

Observaciones experimentales de las interacciones entre partículas en la velocidad de caída de mezclas polidispersas de sedimentos

Juan A. García-Aragón
Sandra Salgado-Salazar

Universidad Autónoma del Estado de México

Marcelo Funes-Gallanzi

Centro de Investigaciones en Óptica, México

Luis R. Sahagún

Universidad de Guadalajara, México

Se llevaron a cabo experimentos con mezclas sedimentarias no uniformes en un canal de transporte de sedimentos de 22 m de largo y sección 1.2 x 1.0 m. Por medio de análisis de imágenes se calcularon las velocidades de caída para los diferentes tamaños de las partículas sedimentarias en la mezcla polidispersa. Se utilizó la técnica de velocimetría por rastreo de partículas (PTV). Las imágenes de partículas iluminadas por luz láser se capturaron por medio del software Looksee: la identificación en imágenes sucesivas y el desplazamiento de las partículas se efectuó utilizando el software AIP, que utiliza un análisis por proceso integrado. Los resultados muestran que la velocidad de caída de las partículas de menor diámetro se ve afectada por la presencia de partículas de diámetro mayor. La explicación física del fenómeno se relaciona con la variación que las partículas de mayor diámetro causan en las características turbulentas del fluido.

Palabras clave: transporte de sedimentos, sedimentos no uniformes, PTV, turbulencia, interacciones fluido-sólido, interacciones sólido-sólido, velocidad de caída, análisis por proceso integrado.

Introducción

El análisis del transporte de mezclas sedimentarias en suspensión tiene importantes aplicaciones en el campo de la ingeniería de ríos y embalses. Los resultados pueden aplicarse igualmente en el campo de tratamiento de aguas residuales y en procesos industriales tanto para el transporte de sólidos finos como para reactores de lecho fluidificado. En general, las mezclas sedimentarias presentan una gran variedad de tamaños. Sin embargo, la práctica en ingeniería para calcular la velocidad de caída

media ha sido considerar un diámetro medio de la mezcla en las fórmulas clásicas, como la de Stokes o Rubey (Yang, 1996). Con esta velocidad de caída y utilizando la ecuación de transporte de masa, se determina la tasa de deposición de la mezcla y se calcula la variación de la concentración en la dirección del flujo. Este procedimiento es inexacto, pues no considera la variación de la velocidad de caída según los diferentes diámetros de las partículas. Un procedimiento alternativo es utilizar intervalos de clase, dividiendo la mezcla por rango de tamaños. En ese caso, la velocidad de caída se calcula para cada clase; en vista

Ilustración 2. Zona de captura de imágenes.

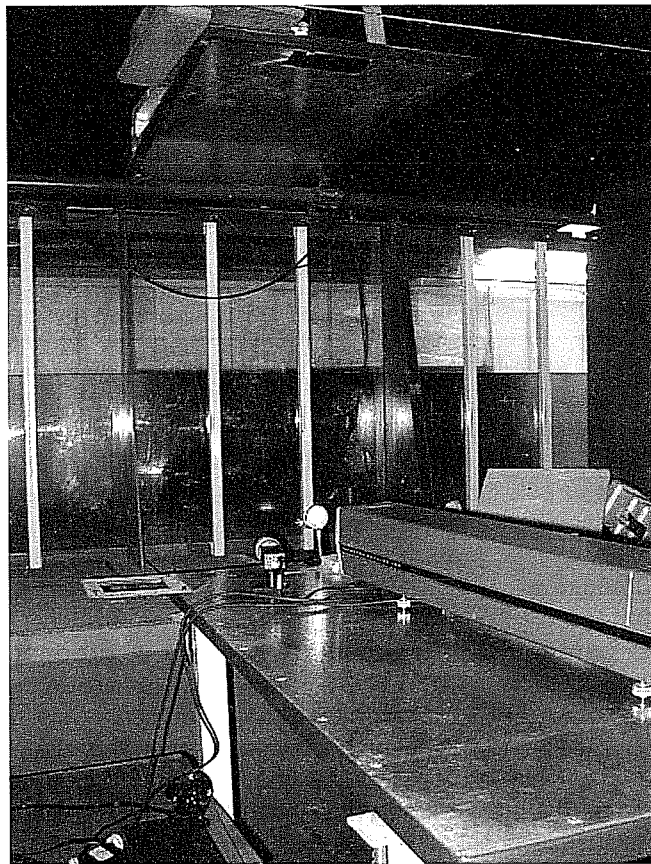
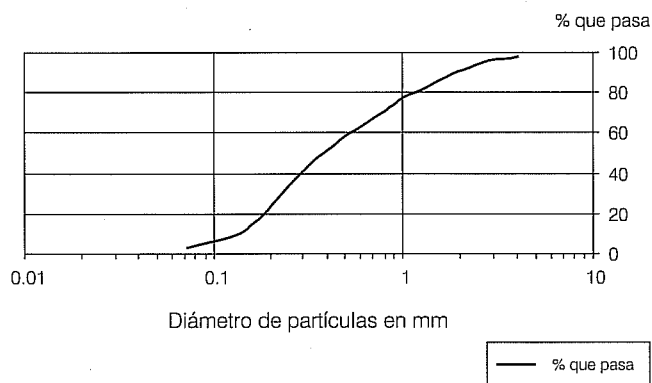


