

BIBLIOGRAFIA

- R. Deng and C. -H. Wang. Particle image velocimetry study on the pattern formation in a vertically vibrated granular bed. *Physics of Fluids*, 15, 3718-3729, 2003.
- J. M. N. T. Gray, Y. -C. Tai and S. Noelle. Shock waves, dead zones and particle-free regions in rapid granular free-surface flows. *Journal of Fluid Mechanics*, 491, 161-181, 2003.
- L. Lanza, A. Valiani, A. Bernini e M. Franchini. Modello fisico della nuova conca di Pontelagoscuro. *XXIX Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche*, Trento, 7-10 settembre 2004.
- S. Longo. Strumento ottico per la misura di velocità tangenziale bidimensionale, Domanda di Brevetto di Invenzione Industriale PR2004A000002, 2004.
- S. Longo and A. Lamberti. Granular shear flow mechanics. *Experiments in Fluids*, 32/3, 313-325, DOI 10.1007/s003480100359, 2002.
- R. M. Nedderman, S. T. Davies and D. J. Horton. The flow of granular materials round obstacles. *Powder Technology*, 25, 215-223, 1980.
- G. Pilate and M. J. Crochet. Plane flow of a second-order fluid past submerged boundaries. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 2, 323-341, 1977.
- T. Sarpkaya, P. G. Rainey and R. E. Kell. Flow of dilute polymer solutions about circular cylinders. *Journal of Fluid Mechanics*, 57, 177-208, 1973.
- H. Tennekes and J. L. Lumley. *A first course in turbulence*. The MIT Press, Cambridge, UK EU, ISBN 0 262 20019 8, pp. 300+xiii, 1972.
- M. M. Zdravkovich. *Flow around circular cylinders, Vol. 1: Fundamentals*. Oxford University Press, Oxford, UK EU, ISBN 0 19 856396 5, pp 672+xviii, 1997.

Esperienze di misura di trasporto solido presso la stazione fissa di Baccaiano, Montespertoli, FI

I. Marchesini¹, F. Ginanni², P. Tacconi¹, I. Becchi² e G. Pancani²

¹Dipartimento di Ingegneria Civile ed Ambientale - Università di Perugia

²Dipartimento di Ingegneria Civile - Università di Firenze

E-mail : marchesini@unipg.it

SOMMARIO. Nel presente lavoro vengono illustrate alcune misure di trasporto solido al fondo ed in sospensione eseguite presso la stazione di misura fissa del Torrente Virginio, Montespertoli (FI). I recenti lavori di allestimento di un sistema di misura in grado di acquisire, in maniera sincrona, i dati idrologici, idraulici e video tramite l'impiego di una singola unità pc portatile, hanno permesso la registrazione di alcuni eventi di piena avvenuti tra il 2001 ed il 2004. Le unità preposte alla gestione della stazione, Dip. Ing. Civ. ed Amb. Perugia e Dip. Ing. Civ. Firenze, hanno effettuato misure in continuo del trasporto solido al fondo e campionamenti di quello in sospensione, riuscendo a fornire una prima valutazione delle interazioni tra portata liquida e portata solida. Tale tipo di esperienze risulta un elemento basilare per lo studio dei fenomeni di trasporto solido, sia per la complessità tecnica e manuale delle operazioni di misura che vengono svolte, sia per la difficoltà temporale di presenziare eventi di piena fortemente dipendenti dal regime meteorologico ricadente sul bacino. La stazione di misura del Virginio si conferma dunque un importante tavolo di studio per tutta la comunità scientifica.

1 IL TORRENTE VIRGINIO: CARATTERI MORFOLOGICO SEDIMENTARI DELL'ALVEO NEL PERIODO DELLE MISURE DI TRASPORTO EFFETTUATE

Il torrente Virginio affluente in sinistra del fiume Pesa, scorre sulle colline del Chianti fiorentino, in prossimità del comune di Montespertoli (FI). Il bacino drenato a monte della stazione di misura ha una estensione areale di 40 km² e la lunghezza dell'alveo è pari a circa 14 km. La pendenza del letto nel tratto immediatamente a monte della stazione è pari a circa lo 0.9%. A monte della stazione di misura, il Torrente Virginio ha un andamento rettilineo ed è incassato all'interno dei propri sedimenti alluvionali. Le sponde sono stabili, sia per l'abbondante vegetazione che per la presenza di alcune opere di protezione (rip-rap). La morfologia è quella di un alveo a barre alternate con riffles e pools. La granulometria dei sedimenti al letto presenta un D₅₀ pari a 47 mm sull'armour, 21 mm nel subarmour e 35.5 mm sulle barre (Cencetti et al., 2003). La larghezza

media dell'alveo attivo (inteso come quella porzione d'alveo caratterizzata dalla presenza di sedimenti ghiaiosi e non vegetato - Winterbottom, 2000), nel periodo che va dal 2001 al 2004, non è rimasta costante ma è variata in funzione della frequenza delle portate di piena (bassa a causa della scarsa piovosità degli anni 2002 e 2003) e dell'apporto di sedimenti fini (sabbie e limi movimentati da lavori in alveo e apporti dai tributari), che hanno determinato una forte aggradazione dell'alveo e la formazione di corpi sedimentari tenaci e vegetati. La sedimentazione di materiale fine si è verificata durante la primavera del 2002 ed ha determinato la creazione di un canale con alveo attivo (gennaio 2003) non più largo di 1.5 metri, contro i 7 metri del 2001 (attualmente, anche grazie ad alcuni recenti eventi di piena verificatisi durante l'inverno 2003-2004, l'alveo attivo si è allargato, presenta una larghezza di circa 3 metri ed è ribassato di circa 0.5 metri rispetto ai corpi sedimentari che erode lateralmente). Il bacino sperimentale del torrente Virginio è stato oggetto di numerosi studi e ricerche riguardanti la produzione ed il trasporto dei sedimenti ed in particolare la stazione di misura

