 15 pares de imágenes por segundo y es posible controlar el tiempo entre imágenes de cada par y entre pares de imágenes. El tiempo mínimo entre imágenes de cada par es del orden de 1 μ s y el tiempo mínimo entre pares es 66.66 ms. La fuente de luz empleada para hacer visibles las partículas trazadoras consistió en un láser pulsante de doble cavidad del tipo Nd:YAG. El procesamiento de las imágenes se hizo mediante el programa *FlowMap* de Dantec.

Para probar el método se realizaron experimentos en un canal abierto de 1.00 m de largo, 0.05 m de ancho y 0.10 m de altura. A 0.67 m de la entrada del canal se

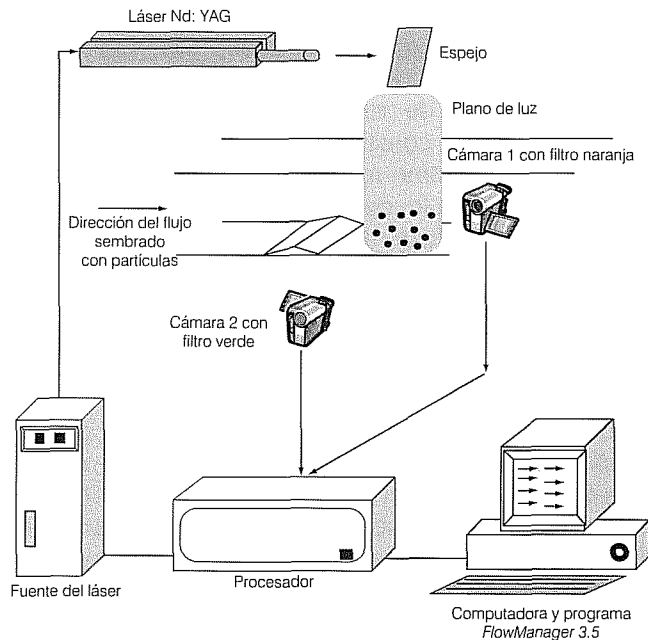
instaló una forma de fondo que simuló una duna de río con altura de 2 mm y 34 mm de largo. Como fluido de trabajo se empleó agua destilada. En los experimentos, la altura de la lámina de agua era de 0.015 ± 0.001 m. La zona de pruebas se localizó a 0.70 m de la entrada del canal. Se empleó una bomba de 1/40 hp, con capacidad para bombear 0.32 l/s. El gasto Q se controló conectando la bomba a un autotransformador. La ilustración 2 muestra un esquema del canal y del sistema de recirculación y el cuadro 1 presenta los datos experimentales más relevantes. Como fase sólida se emplearon partículas plásticas con un diámetro de entre 63 y 105 μ m teñidas con rodamina. Para la fase líquida se utilizó agua con microesferas fluorescentes de origen polimérico, utilizadas como trazadores, con diámetro comprendido entre 13 y 16 μ m.

Método para la medición de velocidades

Para la medición simultánea de velocidades de las fases líquida y sólida no resultó práctico el método reportado por Dreier *et al.* (2000) de usar partículas no fluorescentes como fase sólida. Para aplicarlo se requería el uso de agua ultra pura, sin ningún tipo de partículas que afectara la medición de la fase sólida. En su lugar, se optó por usar los dos tamaños de partículas fluorescentes previamente mencionados; las partículas de mayor tamaño y menor concentración eran las correspondientes a la fase sólida. Las fases se separaron ópticamente mediante filtros, ya que la longitud de onda de la luz emitida por cada grupo de partículas era diferente. La zona de análisis se iluminó con un plano de luz generado mediante un láser pulsado. El tiempo entre pulsos se seleccionó en función de la velocidad media del flujo y se sincronizó con la toma de las imágenes. Con un par de cámaras de alta resolución, ubicadas una frente a la otra en ángulo recto al plano iluminado, se tomaron pares de fotos de los trazadores y de los sólidos en suspensión, una foto en un tiempo t y la segunda en un tiempo $t+dt$. El área de medición se subdividió en regiones rectangulares más pequeñas, llamadas áreas de interrogación. En cada par de áreas de interrogación se aplicó una correlación que dio como resultado un vector de desplazamiento promedio de las partículas que se encontraban presentes. Repitiendo este procedimiento para todos los pares de áreas de interrogación, se obtuvo un mapa de vectores de desplazamiento promedio de las partículas. Si se dividen los desplazamientos por el tiempo entre imágenes, éstos se convierten en vectores de velocidad.

El programa *FlowMap* calcula el desplazamiento promedio de las partículas que se encuentran en cada

Ilustración 1. Dispositivo instrumental para mediciones simultáneas de velocidades en el canal.