Ilustración 3. Curva granulométrica del material utilizado en la alimentación de los experimentos.



imágenes de partículas. Los métodos clásicos de análisis de imágenes usan el método de frecuencia o el método de rastreo, los cuales son capaces de efectuar con precisión medidas de velocidad de alta calidad, así como estimaciones de vorticidad y tasa de corte.

La técnica de frecuencia con estimaciones aleatorias espacialmente del campo de velocidad puede determinar las propiedades cinemáticas. Por otro lado, la naturaleza de la técnica no permite la posibilidad de investigar las estructuras de pequeña escala del escurrimiento.

La técnica de rastreo puede, por su parte, resolver detalles de pequeña escala, pero requiere de sofisticados algoritmos debido a los datos de velocidad irregularmente espaciados. Por lo tanto, al utilizar un enfoque integrado de división de la imagen en cuadros pequeños y utilizando el resultado del análisis de frecuencia como una condición inicial para un proceso iterativo espacial de pares individuales, se puede analizar cualquier tipo de datos hasta detalles de pequeña escala con alta precisión.

AIP es un programa de computadora, resultado de un largo periodo de investigación dirigido a la extracción automática de datos en imágenes digitales de partículas que comenzó a finales de la década de los ochenta (Bryanston y Epstein, 1990). El programa originalmente implementado en lenguaje C para imágenes binarias (Judge, 1991) luego fue mejorado en términos de precisión y aplicado a flujos reales transitorios de gran velocidad (Funes *et al.*, 1994a, 1994b). Incluso posteriormente se utilizó en flujos de agua lentos (Hayden *et al.* y Udrea *et al.*, 1996). La capacidad para analizar imágenes utilizando la técnica estadística de frecuencia se implementó enseguida, incluyendo autocorrelación y correlaciones cruzadas, análisis de datos en imágenes desplazadas, filtración y cantidades íntegro/diferenciales. El desarrollo definitivo del método *AIP*, que combina los métodos de rastreo y frecuencia para alcanzar súper resolución fue en 1997 (Funes y Mendoza, 1997).

Recientemente se adicionó un enfoque más riguroso para el tamaño de la malla (Moreno *et al.*, 2000). La habilidad para llevar a cabo posicionamiento en 3D, basado en datos de imágenes de dispersión de luz de partículas, es una de las últimas adiciones al código y es única entre los códigos de *PIV* comerciales (Guerrero *et al.*, 2000; Moreno *et al.*, 2000).

Actualmente se trabaja en posicionamiento de alta precisión con baja amplificación (Padilla *et al.*, 2001) identificando poblaciones de diferentes magnitudes y posicionando partículas no esféricas como las que se encuentran en flujos bifásicos, agua-sedimento reales (García *et al.*, 2001).