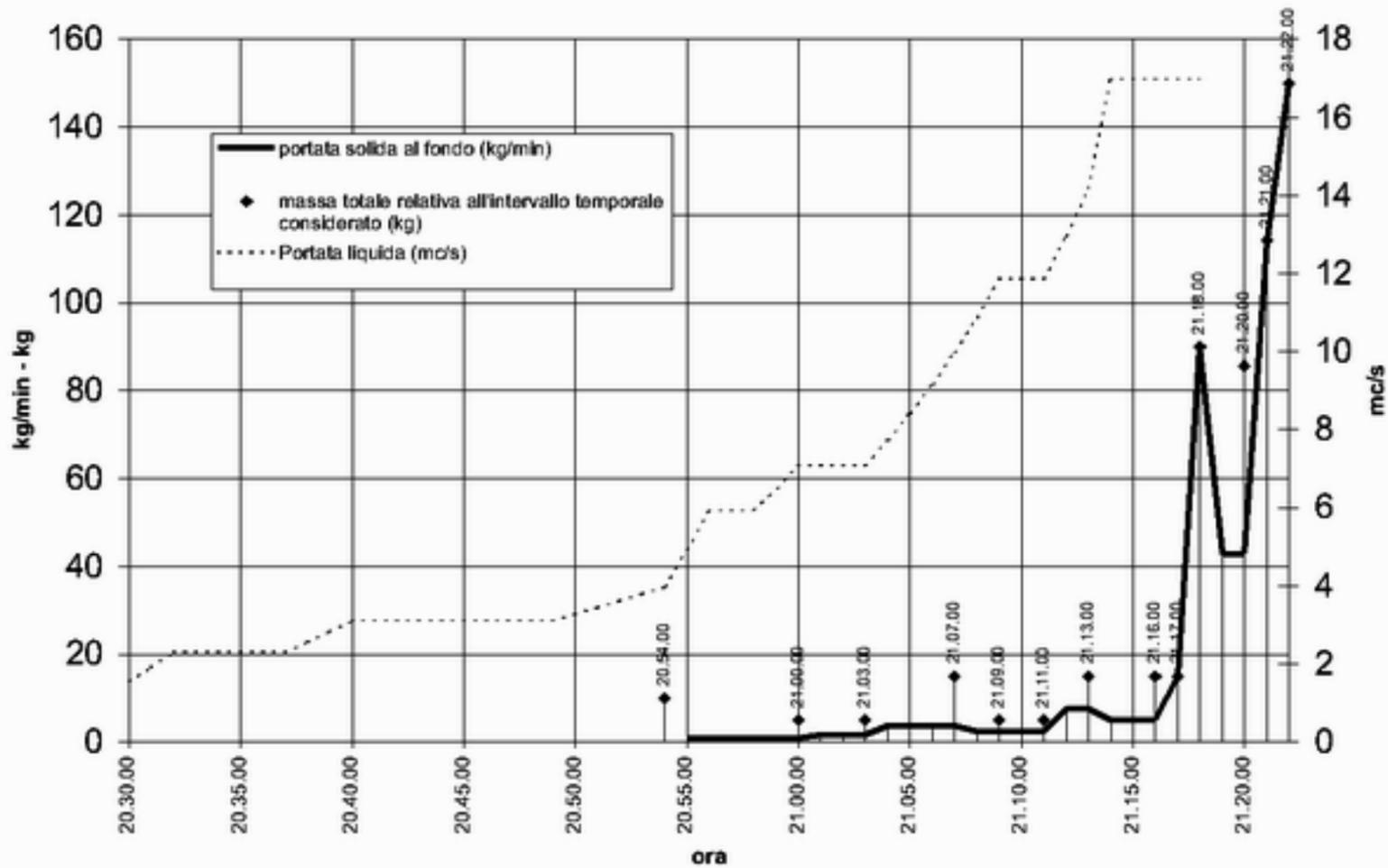


Figura 1. Evento di piena del 28-03-01

in continuo del trasporto solido al fondo ha già fornito interessanti risultati. Per una descrizione della stazione di misura e delle precedenti esperienze si rimanda alla letteratura specifica (Tacconi and Billi, 1987; Ginanni et al., 2002).

2 DESCRIZIONE DEGLI EVENTI DI PIENA

2.1 EVENTO DI PIENA DEL 28/03/01

Questo evento di piena (figura 1) è stato il primo ad essere misurato da quando la stazione di misura è stata riattivata. L'evento di piena, come si osserva dal grafico, fu caratterizzato da una crescita molto rapida, poichè passò da 2 a 16 m³/s in meno di 45 minuti. Le precipitazioni si concentrarono nella zona di testata del bacino, tanto che il pluviometro sito presso la stazione di misura registrò 2.5 mm di pioggia tra le 19:40 e le 21:15. La misura risulta discontinua a causa di un rapido incremento della portata solida (fino a circa 500 Kg/min) che, unitamente ad alcuni problemi tecnici, ha bloccato il sistema di pesa con la conseguente interruzione delle operazioni (necessaria per procedere al ripristino manuale). L'evento di trasporto si è manifestato con un limitato apporto solido iniziale verificatosi in corrispondenza di portate dell'ordine di 1.5 m³/s. Successivamente, però, non sono stati misurati altri apporti significativi per

circa un'ora (anche con portate liquide sensibilmente maggiori). L'innesco del trasporto solido al fondo si è verificato in corrispondenza di una portata pari a circa 4 m³/s ed ha determinato un rapido accumulo di materiale (circa 10 kg), rappresentato in figura 1 alle ore 20:54. Da questo momento in poi il fenomeno è diventato continuo e crescente, con due fasi che possono essere ben distinte sul grafico: la prima (che dura circa 23 minuti) è caratterizzata da un ridotto fenomeno di trasporto che, pur crescendo parallelamente alla portata idrica, non supera tassi di circa 15 kg/min; la seconda, iniziata alle ore 21:18, presenta tassi di trasporto che arrivano fino a 150 kg/min, in corrispondenza di portate idriche che superano 17 m³/s. I dati a disposizione fanno ritenere che, una volta raggiunta la portata di circa 17 m³/s l'armour che protegge il letto dell'alveo sia stato rimosso, favorendo la presa in carico dei sedimenti sottostanti e determinando un forte impulso di sedimenti alla stazione di misura. Dopo l'interruzione delle misure, l'evento di piena ha continuato a crescere, pressochè costantemente, fino a raggiungere portate dell'ordine dei 50 m³/s. Sulla base di questa osservazione sono stati estrapolati i valori della portata liquida nei 4 minuti immediatamente successivi all'interruzione.