área de interrogación mediante una correlación cruzada. A partir de la mayor correlación se determina el vector de desplazamiento más probable del conjunto de partículas.

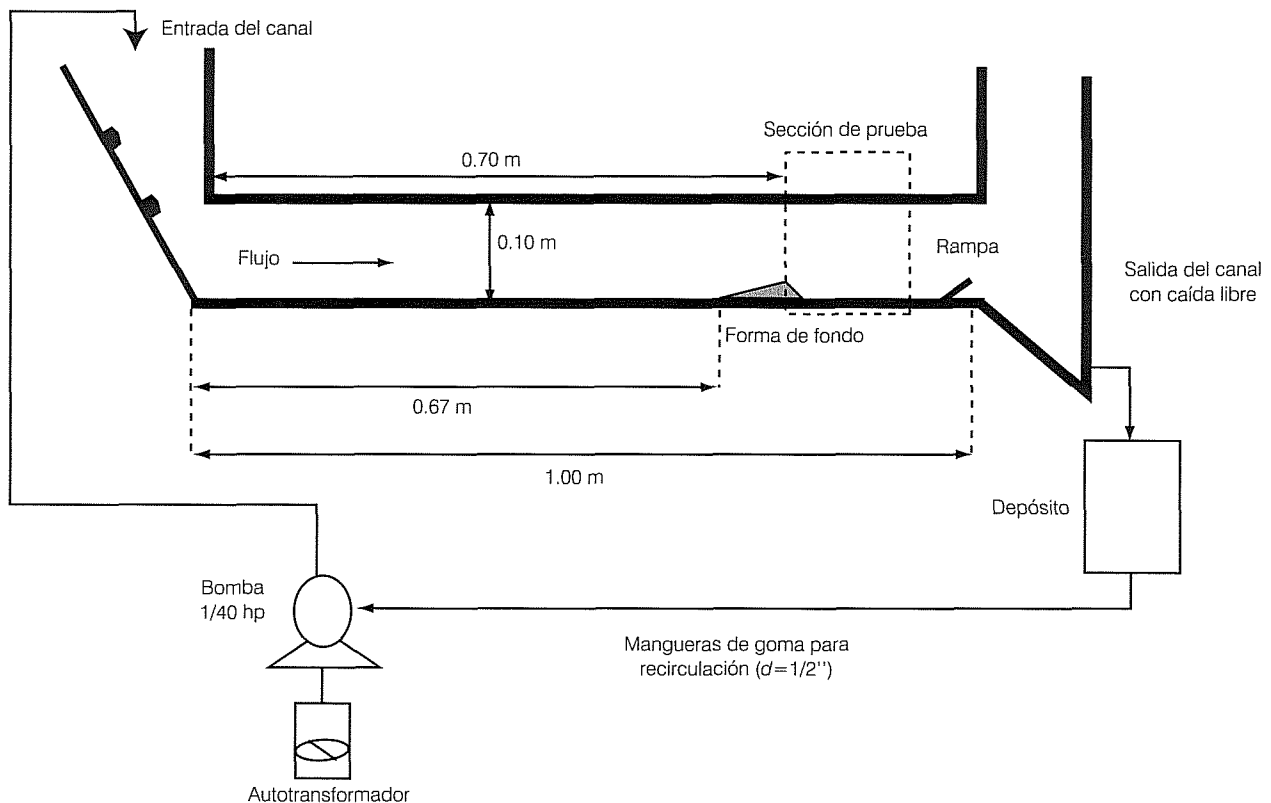
Cálculo de la correlación cruzada

La función de correlación cruzada entre I e I' está dada por (Raffel *et al.*, 1998):

$$R_{II'}(x, y) = \sum_{i=-K}^K \sum_{j=-L}^L I(i, j) \cdot I'(i + x, j + y) \quad (1)$$

donde I e I' son las intensidades de luz registradas en cada área de interrogación en un tiempo t y en otro $t + \Delta t$, respectivamente. K y L son las semilongitudes del área de interrogación en las direcciones x e y , respectivamente. Para cada desplazamiento (x, y) del área de interrogación de la segunda imagen, con respecto a su correspondiente en la primera imagen, la suma de los productos de las intensidades produce un valor de correlación cruzada $R_{II'}(x, y)$. El valor (x, y) en el

Ilustración 2. Diagrama esquemático del canal y sistema de recirculación.



Cuadro 1. Datos relevantes de los experimentos.