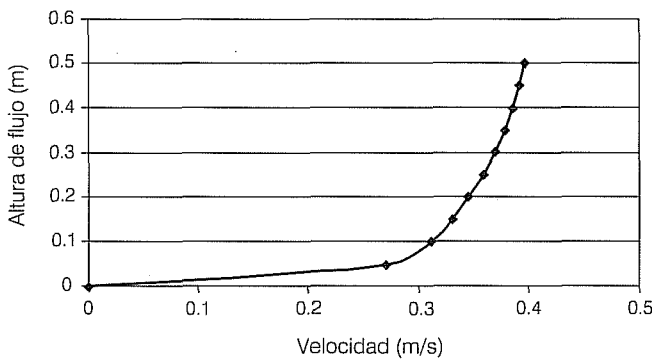
Resultados

En las ilustraciones 5, 6, 7 y 8 se presenta la variación, con la distancia desde el punto de vertido, de la velocidad de caída para las partículas comprendidas entre 0.30 y 0.425, 0.425 y 0.6375, 0.6375 y 0.85, y 0.85 y 1 mm. Se

Cuadro 1. Características granulométricas de los sedimentos.

Malla	Abertura mm	Peso contenedor g	Peso retenido g	% parcial retenido	% acumulado que pasa
5	4	6.37	116.5	1.646	98.35
8	2.36	6.23	293.9	4.299	94.06
18	1	6.24	1,144.8	17.014	77.04
20	0.85	39.07	315.5	4.1308	72.91
40	0.425	6.26	1,335.6	19.865	53.05
50	0.3	6.15	812.2	12.045	41.00
100	0.15	157	2,191.4	30.401	10.60
200	0.075	39.07	564.8	7.856	2.74

Ilustración 4. Perfil de velocidad del canal.



decidió utilizar estos rangos de diámetros de las partículas por el error inherente en los algoritmos de cálculo de los diámetros. Este cálculo se basa en la teoría generalizada de Lorenz-Mie de dispersión de luz por partículas esféricas. En nuestro caso, los sedimentos no son esféricos y al utilizar esa teoría se hace una aproximación. Actualmente se trabaja en el perfeccionamiento de esos algoritmos, lo cual permitiría la reducción de tales rangos de diámetros. Se efectuaron alrededor de 36 experimentos con los caudales sólido y líquido constantes. En vista de las limitaciones del método óptico, en esta investigación no se pretendió analizar el efecto de la variación de la carga sólida. Además, cargas sólidas muy altas oscurecen el flujo de tal manera que incluso la luz láser no es capaz de penetrarlo. La investigación se enfocó en analizar el efecto producido por las diferencias en diámetro de la mezcla no uniforme en la velocidad de caída de las partículas individuales.

Se efectuó un análisis estadístico de las variaciones de la velocidad de caída con la distancia al punto de vertido. La línea de ajuste se calculó utilizando el paquete estadístico *Minitab*. Se muestra la ecuación resultante y

el *P* (factor del test de falta de ajuste-LFT). Este factor es más representativo que el tradicional factor de correlación, pues no sólo indica tendencia, sino que comprueba que los datos cumplen con una prueba de hipótesis.

Discusión

El parámetro de velocidad de caída w_s produce incertidumbre en los cálculos, puesto que la fórmula de Stokes sólo es válida para la velocidad de caída de una partícula aislada, sedimentando con números de partícula de Reynolds bajos, menores a uno. Para el caso general de partículas sedimentando con altos números de Reynolds es necesario usar ecuaciones empíricas como la de Rubey (Yang, 1996).

$$w_s = F \left[dg \left(\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} \right) \right]^{1/2} \tag{1}$$

donde $F = 0.79$ para partículas con $d > 1$ mm; γ, γ_s son los pesos específicos del agua y los sólidos; d es el diámetro de la partícula y g es la gravedad. Usando la fórmula de Rubey para partículas menores de 1 mm de diámetro, F se modifica de la siguiente manera:

$$F = \left[\frac{2}{3} + \frac{36v^2}{gd^3 \left(\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} \right)} \right]^{1/2} - \left[\frac{36v^2}{gd^3 \left(\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} \right)} \right]^{1/2} \tag{2}$$

donde v es la viscosidad cinemática.

El US-ICWR (*Interagency Committee on Water Resources, Subcommittee on Sedimentation*) (Raudkivi, 1990) presenta

Ilustración 5. Velocidad de caída de las partículas de sedimento con diámetro entre 0.300 y 0.425 mm.