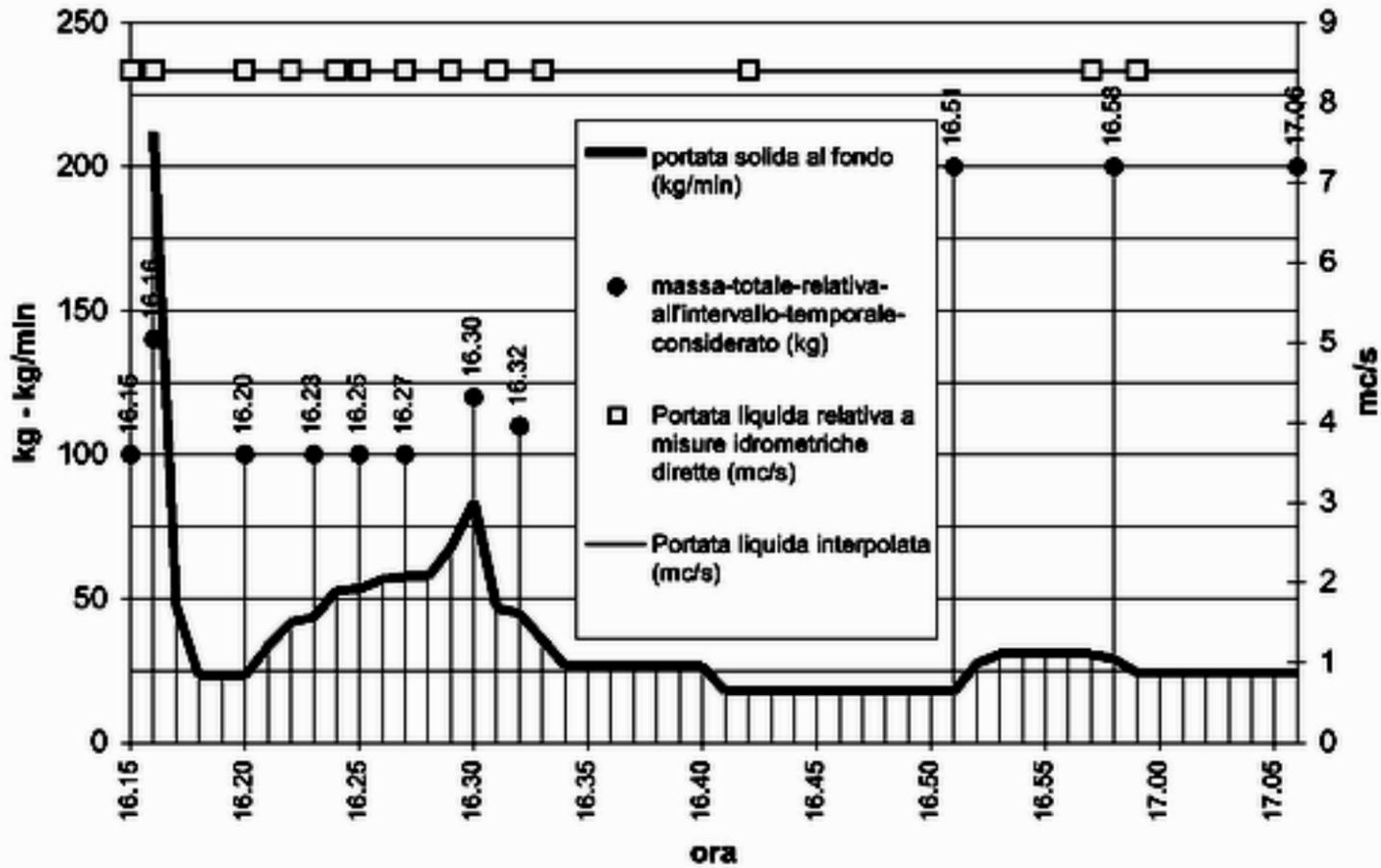


Figura 2. Evento di piena del 30-03-01

2.2 EVENTO DI PIENA DEL 30-03-01

Questo evento di piena (figura 2) è stato misurato senza l'ausilio della strumentazione per l'acquisizione digitale non essendo al momento ancora terminata la fase di installazione dell'intero sistema. L'evento si è verificato 2 giorni dopo quello precedentemente illustrato. Le misure sono state eseguite in condizioni di portata liquida costante pari a $8.4 \text{ m}^3/\text{s}$ che seguivano una fase di decrescita dal valore di $17 \text{ m}^3/\text{s}$ durata circa 5 ore; l'innescò del trasporto solido al fondo si era quindi già verificato. Si fa presente che il picco di portata solida che si ha in corrispondenza dell'inizio delle misure è viziato dalla presenza di materiale accumulato nella trappola. Le operazioni di misura sono durate circa 1 ora: dal grafico si può rilevare l'andamento pressochè costante della portata solida intorno ad un range compreso tra 18 e $30 \text{ kg}/\text{min}$, ad eccezione dei primi 15 minuti dopo lo scarico del materiale accumulato nella trappola dove si è raggiunto un picco di portata solida pari a $84 \text{ kg}/\text{min}$.

2.3 EVENTO DI PIENA DEL 28/11/03

Nelle misure effettuate durante questo evento (figura 3) è stato impiegato il sistema di acquisizione video, mentre per problemi logistici non è stato possibile attivare la gestione in automatico della stazione e con-

seguentemente la registrazione dei dati in formato digitale. La misura dei tempi è stata eseguita sia con strumentazione digitale che analogica: è stato possibile così procedere ad un confronto delle due metodologie di misura del dato. Gli errori che si commettono con l'impiego di un orologio manuale sono, in alcuni casi, dell'ordine del 20% a causa delle numerose operazioni che l'operatore deve eseguire. Sul grafico (figura 3) i tempi sono riportati in ore a partire dal momento in cui gli operatori sono arrivati alla stazione. Il tempo intercorso tra l'arrivo e l'inizio delle misure è quello necessario all'allestimento della strumentazione di acquisizione: per motivi di sicurezza infatti viene impiegato un apparato portatile di misura e registrazione in grado di adattarsi alle diverse condizioni di operatività senza inficiare la capacità stessa di archiviazione. Le misure sono state interrotte dopo circa 2 ore e 30 minuti, in corrispondenza di bassi tassi di trasporto ($20 \text{ kg}/\text{min}$) e portate idriche inferiori a $3 \text{ m}^3/\text{s}$. Va fatto notare che l'evento di piena è stato caratterizzato da una portata di picco sicuramente superiore ai $17 \text{ m}^3/\text{s}$. Come si può osservare dalla rappresentazione grafica, esiste un andamento di base del tasso di trasporto solido al fondo proporzionale a quello delle portate idriche: dall'analisi stocastica dei dati logaritmizzati e relativi alla prima ora di misure, è stato individuato un trend pari a $Q_s = -0.013 * t + 5.12 [\log(\text{kg}/\text{min})]$ (ovvero:

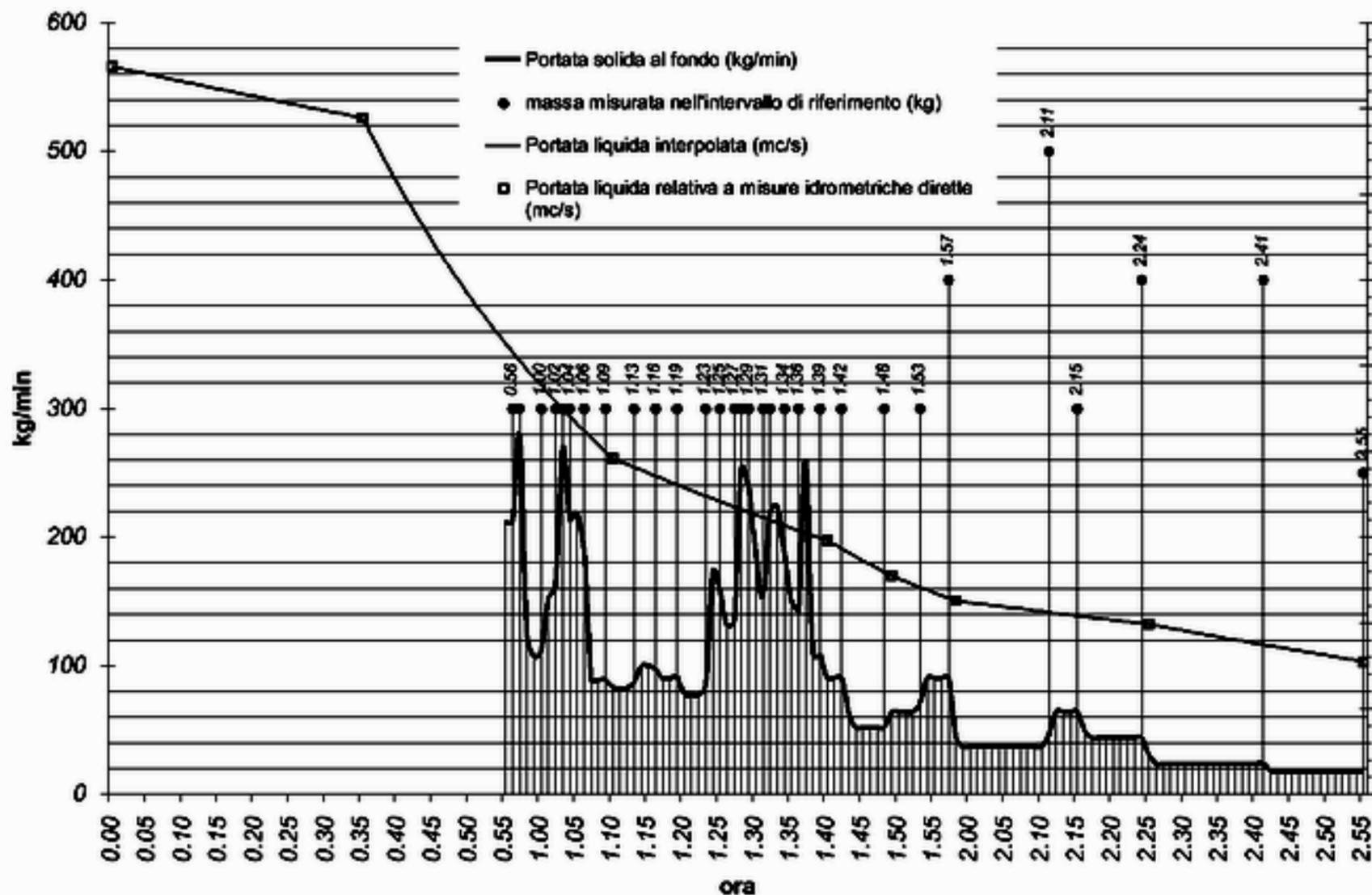


Figura 3. Evento di piena del 28/11/03

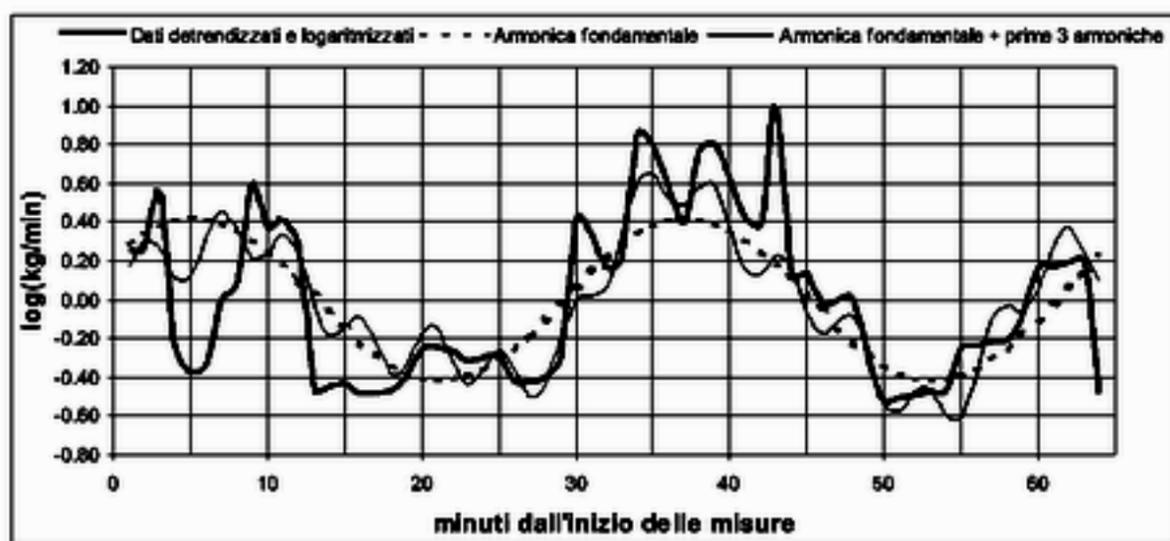


Figura 4. Armoniche dell'evento di piena del 28/11/03

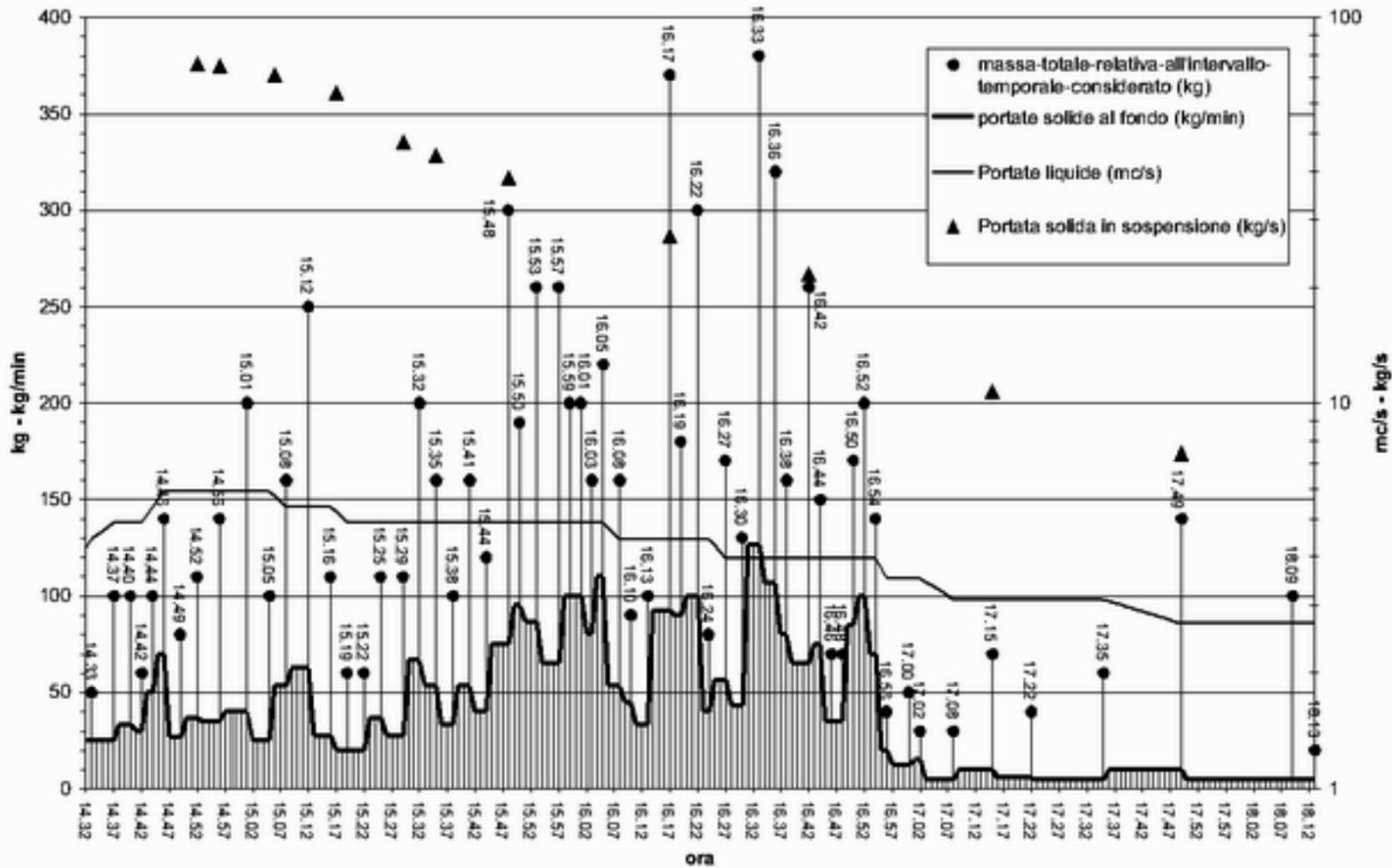


Figura 5. Evento di piena del 18/01/04

$-1.463 * t + 171.07$ [kg/min]). Alcune fluttuazioni improvvise, legate a forti apporti di sedimenti, determinano lo scostamento dal trend suddetto. Durante queste fasi di trasporto molto intenso si raggiungono portate solide dell'ordine di 280 kg/min. Dall'analisi delle armoniche, ottenute tramite la serie di Fourier, della porzione di dati misurati fino alle ore 2:00, logaritmizzati e detrendizzati, è possibile notare che l'armonica con ampiezza massima, corrispondente al periodo $T=32$ min, riesce a rappresentare da sola l'andamento della serie temporale (figura 4). Ordinando le armoniche in ordine decrescente di ampiezza si nota, infatti, che già dalla seconda (armonica 13) si verifica una riduzione dell'ampiezza a circa un terzo (tabella 1).