Parámetro	Valor
Forma de fondo	Duna
Altura h (mm)	2
Largo L (mm)	34
Ángulo de inclinación, lado aguas abajo	45°
Altura desde el fondo del canal a la superficie libre H (mm)	15±1
Velocidad de referencia en $x/h=3$, $y/H=0.66$, U_{ref} (m/s)	—
Fase líquida	0.134±0.001
Fase sólida	0.135±0.001
Razón de la altura de la forma de fondo respecto de su longitud (mm/mm)	—
Vanoni y Hwang, 1967; Freedsoe, 1982. h/L	0.06
Razón de expansión ER ($H-h$)/($H-2h$)	1.18
Número de Reynolds, $R=U_{ref} \cdot H/\nu$	2,010

plano de correlación, con el máximo valor de correlación cruzada, se emplea como un estimador directo del desplazamiento de las partículas.

El cálculo de la correlación cruzada por medio de la ecuación (1) implica un gran número de operaciones y, por consiguiente, un alto consumo de tiempo de máquina. Existe la posibilidad de simplificar esto aplicando el teorema de correlación, el cual establece que la correlación cruzada de dos funciones es equivalente a la multiplicación del conjugado complejo de sus transformadas de Fourier, esto es:

$$R_{ff'} \rightarrow \hat{f} \cdot \hat{f'}^* \quad (2)$$

donde $\hat{f}$ es la transformada de Fourier de la función f e $\hat{f'}^*$, es el conjugado de la transformada de Fourier de f' . El tiempo de máquina para hacer estas operaciones es mucho menor, permitiendo obtener resultados casi en tiempo real.

Uno de los criterios más utilizados para la validación de los resultados obtenidos de la correlación es el conocido como criterio de detección, que está dado por:

$$\frac{\text{Máximo valor de la función de correlación}}{\text{Segundo valor de la función de correlación}} \geq Cd \quad (3)$$

Keane y Adrian (1992) recomiendan $Cd=1.2$. Para que el cálculo del desplazamiento de partículas mediante correlación cruzada sea confiable, se requiere que en cada una de las áreas de interrogación se tengan al menos cinco partículas (Willert y Gharib, 1991). En los experimentos de este trabajo, la concentración de partículas que constituían la fase sólida era muy baja, lo que dio como resultado imágenes con pocas partículas. El cálculo de los desplazamientos de las partículas de esta fase mediante la correlación cruzada implicaba usar áreas de medición muy grandes, lo que acarrearaba una gran pérdida de resolución espacial. Para reducir este efecto se utilizó el proceso de correlación adaptable, que fue propuesto originalmente para casos de flujos con zonas de fuertes gradientes de velocidad donde era difícil mantener en las áreas de interrogación un número razonable de partículas correspondiente a la zona de alta velocidad (Scarano y Riethmuller, 1999). El proceso involucra el uso de la correlación cruzada y el desplazamiento de la malla en el mismo sentido del flujo de la segunda imagen. Este desplazamiento hace que se incluya la mayor cantidad posible de partículas que de otra manera saldrían del área de interrogación debido a su movimiento en el plano. Esto permite un refinamiento de malla, con lo que se aumenta la resolución espacial.

El proceso de correlación adaptable se lleva a cabo por etapas. Primero se calcula el campo de velocidades mediante una correlación cruzada utilizando una malla gruesa que asegure obtener más del 95% de vectores que cumplan con el criterio de que el desplazamiento sea menor o igual a un cuarto de la máxima longitud del área de interrogación y de esta forma garantizar la permanencia de las partículas en el área de interrogación. Al resultado se le aplica un criterio de validación. Con este resultado se estima un corrimiento a las áreas de interrogación de la segunda fotografía y se hace un refinamiento de malla. Se calculan los nuevos vectores de velocidad mediante una correlación cruzada, teniendo en cuenta que la segunda imagen se ha desplazado y se aplica nuevamente el criterio de validación. Si se logra un buen resultado, se puede estimar un nuevo corrimiento y refinar aún más la malla. En caso contrario, el proceso termina en el resultado anterior.

Los criterios de validación más recomendados para ser aplicados en cada paso del proceso de correlación adaptable son el de detección, anteriormente mencionado, y el de promedio de vecinos, el cual permite validar o rechazar vectores, basándose en una comparación entre vectores vecinos. El método consiste en calcular el promedio de los vectores en una vecindad rectangular del vector que se va a validar y compararlo con el vector

seleccionado. Considerando que el vector a validar tiene una posición (x, y) , y la vecindad tiene un tamaño (m, n) , correspondiente a los vectores vecinos disponibles, el promedio de vecinos para los vectores internos se calcula con la fórmula:

$$\bar{\mathbf{v}}(x, y) = \frac{1}{(m \ n) - 1} \sum_{i=x-(m-1)/2}^{x+(m-1)/2} \sum_{j=y-(n-1)/2}^{y+(n-1)/2} \mathbf{v}(i, j) \quad (4)$$

Esta validación no se aplica en las fronteras. El vector se rechaza si:

$$\|\mathbf{v}(x, y) - \bar{\mathbf{v}}(x, y)\| > k \quad (5)$$

donde k es un número que se obtiene multiplicando el llamado factor de aceptación, α , por la máxima diferencia entre cada vector de la vecindad, $\mathbf{v}(x, y)$, y el vector promedio:

$$k = \alpha \max_{x, y} \|\mathbf{v}(x, y) - \bar{\mathbf{v}}(x, y)\| \quad (6)$$

Si el factor de aceptación se fija en uno, todos los vectores se validan; mientras que si se fija en cero, todos los vectores son rechazados. Se recomienda un valor entre 0.1 y 0.01. Un vector rechazado puede ser sustituido por el vector promedio de los vecinos.