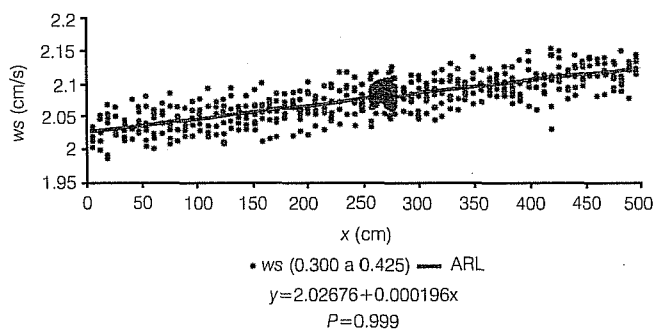


Ilustración 6. Velocidad de caída de las partículas de sedimento con diámetro entre 0.425 y 0.6375 mm.

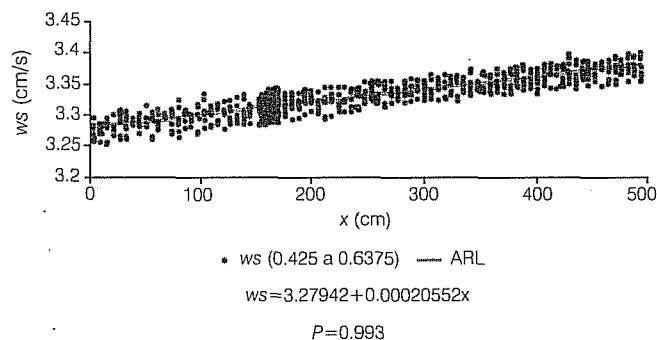


Ilustración 7. Velocidad de caída de las partículas de sedimento con diámetro entre 0.6375 y 0.850 mm.

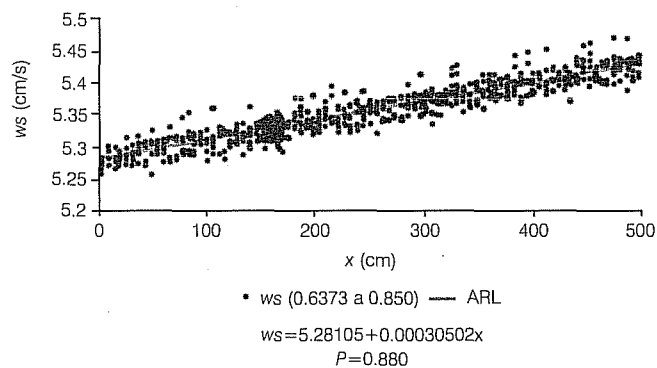
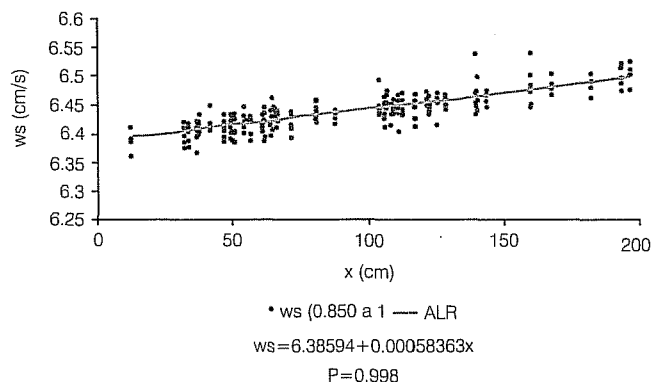


Ilustración 8. Velocidad de caída de las partículas de sedimento con diámetro entre 0.850 y 1 mm.



un gráfico para calcular la velocidad de sedimentación que tiene en cuenta la forma de las partículas. El factor de forma es definido como $SF = c/(ab)^{0.5}$, donde a , b , c son las dimensiones triaxiales de la partícula, siendo c la más corta. El cuadro 2 es un extracto de ese cuadro para gravedad específica de 2 y $T = 20$ °C.

En el cuadro 3 se puede observar que el valor medio de velocidad de caída para el rango de tamaño 0.85 a 1 mm es similar al predicho por el *US-ICWR* para el caso de $SF = 0.3$. Sin embargo, los valores observados son inferiores a la predicción del *US-ICWR* ($SF = 0.3$) para los rangos más pequeños 0.3 a 0.425 mm (sobrestimación de 12.9%); 0.425 a 0.6375 mm (sobrestimación de 5.4%), y superiores para el rango 0.6375 a 0.85 mm (subestimación de 10%). Si se utiliza la fórmula de Rubey, los valores son también sobrestimados o subestimados, según el rango de tamaño analizado. Por ejemplo, para el caso de 0.3 a 0.425 mm, la sobrestimación es de 27.4%; para 0.425 a 0.6375 mm, la sobrestimación es de 23%; para 0.6375 a 0.85 mm, la subestimación es de 2.4%, y para el caso 0.85 a 1 mm, la subestimación es de 6.5%.