Tabella 1. Caratteristiche delle armoniche.

| Armonica | Frequenza (1/min) | Ampiezza log(kg/min) | Periodo (min) | Fase (rad) |
|----------|----------------------|-------------------------|------------------|---------------|
| 1 | 0.0313 | 0.4199 | 32' 00" | 0.7360 |
| 13 | 0.2188 | 0.1294 | 4' 34" | -0.2654 |
| 2 | 0.0469 | 0.1279 | 21' 20" | -0.0040 |
| 4 | 0.0781 | 0.1258 | 12' 48" | 0.6838 |
| 5 | 0.0938 | 0.1232 | 10' 40" | -1.0520 |

2.4 EVENTO DI PIENA DEL 18/01/04

Per questo evento di piena (figura 5) non è stato possibile allestire il sistema di acquisizione; tuttavia, l'esperienza effettuata presenta il pregio di interessare un arco elevato di tempo e quindi di particolare rilievo ai fini dello studio della variabilità temporale del fenomeno del trasporto solido al fondo. Per lo stesso evento, inoltre, sono stati raccolti, tramite campionatore manuale, alcuni campioni di trasporto solido in sospensione, che hanno fornito valori di concentrazione compresi tra 12.8 e 2.75 g/l. L'evento si è verificato pochi mesi dopo quello precedentemente illustrato, quindi in condizioni morfologiche e sedimentarie presumibilmente simili. L'inizio delle misure è avvenuto dopo che l'innesco del trasporto solido al fondo si era verificato. Il picco di portata liquida transitato presso la stazione non ha superato i $6 \text{ m}^3/\text{s}$ ed il trasporto solido al fondo ha mostrato un'intensità massima pari a 126 kg/min. Il fenomeno più interessante che si può rilevare dalla rappresentazione grafica di questo evento è la scarsa correlazione tra l'andamento delle portate liquide e quello del bedload per le prime due ore e mezza di misure. Dall'analisi stocastica di questi dati logaritmizzati è stato individuato un trend crescente pari a $Q_s = 0.007 * t + 3.4$ [log(kg/min)] (ovvero $0.379 * t + 28.68$ [kg/min]) che

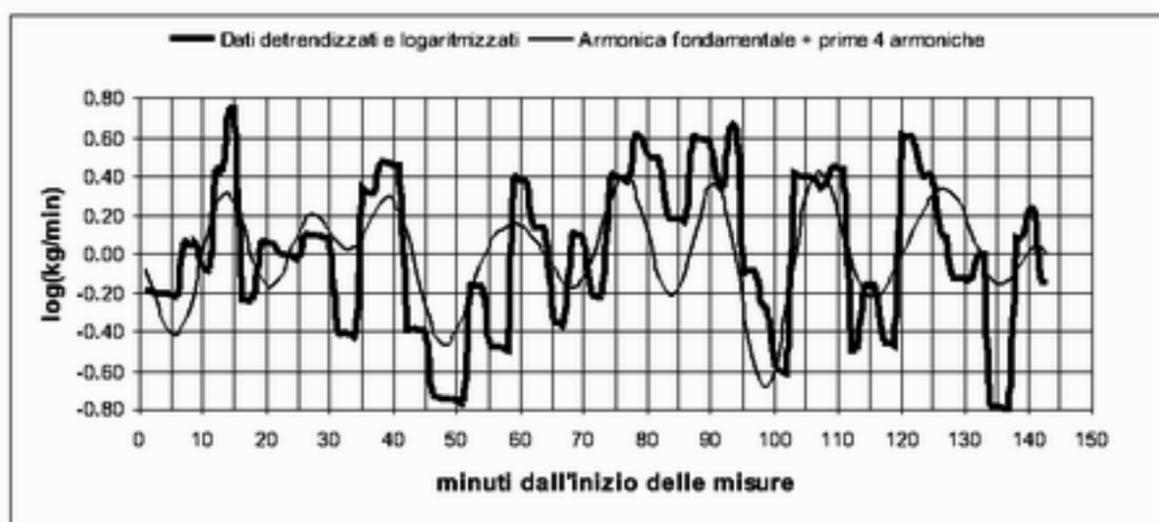


Figura 6. Armoniche evento di piena del 18/01/04

si contrappone a quello decrescente del flusso idrico. Il picco di trasporto, infatti, avviene in corrispondenza della fase decrescente della piena, per portate pari a circa 4 m³/s. Dall'analisi delle armoniche, ottenute

Tabella 2. Caratteristiche delle armoniche.

| Armonica | Ampiezza (1/min) | Frequenza log(kg/min) | Periodo (min) | Fase (rad) |
|----------|---------------------|--------------------------|------------------|---------------|
| 9 | 0.1997 | 0.0629 | 15' 54" | 0.3784 |
| 2 | 0.1920 | 0.0140 | 71' 30" | 0.1789 |
| 8 | 0.1507 | 0.0559 | 17' 54" | 1.4647 |
| 3 | 0.1424 | 0.0210 | 47' 37" | 1.1965 |
| 6 | 0.1413 | 0.0420 | 23' 48" | -1.4002 |

tramite la serie di Fourier, della porzione di dati misurati fino alle ore 16:57, logaritmizzati e detrendizzati, è possibile notare la presenza di 5 armoniche che presentano un'ampiezza comparabile e che riescono insieme a rappresentare l'andamento della serie temporale (figura 6). Si può concludere quindi che i dati misurati durante questo evento sono caratterizzati da 5 periodicità principali, le cui caratteristiche sono riportate in tabella 2. Tali valori sono risultati analoghi a quelli ottenuti tramite analisi del correlogramma della serie temporale. Il fenomeno di trasporto decresce sino a valori trascurabili (uguali o minori a 10 kg/min) in corrispondenza di portate liquide pari a 3 m³/s.

3 ANALISI DELLE CORRELAZIONI TRA PORTATA LIQUIDA E PORTATA SOLIDA

Sulla base delle esperienze effettuate si è cercato di individuare una relazione tra i dati di portata liquida e quelli di portata solida del tipo $Q_s = aQ_l^b$ in cui Q_s =portata solida (kg/min), Q_l =portata liquida

