



Convegno di Medio Termine dell'Associazione Italiana di Ingegneria Agraria
Belgirate, 22-24 settembre 2011
memoria n.

STUDIO PRELIMINARE DI UN TRACCIANTE INNOVATIVO CON PARTICELLE FLUORESCENTI PER LE MISURE DI VELOCITÀ SU VERSANTE

S. Grimaldi^{1,2}, F. Tauro^{2,3}, A. Petroselli⁴, M. Porfiri²

- (1) Dipartimento per l'innovazione nei sistemi biologici, agroalimentari e forestali (DIBAF), Università degli Studi della Toscana.
- (2) Department of Mechanical & Aerospace Engineering, Polytechnic Institute of New York University.
- (3) Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile ed Ambientale, Sapienza Università di Roma
- (4) Dipartimento di Scienze e Tecnologie per l'Agricoltura, le Foreste, la Natura e l'Energia (DAFNE), Università degli Studi della Toscana.

SOMMARIO

In questo lavoro sono descritti alcuni esperimenti preliminari per lo studio di un tracciante innovativo basato sull'utilizzo di particelle fluorescenti. Tale tracciante è finalizzato alla misura della velocità del deflusso superficiale su versante. L'idea di base è di introdurre nel fluido in movimento o in formazione una quantità di particelle galleggianti di diametro molto limitato ($< 1\text{mm}$) dotate di fluorescenza e di monitorarle tramite una piccola stazione strumentale composta da una lampada a ultravioletti e da una telecamera. Come prima analisi è stata verificata in laboratorio la visibilità delle particelle in diverse condizioni: fluido torbido e limpido, fluido immobile ed in movimento. I risultati ottenuti sono incoraggianti e confermano sia la visibilità delle particelle sia la possibilità di identificarne automaticamente il transito in una determinata sezione.

Parole chiave: particelle fluorescenti, PIV, traccianti idrologici.

1 INTRODUZIONE

I deflussi superficiali di versante in un bacino idrografico condizionano molti fenomeni idrologici tra i quali i principali sono la formazione delle piene fluviali, la diffusione degli inquinanti e i meccanismi di erosione e di trasporto solido. Tali deflussi si sviluppano tramite la formazione di una microcanalizzazione efemerale su versante. La piena comprensione dei processi fisici caratterizzanti tali fenomeni è attualmente limitata a causa della mancanza di tecniche di misure di velocità dirette in situ sia a scala locale sia di bacino (*Leibundgut et al.*, 2009). Le particolari condizioni legate alla torbidità presente nei deflussi, all'eterogeneità dei percorsi di drenaggio, alle naturali asperità del terreno e alla sua copertura vegetale rendono difficile applicare tecniche di monitoraggio o strumenti di misura che operino in continuo e con costi contenuti (*Jodeau et al.*, 2008; *Kim et al.*, 2008).

I traccianti idrologici, che sono usualmente applicati, non riescono a superare tali criticità (Calkins & Dunne, 1970; Creutin et al., 2003). Molte delle tecniche disponibili infatti necessitano di campionamenti del fluido analizzato e quindi non permettono misure in continuo (Planchon et al., 2005; Lyon et al., 2008), cruciali per la comprensione dell'evoluzione dei fenomeni idrologici. Inoltre, i traccianti più comunemente utilizzati, quali gli isotopi, i coloranti, e i chimici non sono applicabili per monitorare i processi di versante e le ampie zone di micro-canalizzazione a causa della complessità delle elaborazioni e per i fenomeni di dispersione ed assorbimento (Pilgrim, 1975; Calkins & Dunne, 1970; Hubbard, 1982; Hassan & Ergenzinger, 2003; Botter et al., 2009; Leibundgut et al., 2009).

Recenti ricerche sulla Particle Image Velocimetry (PIV) in fluidodinamica e in idrologia hanno incentivato la creazione di traccianti innovativi con particelle (Adrian, 2005). Tra quelle utilizzate le fluorescenti hanno mostrato un'elevata efficienza ed identificabilità in numerose condizioni di velocità e tirante idrico (Meselhe et al., 2004; Angarita-Jaimes et al., 2008). Nonostante tali sviluppi positivi, l'utilizzo di microparticelle fluorescenti nella ricerca idrologica è limitata a studi di laboratorio per particolari applicazioni. L'unico esempio di progettazione di particelle per un potenziale utilizzo per eseguire PIV in situ è disponibile in Pedocchi et al. (2008).