De lo anterior se puede deducir que las fórmulas clásicas tienden a sobrestimar fuertemente los valores de velocidad de caída para los rangos de tamaño más pequeños, menores a 0.6375 mm, y a subestimar, aunque de manera menos drástica, los valores de velocidad de caída para los tamaños más grandes.

En las ilustraciones 5 a 8, la tendencia que se evidencia para todos los rangos de tamaño es que la velocidad de caída aumenta en la medida en que las partículas se alejan del punto de vertido. Este aumento es más significativo para el caso de los tamaños superiores y apenas perceptible para el caso de los tamaños más pequeños. En vista de que la concentración disminuye en la dirección del flujo, el citado efecto no puede ser atribuido a ésta.

Cuadro 2. Velocidad de caída, US-ICWR (cm/s).

Diámetro (mm)	SF=0.3	SF=0.5	SF=0.7	SF=0.9	Esférica
0.363	2.35	2.66	2.93	3.29	3.55
0.531	3.51	3.89	4.37	4.75	5.15
0.743	4.78	5.28	6.07	6.81	7.45
0.925	6.35	7.48	8.76	10.02	10.9

Cuadro 3. Valores de W_s para diámetro medio de los rangos (cm/s).

d - promedio (mm)	Rubey	US-ICWR	Observado experimentalmente
0.363	2.65	2.35	2.08
0.531	4.1	3.51	3.33
0.743	5.23	4.78	5.36
0.925	6.03	6.35	6.45

En este trabajo ese efecto se atribuye a la modificación de las características turbulentas del fluido por la presencia de partículas de diferentes diámetros interactuando con el fluido y entre ellas.

En sitios cercanos al vertido superficial de sedimentos hay más partículas de diámetros mayores. Estas partículas, como se ha observado experimentalmente (Hetsroni, 1989), cuando presentan números de Reynolds altos (mayores de 10) incrementan la turbulencia por el fenómeno de vórtices en la estela. En el caso de los experimentos presentados, los números de Reynolds de las partículas, definido como $Re_p = \frac{W_s d}{\nu}$, son 8, 18, 40 y 60 para los rangos considerados.

Si bien es cierto que por el método de suministro del sedimento hay un efecto de impacto de las partículas sobre la superficie que modifica la estructura del flujo y por tanto su turbulencia, este efecto sólo se presenta en el sitio de vertido. Es difícil cuantificar la longitud afectada, pero observaciones de la pluma muestran que se alcanza uniformidad a 50 cm del punto de vertido. La prolongación de la disminución de la velocidad de caída hasta más allá de cinco metros del punto de vertido demuestra que el fenómeno de impacto local no es el causante principal de la modificación de las características turbulentas del fluido.

Las partículas más pequeñas responden mejor a las fuerzas turbulentas del fluido, las cuales tienden a suspender las partículas de manera opuesta a las fuerzas gravitacionales. Por lo tanto, el incremento de las características de turbulencia del fluido se refleja

en una disminución de la velocidad de caída. Este efecto se refleja de manera más pronunciada entre más pequeña sea la partícula, como se puede comprobar en el cuadro 3.

Otro efecto colateral es que a medida que las partículas mayores sedimentan, el flujo restituye sus características turbulentas originales (decrece la turbulencia generada por las partículas mayores) y, por tanto, hay un incremento de la velocidad de caída de las partículas que aún se encuentran suspendidas. Este efecto es mayor entre más grande sea la partícula, en vista de que la diferencia entre las fuerzas gravitacionales y las turbulentas crece con el diámetro.

Los dos efectos se pueden medir con los resultados experimentales. El de incremento de la turbulencia cerca del punto de vertido, al comparar los valores medios observados de velocidad de caída con los que predicen las fórmulas clásicas, útiles para una partícula sedimentando aisladamente. El otro de restitución de la turbulencia original, al alejarse del punto de vertido por medio de la pendiente de la gráfica de velocidad de caída *versus* distancia al punto de vertido. En el cuadro 4 se presenta esa pendiente para los rangos de partículas analizados.