(mc/s). I dati misurati sono dunque stati elaborati in forma grafica e riportati in figura 7. Da una prima osservazione si rileva come i dati relativi alla fase crescente dell'evento del 28/03/2001 si distribuiscono in un'area distinta, rispetto a tutti gli altri. Questo andamento risulta limitato alla sola fase crescente del fenomeno del trasporto solido relativo a tale evento di piena, in quanto, successivamente all'interruzione delle misure, si è riscontrata una distribuzione di dati ricadente nell'altro settore del grafico. I dati acquisiti nella fase decrescente infatti, evidenziano una differenza di circa due ordini di grandezza con i precedenti. I dati relativi all'evento del 30/03/2001, anch'essi relativi ad una fase calante, si distribuiscono analogamente alla fase decrescente dell'evento precedentemente discusso. I dati inerenti all'evento del 2003, relativo anch'essi alla fase decrescente del trasporto, si collocano nuovamente in corrispondenza dei dati rilevati durante le fasi calanti di entrambi gli eventi del marzo 2001. L'ultimo evento registrato riguarda sia la fase crescente che calante del trasporto solido e si colloca ancora una volta nel settore sinistro del grafico. La correlazione tra portate solide e liquide relativa all'evento del 2004, risulta però non eccessivamente soddisfacente ($R^2=0.57$). Per lo stesso evento, i valori del trasporto solido in sospensione risultano superiori di ben due ordini di grandezza rispetto a quelli del trasporto solido al fondo. Le portate solide in sospensione, calcolate assumendo concentrazione costante per l'intera area bagnata, mostrano una quasi perfetta correlazione con le portate liquide ($R^2=0.98$).

4 DISCUSSIONE

L'analisi del trasporto solido al fondo mette in luce la netta differenza tra i dati relativi al 2001 (fase as-

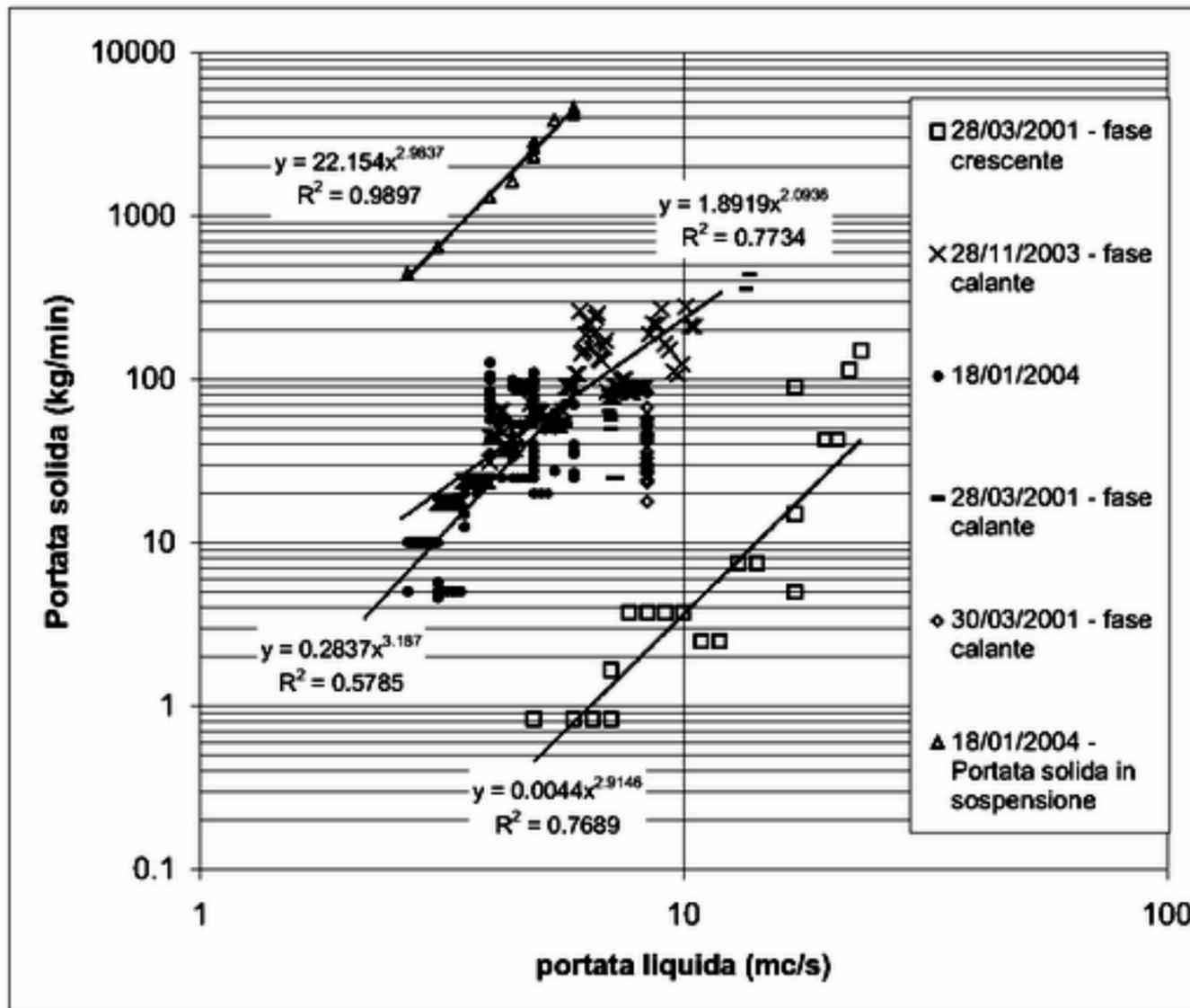


Figura 7. Correlazioni tra portata liquida e portata solida

cedente della piena) e quelli relativi al 2003-2004 (fasi ascendenti e discendenti) e 2001 (fase discendente). Come si può osservare dai grafici, nel 2001 il trasporto solido al fondo si è innescato per portate pari a circa $5 \text{ m}^3/\text{s}$ e non è arrivato a trasportare quantità elevate di sedimenti ($> 100 \text{ kg}/\text{min}$) prima di raggiungere un deflusso idrico superiore a $17 \text{ m}^3/\text{s}$. In corrispondenza di questo valore la rottura dell'armour ha determinato la presa in carico del materiale sub-superficiale. Prima di questo momento si può ritenere che il materiale in arrivo alla stazione di misura fosse caratterizzato da sedimenti non molto grossolani rimossi dallo strato superficiale del letto dell'alveo e transitanti tra i ciottoli che corazzavano il letto (fase 1 di trasporto - Bathurst, 1987). Per portate pari a circa $4 \text{ m}^3/\text{s}$, invece, l'evento del gennaio 2004, ha mostrato, anche nella fase ascendente della piena, tassi di trasporto al fondo sensibilmente più elevati. Questi valori ricadono nel campo delle intensità di bedload registrate nel corso dell'evento (in fase discendente) del novembre 2003. Questa fase, posteriore alla rimozione dello strato superficiale, può essere definita fase 2 di trasporto. Sulla base di quanto detto rimane da giustificare la ragione per la quale, durante la fase ascendente della piena del gennaio