In questo lavoro si propone l'utilizzo di microparticelle fluorescenti per superare i limiti precedentemente descritti e per fornire potenziali misure in continuo, automatiche, a basso costo e con effetti di dispersione molto limitati. Sono, quindi, presentati alcuni studi preliminari sul comportamento di tali particelle testandone la visibilità in un fluido torbido e limpido in quiete ed in condizione di scarsa luminosità. Un esperimento è inoltre condotto in un fluido corrente. L'articolo è organizzato come segue: nel paragrafo 2 è descritta la strumentazione utilizzata mentre nel paragrafo 3 gli esperimenti ed i risultati ottenuti.

2 DESCRIZIONE DELLA STRUMENTAZIONE

La strumentazione è composta dalle particelle fluorescenti, da una telecamera dotata di filtro ottico e da una lampada a ultravioletti (UV). Le particelle, acquistate dalla *Cospheric LLC*, sono approssimativamente sferiche ed il loro diametro è compreso nell'intervallo 0.710–0.850mm come mostrato al microscopio in Figura 1a. Le sfere appaiono bianche alla luce del sole ed emettono una luce verde-gialla (561nm di lunghezza d'onda) se eccitate da una luce ultravioletta (365nm di lunghezza d'onda). Il materiale con cui sono composte è polietilene e la fluorescenza è indotta nella matrice del polimero garantendo un periodo di luminescenza indefinito. La densità nominale è 0.99g/cm³. La lampada UV da 8W è collocata sopra le particelle ed eccita la fluorescenza ad una distanza mantenuta costante durante gli esperimenti. Sono utilizzate due tipologie di telecamere, la prima, più avanzata, di tipo IDT MotionPro 3 Series 1 k×1 k pixel color CMOS ed una seconda, di uso comune ed a basso costo, di tipo CMOS Canon VIXIA HG20. Sulle telecamere viene fissato un filtro ottico (540nm di lunghezza d'onda) per selezionare, almeno parzialmente, solo la luce riemessa dalle particelle eccitate.

Per lo svolgimento degli esperimenti con il fluido in movimento è stata realizzata una micro-canaletta in acrilico di dimensioni 50cm × 20cm × 10cm mostrata in Figura 1b. La struttura telescopica permette di variare la pendenza e una valvola permette di

regolare il flusso e variare conseguentemente il tirante idrico del deflusso. La micro-canaletta è stata realizzata presso il Dynamical Systems Laboratory (DSL) della Polytechnic Institute of New York University.

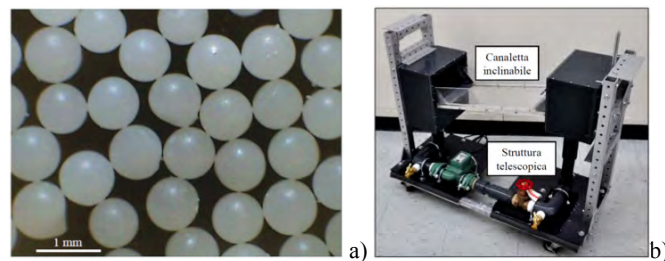


Figura 1. (a) immagine delle particelle al microscopio; (b) micro-canaletta sperimentale.

3 DESCRIZIONE DEGLI ESPERIMENTI

3.1 Visibilità delle particelle in un fluido torbido in quiete

La configurazione dell'esperimento è illustrata in Figura 2. Le particelle sono disposte in un contenitore trasparente (petri-dish) in una soluzione con assegnata torbidità e spessore. La torbidità è indotta miscelando nel fluido variabili quantità di argilla. La telecamera (IDT MotionPro 3) ed il filtro ottico sono disposti ad una distanza di 30cm al di sotto del contenitore trasparente. Le particelle sono illuminate dalla lampada UV disposta 10cm al di sopra delle stesse. Le immagini sono acquisite ad una frequenza di 5Hz e con un tempo di esposizione pari a 0.2s. Il settaggio dei parametri della telecamera sono mantenuti invariati durante tutti gli esperimenti.