Con respecto al primer efecto, se puede observar que las fórmulas clásicas sobrestiman las velocidades de caída para los tamaños pequeños (27.4% Rubey; 12.9% US-ICBR, según se discutió anteriormente para el rango de 0.425 a 0.6375 mm), pues no consideran el incremento de la turbulencia por efecto de las partículas mayores. En el caso de las partículas mayores, la subestimación es más reducida, pues éstas se ven menos afectadas por la turbulencia.

Con respecto al segundo efecto, al analizar la pendiente de la gráfica W_s *versus* X (cuadro 4), se observa un incremento de la pendiente de la línea de ajuste con el diámetro de las partículas. Puesto que las partículas más grandes tienen fuerzas gravitacionales mayores en la medida en que desaparece el efecto de aumento de la turbulencia (en dirección del flujo), la velocidad de caída aumenta en mayor proporción que la correspondiente a diámetros menores.

Cuadro 4. Comparación de pendientes de ajuste en gráficas W_s versus distancia.

Rango de tamaño (mm)	Pendiente W_s vs. X
0.3-0.425	0.000196
0.425-0.6375	0.000205
0.6375-0.85	0.000305
0.85-1	0.000583

Conclusiones

El análisis del transporte de una mezcla sedimentaria heterogénea en condiciones de uniformidad de flujo líquido y sólido ha permitido dilucidar efectos de interacción entre el fluido y los sólidos, y entre los mismos sólidos. Estos efectos repercuten en las propiedades del escurrimiento, especialmente en sus características de turbulencia, velocidad de caída de las partículas y en la variación de los valores de concentración de los sólidos en la dirección del flujo.

El método de velocimetría por rastreo de partículas (PTV) ha permitido determinar las velocidades de caída para diferentes rangos de tamaño de partículas en suspensión, lo cual es difícil de lograr con otros métodos convencionales como velocimetría acústica doppler (ADV) o velocimetría láser doppler (LDV). Igualmente, las características del software AIP facilitan el trabajo gracias a la combinación de las técnicas de rastreo y frecuencia.

El incremento en las características de turbulencia del escurrimiento por la presencia de partículas con números de Reynolds altos, efecto que no es tomado en cuenta por las fórmulas clásicas para el cálculo de la velocidad de caída, produce errores de predicción al usar estas últimas en general superiores al 10% para los tamaños entre 0.3 y 0.6375 mm.

Se requiere trabajo adicional para determinar los factores de corrección que tomen en cuenta los efectos de interacción partícula-turbulencia y entre partículas en las fórmulas clásicas.