2004, i tassi di trasporto risultassero prossimi a quelli delle fasi discendenti, sebbene, tra l'altro, i valori di portata liquida fossero ben lontani dai $17 \text{ m}^3/\text{s}$ per i quali si è innescato, nel 2001, un intenso fenomeno di trasporto. Sebbene le motivazioni di un simile comportamento possano essere molteplici, gli autori ritengono che un ruolo importante sia quello giocato dai caratteri morfologici dell'alveo. L'alveo attivo sensibilmente più stretto (nel 2004 rispetto al 2001), ha certamente favorito un processo di canalizzazione del flusso (maggiore energia) che ha contribuito a rimuovere la protezione dell'armour del canale anche in corrispondenza di portate idriche non eccessivamente elevate. I sedimenti sub-superficiali sono stati quindi presi in carico con maggior semplicità ed il trasporto solido al fondo si è attestato subito su valori prossimi a quelli tipici delle fasi calanti di forti eventi di piena (fase 2 di trasporto). La scarsa correlazione tra portate liquide e solide è legata alla presenza di notevoli pulsazioni nel fenomeno del trasporto solido al fondo (Hayward and Sutherland, 1974; Reid et al., 1985; Gottesfeld and Tunnicliffe, 2003). Lo studio delle armoniche dei due eventi per i quali si disponeva della maggiore quantità di dati ha evidenziato la presenza di due distinti periodi di

pulsazione del fenomeno del trasporto solido al fondo. Il primo evento (28-11-03), ha evidenziato una periodicità pari a 32 minuti; un valore praticamente identico a quello stimato da Tacconi and Billi (1987) per alcuni eventi registrati negli anni '80. Il secondo evento (18-01-04), invece, ha messo in luce una periodicità pari alla metà di quello precedente (circa 16 minuti). La durata di quest'ultimo intervallo è compatibile con quella registrata da Cudden and Hoey (2003), su canali che presentano caratteristiche morfologico-sedimentarie simili a quelle del torrente Virginio. Queste pulsazioni sono state messe in relazione al passaggio di forme sedimentarie di piccola lunghezza d'onda (dai 2 ai 10 metri), caratterizzate da una discreta omogeneità granulometrica (elevato sorting).

5 CONCLUSIONI

Le esperienze effettuate negli ultimi tre anni, dopo il ripristino e il potenziamento della stazione (Pancani, 2001), hanno fornito importanti dati per lo studio del fenomeno del trasporto solido. In particolare è stato possibile effettuare misure di trasporto solido al fondo e di portata, permettendo una prima valutazione delle correlazione tra portate liquide e solide. E' altresì emersa la necessità di potenziare ulteriormente il sistema di acquisizione e renderlo fisso, in modo da consentire l'attivazione immediata delle misure e di automatizzare gran parte delle operazioni. Nel corso delle esperienze sono stati acquisiti ulteriori dati, in questa sede non trattati, relativamente alle granulometrie del trasporto solido al fondo. In particolare, per l'evento del gennaio 2004 sono stati prelevati 13 campioni volumetrici del trasporto solido e per l'evento di novembre 2003 sono stati acquisiti i filmati del materiale in transito sui nastri di carico per circa 2 ore. I prossimi obiettivi delle due unità di ricerca, oltre a quello di acquisire nuove misure, saranno dunque finalizzati all'analisi granulometrica del bedload, sia manuale che tramite elaborazione digitale delle immagini (Cencetti et al., 2003; Buttler et al., 2001), in modo da poter individuare relazioni con l'intensità del flusso idrico ed con le caratteristiche sedimentologiche dell'alveo.

BIBLIOGRAFIA

J. C. Bathurst. Measuring and modeling bedload transport in channels with coarse bed materials. In K. Richards, editor, *River Channels: Environment*

and Process, pages 272–294. Blackwell, Oxford, 1987.

J. Buttler, S. Lane, and J. Chandler. Automated extraction of grain-size data from gravel surfaces using digital image processing. *J. Hydraul. Res.*, 39: 519–529, 2001.

C. Cencetti, A. Fredduzzi, I. Marchesini, and P. Tacconi. Esperienze di rilevamento e determinazione dei caratteri granulometrici di alvei ghiaiosi. In *Atti del I Congresso Nazionale AIGA*, pages 181–198. Chieti, 19-20 febbraio, 2003.

J. R. Cudden and T. B. Hoey. The causes of bedload pulses in a gravel channel: the implication of bedload grain size distributions. *Earth Surf. Proc. and Landforms*, 28:1411–1428, 2003.

F. Ginanni, I. Becchi, and E. Caporali. Misure sperimentali di trasporto solido in alveo. In *28° Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche*, pages 247–254, 2002.

A. S. Gottesfeld and J. Tunncliffe. Bed load measurements with a passive magnetic induction device. In J. Bogen, T. Fergus, and D. E. Walling, editors, *Erosion and sediment transport measurement in rivers: technological and methodological advances*. IAHS Publ. 283, 2003.

J. A. Hayward and A. J. Sutherland. The Tortlesse stream vortex-tube sediment trap. *J. Hydrol.*, 13: 41–53, 1974.

G. Pancani. *Strumentazione per il monitoraggio del trasporto solido*. Tesi di laurea, Università degli studi di Firenze, 2001.

I. Reid, L. E. Frostik, and J. T. Layman. The incidence and nature of bed load transport during floods flow in coarse grained alluvial channels. *Earth Surf. Proc. and Landforms*, 10:33–44, 1985.

P. Tacconi and P. Billi. Bed load transport measurements by the vortex-tube trap on Virginio creek, Italy. In C. R. Thorne, J. C. Bathurst, and R. D. Hey, editors, *Sediment Transport in Gravel-Bed Rivers*, pages 583–606. John Wiley & Sons, Chichester, 1987.

S. J. Winterbottom. Medium and short-term channel planform changes on the River Tay and Tummel, Scotland. *Geomorphology*, 34:195–208, 2000.