Con tale configurazione si è analizzata la visibilità di una singola particella variando sia la concentrazione di argilla sia la profondità della soluzione acquosa. Per ogni condizione torbidità-tirante sono stati considerati dieci immagini e una di queste, scelta in maniera casuale, è stata analizzata. Inoltre, sono state acquisite anche le immagini di sfondo delle soluzioni senza la presenza della particella (background).

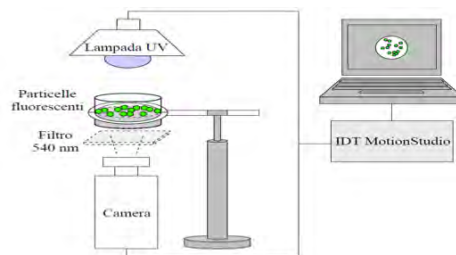


Figura 2. Configurazione dell'esperimento sulla visibilità delle particelle in un fluido torbido.

L'analisi della visibilità delle particelle è condotta qualitativamente utilizzando gli istogrammi ottenuti dalle immagini 8-bit a scala di grigi che prevedono 256 classi di

intensità. Tali immagini sono estratte dall'immagine originale RGB (red-green-blue) considerando solo il canale del verde.

Al fine di fornire uno strumento semplice e rapido per quantificare la presenza della particella si è introdotto l'indice G definito come la media pesata con le intensità dei pixel delle differenze tra gli istogrammi dell'immagine con la particella e dell'immagine di background:

$$G = \frac{\sum_{i \in I} c_i n_i}{\sum_{i \in I} n_i}, \quad I = \{i \in \{0, 1, \dots, 255\}; n_i > 0\}, \quad n_i = n_i^p - n_i^b \quad (1)$$

dove c_i rappresenta le classi di intensità da 0 a 255 e n_i il numero di pixels in ogni classe dell'istogramma ottenuto dalla sottrazione del background (n_i^b) dall'immagine con particella (n_i^p) e includendo nella somma solo le differenze positive. Tale indice, la cui affidabilità è stata testata confrontando i risultati con altre tecniche (Tauro et al. 2010), è stato utilizzato per quantificare la visibilità delle particelle nelle prove precedentemente descritte considerando un range di torbidità da 0 a 60 g/l e dei valori di tirante variabili da 0 mm a 10 mm.

La Figura 3 mostra i risultati ottenuti; dalla figura si deduce che la presenza della torbidità non penalizza la visibilità della particelle anzi la migliora (comportamento evidente nel caso di tirante nullo) perché di fatto crea un maggiore contrasto nell'immagine riducendo effetti di riflessione. Aumentando la profondità, come atteso, si riduce la visibilità anche se tale riduzione non risulta marcata per profondità fino a 4 – 6 mm. Tale risultato è incoraggiante visto che le particelle avendo densità pari a 0.99g/cm³ galleggiano sul fluido ed eventualmente possono solo temporaneamente essere sommerse per modesti valori di profondità a causa della turbolenza del fluido in movimento.

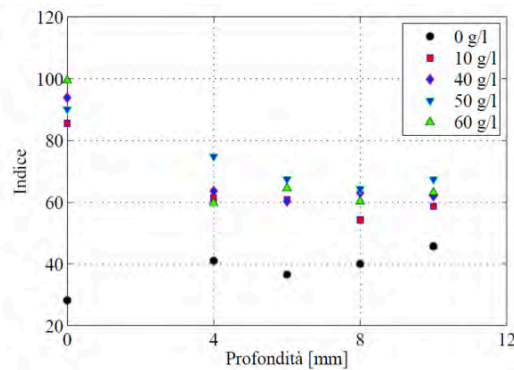


Figura 3. Risultati dell'esperimento ottenuti variando la torbidità del fluido e la profondità della particella.