Las condiciones iniciales que se fijen al momento de implementar el proceso de correlación adaptable son muy importantes para mantener una buena validación en las subsecuentes iteraciones. Se debe iniciar el proceso con el tamaño de malla más pequeño posible que asegure se tienen al menos cinco partículas en cada área de interrogación y produzca al menos el 95% de vectores validados con los dos criterios mencionados.

Resultados

En el análisis del flujo en canales con formas de fondo fijas, la zona de recirculación juega un papel muy importante (Palacios-Gallegos *et al.*, 2001). Sin embargo, en esta parte del trabajo nos enfocamos únicamente en el flujo por encima de dicha recirculación, donde se espera que la fase sólida siga fielmente a la fase líquida. Esto nos permitió saber si la medición simultánea de velocidades se realizó correctamente. Por tanto, el área total de medición fue de 17x12 mm (1,008x768 pixeles), correspondiente a la parte superior del canal. En los resultados que se presentan a continuación se seleccionó un tiempo entre imágenes de 2000 μ s, que

en áreas de interrogación de 64x64 pixeles permite que las partículas de la zona de interés recorran menos de una cuarta parte de dicha área.

En la aplicación de la correlación adaptable para la fase líquida se inició con áreas de 256x256 pixeles hasta llegar a las de 64x64 y sobreposición (*overlap*) del 50% en las dos direcciones (30x23 vectores). En el caso de la fase sólida, se inició la aplicación de la correlación adaptable con áreas de 512x512 pixeles y el tamaño más pequeño al que se pudo llegar fue de 256x256 pixeles (12x9 vectores). La sobreposición aplicada fue del 75% también en las dos direcciones.

La ilustración 3 muestra las partículas de la fase líquida en suspensión con su correspondiente campo vectorial de velocidades y la ilustración 4 muestra los trazadores con el campo de velocidades de la fase sólida, ambas figuras corresponden a imágenes tomadas al mismo tiempo. Al comparar estas dos ilustraciones se aprecia cómo los vectores de velocidad de la fase sólida son, en casi todos los puntos, iguales a los correspondientes a la fase líquida.

Con el fin de comparar cuantitativamente las velocidades de las dos fases, en la ilustración 5 se presenta un perfil representativo del flujo con los valores de las velocidades axiales promedio local. La muestra para obtener los valores promedio consistió en 15 datos en cada punto, con un intervalo de tiempo de 4.5 s. Por ejemplo, el valor medio de la velocidad para la fase líquida, en el punto $x/h=3.1$, $y/H=0.66$, fue de 0.134 m/s y la desviación estándar, $\sigma_v = \pm 0.01$ m/s; es decir, un 7.5% de variación con respecto al valor medio. Para la fase sólida, el valor medio de la velocidad en $x/h=3.1$, $y/H=0.66$ fue de 0.135 m/s y una desviación estándar $\sigma_v = \pm 0.01$ m/s, que representa una variación de 7.4%.

Los vectores de velocidad de las dos fases se validaron usando los criterios de detección y de promedio de vecinos previamente mencionados. Para el primer criterio se usó $Cd=1.2$ y para el segundo, $\alpha=0.01$. Para la fase líquida se calcularon 690 vectores para cada mapa de vectores de los cuales, en promedio, 26 vectores no cumplieron los criterios; esto representa el 3.8% de vectores erróneos, que fueron sustituidos por el valor promedio de sus vecinos. En la fase sólida se calcularon 108 vectores por mapa; se obtuvo un promedio de cinco vectores que no cumplieron los criterios, esto representa el 4.6% de vectores erróneos, que fueron sustituidos.

Conclusiones

Se empleó un sistema de velocimetría por imágenes de partículas (PIV) con dos cámaras sincronizadas

Ilustración 3. Imagen de trazadores con el campo vectorial de velocidades correspondiente a la fase líquida (se presenta uno de cada dos vectores en la dirección x).