Recibido: 16/05/2002

Aprobado: 04/12/2003

Referencias

- BRYANSTON-CROSS, P.J., EPSTEIN. The application of submicron particle visualization for PIV at transonic speeds. *Progress in aerospace science*. Vol. 27, Pergamonn Press, 1990, pp. 237-265.
- FUNES-GALLANZI, M., BRYANSTON-CROSS, P.J. y CHANA, K.S. Wake region measurement of a highly three-dimensional nozzle guide vane tested at DRA pyestock using particle image velocimetry. *ASME*. 94-GT-349. The Hague, del 13 al 15 de junio, 1994a.
- FUNES-GALLANZI, M., BRYANSTON-CROSS, P.J., y UDREA, D.D. *High accuracy techniques applied to the extraction of absolute position estimates in a 3DPIV system*. VIIth Symp. on Appl. of Laser Techniques to Fluid Mech., Lisbon, 1994b.
- FUNES-GALLANZI, M. y MENDOZA SANTOYO, F. *Analysis by integrated processing of unsteady flow PIV data*. 1997 European Forum. The Royal Aeronautical Society, Wind Tunnels and Wind Tunnel Test Techniques. Cambridge, United Kingdom. 14 al 16 de abril, 1997.
- GARCÍA-ARAGÓN, J.A., SALGADO-SALAZAR, S., MORALES-REYES, P. y DÍAZ-DELGADO, C. Determinación de perfiles de concentración de sedimentos en suspensión para granulometría extendida en situaciones de no equilibrio. *Ingeniería hidráulica en México*. Vol. XV, núm. 2, II época, mayo-agosto 2000, pp. 29-35.
- GARCÍA ARAGÓN, J.A., MORALES, P., PADILLA, P., VALDEZ, J.E., GUERRERO, J.A., MORENO, D. y FUNES-GALLANZI, M., *Non-spherical particle positioning from CCD images for velocimetry applied to two-phase flows*. Third International Symposium on Environmental Hydraulics. Tempe, Arizona, EUA. 5-7 diciembre, 2001.
- GUERRERO, J.A., MENDOZA-SANTOYO, F., MORENO, D. y FUNES-GALLANZI, M. Particle positioning from CCD images: experiments and comparison to generalized Lorenz-Mie theory. *Meas. Sci. Technol.* Vol. 11, núm. 5, 2000, pp. 568-575.
- HAYDEN, E.S.S., MACKLEY, M.R., NEVES-SARAIVA, R.M.C. y FUNES-GALLANZI, M. *Real-time measurements of velocity fluctuations in periodic and chaotic flows using laser doppler velocimeter and particle image velocimetry*. 5th World Congress of Chemical Engineering, AIChemE, IChemE and the European Federation of Chemical Engineering. Vol. I, San Diego, 14-18 julio, 1996, pp. 456-461.
- HETSRONI, G. Particles-turbulence interaction. *Int. J. multiphase flows*. Vol. 15, núm. 5, 1989, pp. 735-746.
- JUDGE, T.R. *Quantitative digital image processing in fringe analysis and particle image velocimetry (PIV)*. Tesis doctoral. University of Warwick, 1991.
- MORENO, D., MENDOZA, F., GUERRERO, VIRAMONTES, J.A. y FUNES-GALLANZI, M. 3D particle positioning from a single CCD image: theory and comparison to experiment. *Applied optics*. Vol. 39, 2000, pp. 5117-5124.
- PADILLA-SOSA, P., MORENO, D. y GUERRERO, J.A. Low-magnification particle positioning for 3D velocimetry applications. *Optics & Laser Technology*. Elsevier Press, 2001.
- RAUDKIVI, A.J. *Loose boundary hydraulics*. Tercera edición. Londres: Pergamon Press, 1990, pp.12-15.
- UDREA, D.D., BRYANSTON-CROSS, P.J., LEE, W.K. y FUNES-GALLANZI, M. Two sub-pixel algorithms for high accuracy particle centre estimation in low seeding density Particle Image Velocimetry. *Optics and laser technology*. Vol. 28, núm. 5, 1996, pp. 389-396.
- YANG, C.T. *Sediment transport theory and practice*. New York: McGraw Hill, 1996.

Abstract

JUAN A. GARCÍA-ARAGÓN, SANDRA SALGADO-SALAZAR, MARCELO FUNES-GALLANZI & LUIS R. SAHAGÚN. Experimental observations of particle-particle interactions in settling velocity of polydispersed sediment mixtures. *Hydraulic engineering in Mexico (in Spanish)*. Vol. XIX, no. 4, October-December, 2004, pp. 57-64.

Experiments with non-uniform sediment mixtures were developed in a suspended sediment transport channel of 22m long and cross section of 1.2x1 m. Using image analysis the settling velocities for different particle diameters of the polydisperse mixture were calculated. The Particle Tracking Velocimetry (PTV) method was used. The images of particles illuminated by laser light were captured using the software Looksee. Particle identification and displacement was made using the software AIP that uses analysis by integrated processing. The results show that the settling velocities of small diameter are affected by the presence of larger diameter particles. Physical explanation of the phenomena is related with the changes in turbulent characteristics of the fluid by the larger particles.

Keywords: sediment transport, non-uniform sediments, PTV, turbulence, fluid-solid interactions, solid-solid interactions, settling velocity, analysis by integrated processing.

Dirección institucional de los autores:

Juan A. García-Aragón
Sandra Salgado-Salazar

Universidad Autónoma del Estado de México,
Centro Interamericano de Recursos del Agua,
Cerro de Coatepec, Ciudad Universitaria,
Toluca, Estado de México, CP 50130,
jgarcia@uaemex.mx

Marcelo Funes-Gallanzi

Centro de Investigaciones en Óptica (CIO),
Loma del Bosque 115, León, Guanajuato, México,
CP 37150,
gallanzi@cio.mx

Luis R. Sahún

Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingeniería (CUCEI)
Universidad de Guadalajara, Jalisco, México