3.2 Visibilità delle particelle in un fluido limpido in movimento

Questo secondo esperimento ha il fine di verificare la visibilità delle particelle in un fluido in movimento. Utilizzando la micro-canaletta descritta nel precedente paragrafo,

le particelle sono disposte nel fluido in assenza di torbidità. La lampada UV in questo caso è disposta ad una distanza di circa 10 cm dal pelo libero e la telecamera (CMOS Canon VIXIA HG20 con risoluzione 1920×1080 e frequenza di acquisizione pari a 30Hz) è posta a 50 cm di distanza. Gli esperimenti sono condotti in condizione di assenza di luce. Un esempio di esito dell'esperimento è illustrato in Figura 5a. Nonostante l'elevata velocità del fluido (circa 0.8m/s) il transito della particella è ben visibile. Una valutazione quantitativa di tale passaggio è ottenuta valutando l'indice G (1) sulla sequenza di immagini rilevate e utilizzando come background una delle prime immagini in cui non sono presenti le particelle. La Figura 5b riporta la sequenza temporale dei valori di G in cui è evidente il picco che indica il transito della particella. Un'evidenza ancora maggiore si può osservare considerando l'andamento temporale degli incrementi dell'indice G (Figura 5c).

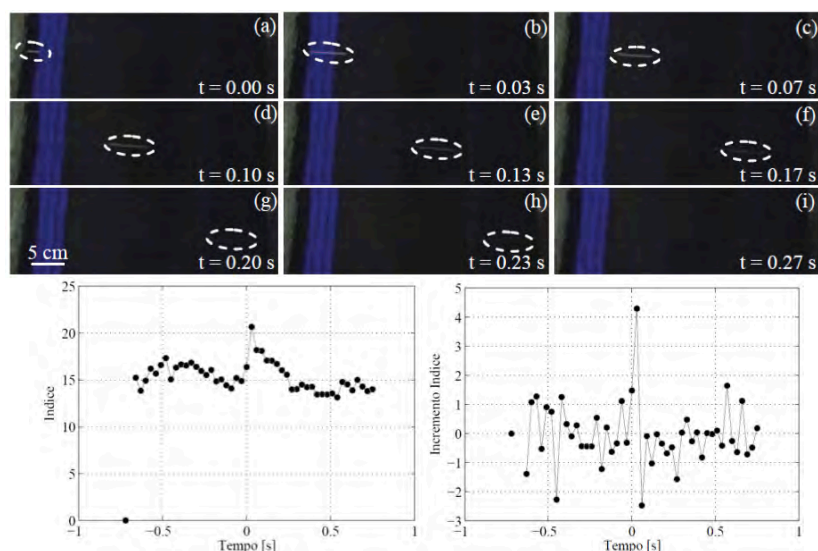


Figura 5. Risultati dell'esperimento sulla visibilità della particella in un fluido limpido in movimento. (a) Sequenza di immagini con il transito di una particella; (b) andamento temporale dei valori dell'indice G ; (c) andamento temporale degli incrementi dei valori dell'indice G .

4 CONCLUSIONI

In questo lavoro sono descritti alcuni esperimenti preliminari per lo studio di un tracciante di tipo idrologico innovativo basato sull'utilizzo di particelle fluorescenti di limitato diametro ($<1\text{mm}$). L'apparato strumentale è composto da una telecamera, un filtro ottico e una lampada UV ed è stato assemblato in modo che tale tracciante sia semplice da utilizzare, a basso costo e che fornisca un monitoraggio del deflusso continuo ed automatico. Al fine di studiare le eventuali problematiche di un pratico utilizzo in campo si sono eseguiti alcuni esperimenti preliminari in laboratorio per verificare la visibilità delle particelle in diverse condizioni. Sono stati analizzati sia l'effetto della presenza di torbidità che l'effetto della velocità del fluido. Al fine di verificare automaticamente, e quindi quantificare, il transito di una particella in una

determinata sezione è stato introdotto un indice basato sulla differenza degli istogrammi delle intensità delle immagini. I test effettuati hanno mostrato che la torbidità non rappresenta un problema nell'identificazione della particella anzi, visto che la densità delle stesse dovrebbero garantire un galleggiamento almeno parziale, la torbidità contribuisce ad aumentare il contrasto nelle immagini riducendo le riflessioni che possono essere presenti in un fluido limpido. Grazie ad una micro-canaletta sono state eseguite delle prove con fluido in movimento con differenti velocità che hanno confermato la visibilità delle particelle anche per velocità di circa 0.8 m/s.