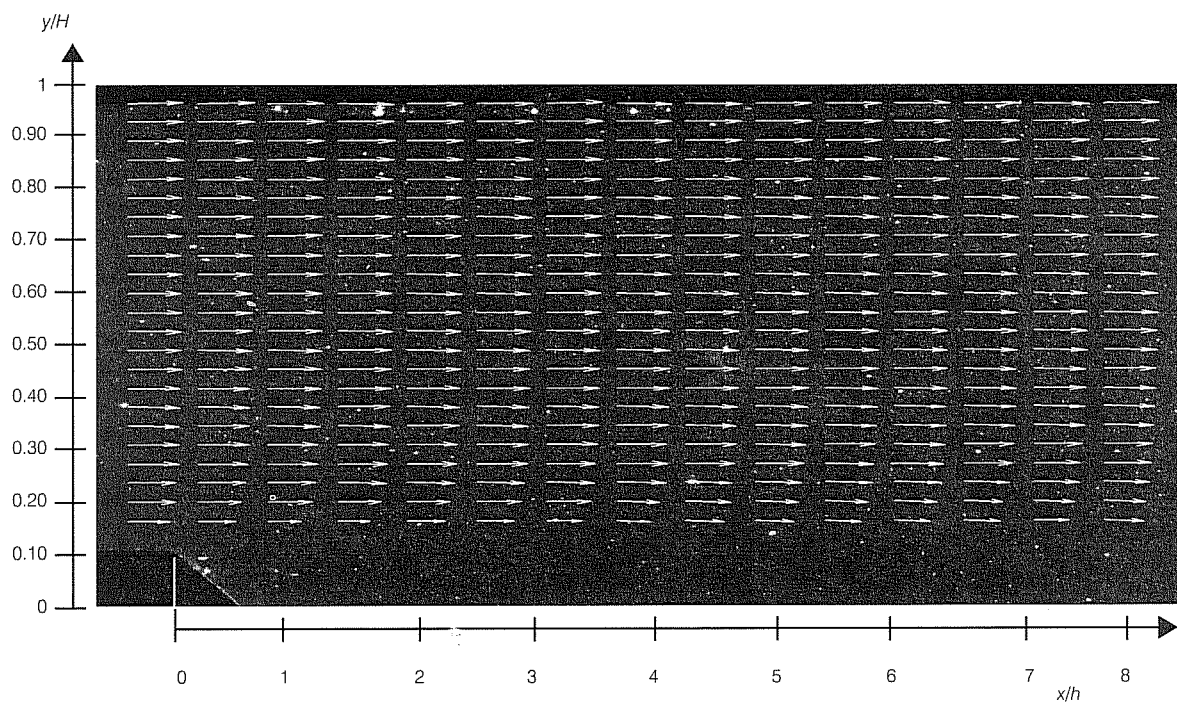


Ilustración 4. Imagen de partículas en suspensión con el campo vectorial de velocidades correspondiente a la fase sólida.

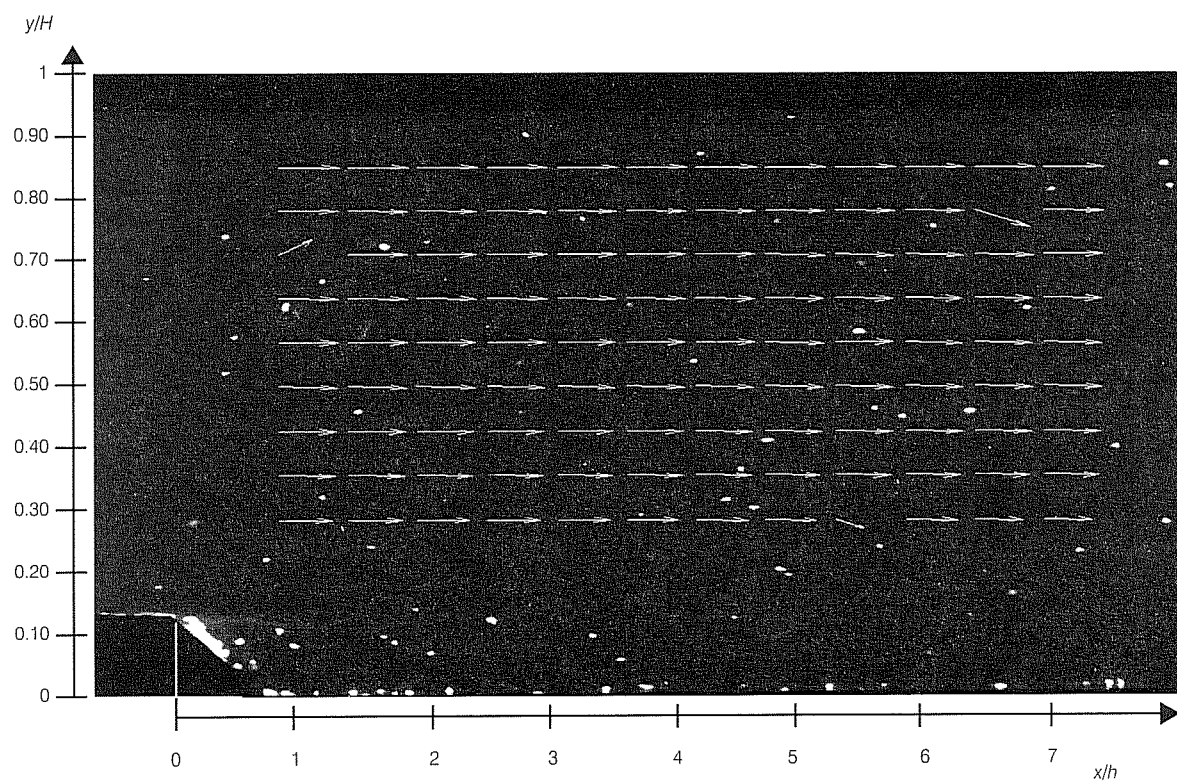
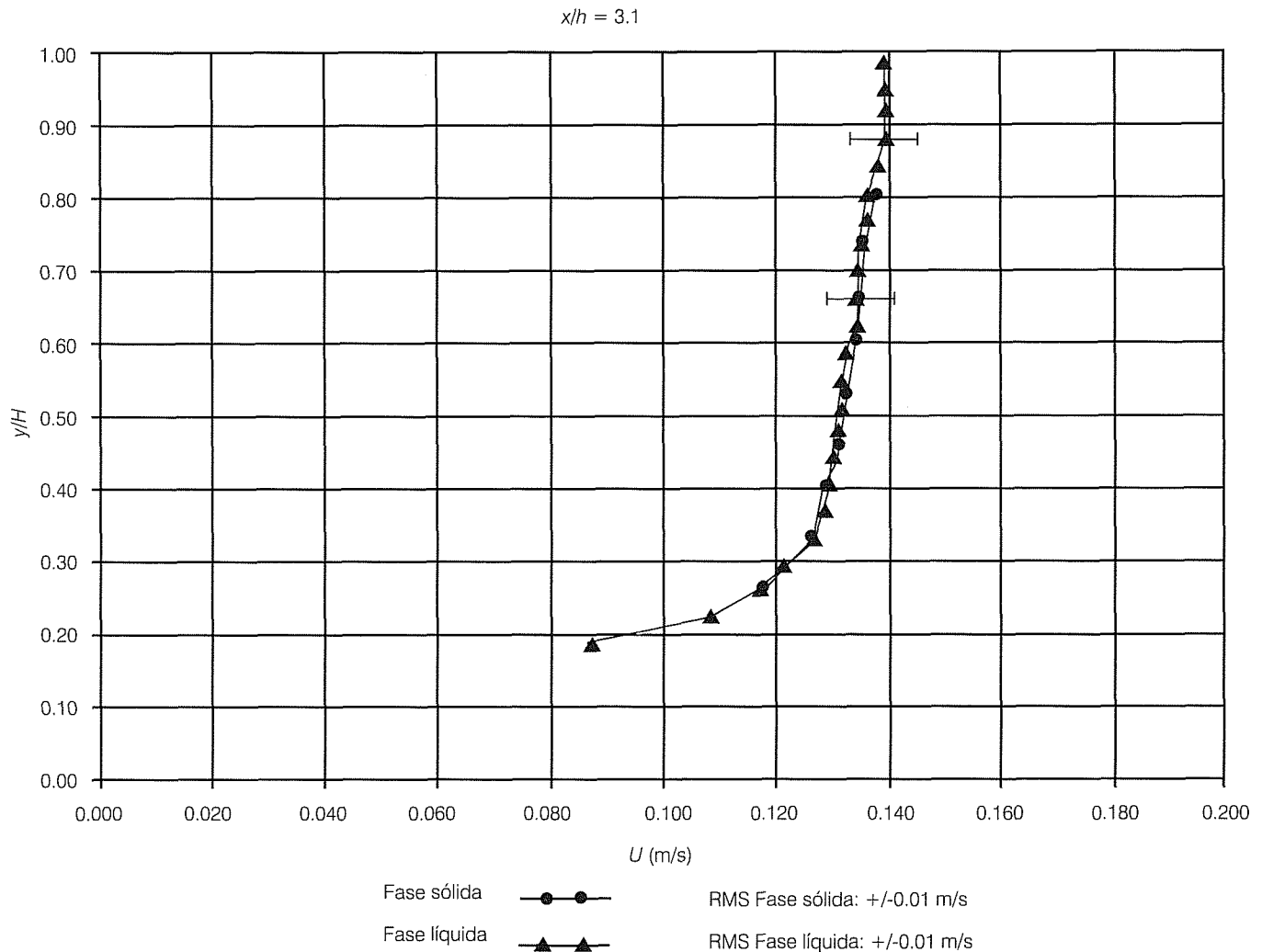