I risultati ottenuti sono incoraggianti e lasciano presumere che l'apparato sperimentale proposto possa essere ulteriormente studiato, testato e utilizzato per esperimenti di campo finalizzati alla misura delle velocità di deflusso su versante.

BIBLIOGRAFIA

- Adrian, R.J. Twenty years of particle image velocimetry. *Exp. Fluid.* 2005, 39, 159–169.
- Angarita-Jaimes, D.; Ormsby, M.; Chennaoui, M.; Angarita-Jaimes, N.; Towers, C.; Jones, A.; Towers, D. Optically efficient fluorescent tracers for multi-constituent PIV. *Exp. Fluid.* 2008, 45, 623–631.
- Botter, G.; Milan, E.; Bertuzzo, E.; Zanardo, S.; Marani, M.; Rinaldo, A. Inferences from catchment-scale tracer circulation experiments. *J. Hydr.* 2009, 369, 368–380.
- Calkins, D.; Dunne, T. A salt tracing method for measuring channel velocities in small mountain streams. *J. Hydr.* 1970, 11, 379–392.
- Cospheric LLC. Available online: <http://www.cospheric-microspheres.com/default.asp/>.
- Creutin, J.D.; Muste, M.; Bradley, A.A.; Kim, S.C.; Kruger, A. River gauging using PIV techniques: A proof of concept experiment on the Iowa River. *J. Hydr.* 2003, 277, 182–194.
- Hassan, M.A.; Ergenzinger, P. *Tools in Fluvial Geomorphology*; John Wiley & Sons: West Sussex, UK, 2003; chapter Use of Tracers in Fluvial Geomorphology; pp. 397–423.
- Hubbard, E.F. *Measurement of Time of Travel and Dispersion in Streams by Dye Tracing*; U.S. Government Printing Office: Washington, DC, USA, 1982.
- Jodeau, M.; Hauet, A.; Paquier, A.; Le Coz, J.; Dramais, G. Application and evaluation of LS-PIV technique for the monitoring of river surface velocities in high flow conditions. *Flow Meas. Instrum.* 2008, 19, 117–127.
- Kim, Y.; Muste, M.V.I.; Hauet, A.; Krajewski, W.F.; Kruger, A.; Bradley, A.A. Stream discharge using mobile large-scale particle image velocimetry: A proof of concept. *Water Resour. Res.* 2008, 44, 1–6.
- Leibundgut, C.; Maloszewski, P.; Kull, C. *Tracers in Hydrology*; Wiley-Blackwell: Oxford, UK, 2009.
- Lyon, S.W.; Desilets, S.L.E.; Troch, P.A. Characterizing the response of a catchment to an extreme rainfall event using hydrometric and isotopic data. *Water Resour. Res.* 2008, 44, 1–12.
- Meslehe, E.A.; Peeva, T.; Muste, M.V.I. Large scale particle image velocimetry for low velocity and shallow water flows. *J. Hydrol. Eng.* 2004, 130, 937–940.
- Pedocchi, F.; Martin, J.; Garcia, M.H. Inexpensive fluorescent particles for large-scale experiments using particle image velocimetry. *Exp. Fluid.* 2008, 45, 183–186.
- Pilgrim, D.H. Travel times and nonlinearity of flood runoff from tracer measurements on a small watershed. *Water Resour. Res.* 1975, 12, 487–496.
- Planchon, O.; Silvera, N.; Gimenez, R.; Favis-Mortlock, D.; Wainwright, J.; Le Bissonnais, Y.; Govers, G. An automated salt-tracing gauge for flow-velocity measurement. *Earth Surf. Process. Landf.* 2005, 30, 833–844.
- Tauro F.; Aureli M.; Porfiri M.; Grimaldi S. Characterization of buoyant fluorescent particles for field observations of water flows, *Sensors*, 2010, 10, 11512–11529.