Ilustración 5. Perfil de velocidad media local de la componente axial.



para medir la velocidad de la fase líquida y de la fase sólida, en el flujo de agua con sólidos en suspensión. A diferencia de Dreier *et al.* (2000), que sólo usaron partículas fluorescentes para la fase líquida, las fases se separaron utilizando partículas fluorescentes de diferente tamaño y distinta longitud de onda de la luz dispersada, en combinación con filtros ópticos que solamente permitieron el paso de la luz correspondiente. Esto aseguró una mejor separación de fases.

Para el cálculo de los vectores de velocidad en áreas de interrogación con pocas partículas, como ocurrió en el caso de las imágenes correspondientes a la fase sólida, el proceso de correlación adaptable (*adaptive correlation*) resultó más adecuado que la correlación cruzada (*cross correlation*). Con este proceso y una sobreposición de 75% en las dos direcciones, se logró

una resolución espacial de los vectores de velocidad de 12x9, el doble de lo que se tendría con una correlación cruzada y la misma sobreposición.

Los vectores de velocidad de ambas fases se validaron empleando los criterios de detección y de promedio de vecinos con menos del 5% de vectores rechazados.

La medición simultánea de las velocidades de la fase sólida y la fase líquida se validó en un punto representativo de la zona de análisis, donde las velocidades promedio fueron casi idénticas (diferencias menores al 0.7%) y sus desviaciones estándar estuvieron entre 7 y 8%.

La velocimetría por imágenes de partículas, que es la base del método propuesto, tiene la ventaja de ser una técnica no intrusiva y que proporciona información de velocidad en varios puntos al mismo tiempo dentro de un

área de medición. Se puede lograr una buena resolución espacial, pero con el equipo actual, la resolución temporal está limitada a 15 mapas de velocidad por segundo. Los filtros ópticos son elementos eficientes y de bajo costo para separar emisiones con diferente longitud de onda; sin embargo, las partículas fluorescentes (emisoras) tienen como desventaja su alto costo.

Agradecimientos

Al ingeniero Guillermo Hernández por su apoyo en la realización de los experimentos, al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt), proyecto U41347-F, a PAPPIT-UNAM proyecto IN109602, y a la Secretaría de Relaciones Exteriores de México por la beca de maestría otorgada a Pedro Guido.

Recibido: 21/01/2004
Aprobado: 22/07/2004

Referencias

- AISA, L., GARCIA, J.A. y CERECEDO, L.M. Particle concentration and local mass flux measurements in two-phase flows with PDA. Application to a study on the dispersion of spherical particles in a turbulent air jet. *International journal of multiphase flow*. Vol. 28, 2002, pp. 301-324.
- BENNETT, S.J. y BEST, J.L. Mean flow and turbulence structure over fixed, two-dimensional dunes: Implications for sediment transport and bedform stability. *Sedimentology*. Vol. 42, 1995, pp. 491-513.
- BRUUN, H.H. *Hot-wire anemometry. Principles and signal analysis*. New York: Oxford Science Publications, 1995.
- DANTEC MEASUREMENT TECHNOLOGY. Integrated solutions in particle dynamics analysis (PDA). Publicación 103-104-02. [en línea]. Página web en internet: www.dnatecmt.com/Download/pdf_files/PDABROC04.pdf, 2003.
- DRAIN, L.E. *The laser doppler technique*. A Wiley-Interscience Publication. Norwich: John Wiley and Sons, 1980.
- DREIER, T., BLASER, S., KINZELBACH, W., VIRANT, M. y MAAS, H-G. Simultaneous measurement of particle and fluid velocities in a plane mixing layer with dispersion. *Experiments in fluids*. Vol. 29, 2000, pp. 486-493.
- ESPINOZA, J., MARTÍNEZ-AUSTRIA, P., ROJAS, J. y ÁVILA, F. Análisis del flujo en un canal de laboratorio con formas de fondo fijas. *Ingeniería hidráulica en México*. Vol. XV, núm. 2, 2000, pp. 75-84.
- FESSLER, J.R., KULICK, J.D. y EATON, J. Turbulence modification by particles in a backward-facing step flow. *Journal of fluid mechanics*. Vol. 394, 1994, pp. 97-117.
- FREDSOE, J. Shape and dimensions of stationary dunes in rivers. *Journal of hydraulic Div., ASCE*. Vol. 108, 1982, pp. 932-497.
- GARCÍA, M., LÓPEZ, F y NIÑO, Y. Characterization of near-bed coherent structure in turbulent open channel flow using synchronized high-speed video and hot film measurements. *Experiments in fluids*. Vol. 19, 1995, pp. 16-28.
- GOLDSTEIN, R.J. *Fluid mechanics measurements*. Segunda edición. New York: Taylor and Francis, 1996.
- KAFTORI, D., HETSRONI, G. y BANERJEE S. Particle behavior in the turbulent boundary layer. I. Motion, deposition, and entrainment. *Physics of fluids*. Vol. 7, 1995, pp. 1095-1106.
- KEANE, D.R. y ADRIAN, R.J. Theory of cross-correlation analysis of PIV images. *Applied scientific research*. Vol. 49, 1992, pp. 191-215.
- MAULBETSCH, J. Fundamental studies of particle – turbulence interaction. *EPRI Journal*. Vol. 19, 1994, pp. 34-36.
- NAKAGAWA, H. y NEZU, I. *Turbulence in open-channel flows*. International Association for Hydraulic Research. Rotterdam: Monograph Series. 1993.
- PALACIOS-GALLEGOS, M.J., ESPINOZA, J. y ROJAS, J. Numerical and experimental analysis of the flow downstream of a fixed bed form in an open-channel. *V Latin American and Caribbean Congress on Fluid Mechanics*. Caracas, Venezuela, 2001, pp. IMF1-1 - IMF1-4.
- PRASAD, A.K. Particle image velocimetry. *Current science*. Vol. 79, 2000, pp. 51-60.
- RAFFEL, M., WILLERT, C. y KOMPENHANS, J. *Particle image velocimetry*. Berlín: Springer-Verlag, 1998.
- SIVAKUMAR, B. y JAYAWARDA, A.W. Sediment transport phenomenon in rivers: an alternative perspective. *Environmental modeling software*. Vol. 18, 2003, pp. 831-838.
- SCARANO, F. y RIETHMULLER, M.L. Iterative multigrid approach in PIV image processing with discrete window offset. *Experiments in fluids*. Vol. 26, 1999, pp. 513-523.
- STANISLAS, M., OKAMOTO, K. y KAHLER, C. Main results of the First International PIV Challenge. *Measurement Science & Technology*. Vol. 14, 2003, pp. R63-R89.
- VANONI, V.A. y HWANG L. Relation between bed forms and friction in streams. *Journal of Hydraulic Div., ASCE*. Vol. 93, 1967, pp. 121-144.
- WILLERT, C.E. y GHARIB, M. Digital particle image velocimetry. *Experiments in fluids*. Vol. 10, 1991, pp. 181-193.

Abstract

GUIDO, P., ROJAS, J. & HUELSZ, G., *Simultaneous measurement of the solid and liquid phase velocities of flow in channels*. Hydraulic engineering in Mexico (in Spanish). Vol. XX, no. 3, July-September, 2005, pp. 21-29.

A method for the simultaneous measurement of the solid and liquid phase velocity fields of flow in channels with suspended solids was developed using the Particle Image Velocimetry technique (PIV). The use of fluorescent particles of different sizes, one for each phase, was proposed. Plastic particles of 63 to 105 μm in diameter, painted with rodamine to scatter light at 570 nm, were used as the solid phase. Water was the liquid phase, seeded with fluorescent microspheres of 13 to 16 μm in diameter scattering at 520 nm. Two video cameras equipped with appropriate optical filters that allow the passing of scattered light of the particles of one of the phases were used. Using an adaptive correlation process, the velocity field of each phase was obtained and their superposition permitted the analysis of the relative behavior and the verification of the spatial and temporal resolution of the system used. The successful results obtained with this method open the way for new studies of the complex interaction between flow structures and suspended particles in two-phase channel flows.

Keywords: velocity measurement, two-phase flow, channel flow, PIV.

Dirección institucional de los autores:

M. en I. Pedro Guido-Aldana

Estudiante de doctorado.
Centro de Investigación en Energía,
Universidad Nacional Autónoma de México,
teléfono: + (52) (777) 325 0052, extensión 29782,
paga@cie.unam.mx

Dr. Jorge Rojas-Menéndez

Investigador titular.
Centro de Investigación en Energía,
Universidad Nacional Autónoma de México,
Apartado Postal 34, 62158 Temixco, Morelos, México,
teléfono: + (52) (777) 325 0052, extensión 29707,
teléfono: + (52) (55) 5622 9707,
jrm@cie.unam.mx

Dra. Guadalupe Huelsz-Lesbros

Investigadora titular.
Centro de Investigación en Energía,
Universidad Nacional Autónoma de México,
Apartado Postal 34, 62158 Temixco, Morelos, México,
teléfono: + (52) (777) 325 0052, extensión 29711,
teléfono: + (52) (55) 5622 9711,
ghl@cie.unam.mx