

Michele Greco*

INFLUENZA DELLA SCABREZZA SULLA VALUTAZIONE DEL PARAMETRO ENTROPICO DI VELOCITÀ NELLE CORRENTI A PELO LIBERO

INFLUENCE OF ROUGHNESS ON ENTROPY VELOCITY PARAMETER ASSESSMENT IN OPEN CHANNEL FLOW

Sulla base dei risultati derivati dall'analisi di dati di campo e di laboratorio relativi a misurazioni di velocità, è riscontrata una dipendenza del rapporto $\Phi(M)$ tra velocità media della corrente e velocità massima dalla scabrezza del fondo espressa in termini di scabrezza relativa. In particolare tale influenza risulta decisamente marcata laddove si presentano condizioni di deflusso in acque basse fino, cioè, a valori del rapporto tra profondità della corrente e dimensione caratteristica degli elementi di scabrezza (D/d) inferiori a 4, mentre per valori superiori il valore di $\Phi(M)$ risulta pressoché indipendente dalla scabrezza relativa. A supporto di tale risultato viene sviluppata una trattazione teorico-analitica che, partendo dalla relazione cardine della legge di distribuzione entropica di velocità e l'impiego delle leggi classiche del moto uniforme e delle resistenze al moto, spiega ampiamente, per l'appunto, la sussistenza di una dipendenza logaritmica del rapporto $\Phi(M)$ dalla scabrezza relativa.

Parole chiave: Distribuzione di velocità, Parametro entropico, Scabrezza, Coefficiente di resistenza.

Based on experimental velocity measurement data collected both in laboratory and in field, the paper proposes a relationship between the parameter $\Phi(M)$, defined as mean cross section velocity over maximum velocity, and the ratio water depth/bed roughness (D/d). In particular, such influence becomes remarkable whenever shallow water flow conditions occur, that is when the ratio between the flow depth and the reference roughness height is less than 4, while $\Phi(M)$ seems to be constant as the value of D/d increases. To enforce this result, a theoretic-analytical formulation, based on entropy velocity profile law and classical relationship for uniform flow and friction factor, is proposed enlightening the general logarithmic relationship existing between $\Phi(M)$ and D/d .

Keywords: Velocity Profile, Entropy Parameter, Roughness, Friction Factor.

1. INTRODUZIONE

Lo studio delle correnti a pelo libero ed in particolare della distribuzione di velocità nella sezione di deflusso, rappresenta un settore dell'idraulica che continua ad attirare e stimolare l'attenzione da parte dei ricercatori non fosse altro perché alla ricerca di relazioni speditive e di facile calibrazione ed applicazione per un uso corrente ed efficace.

Leggi classiche dell'idraulica fluviale, logaritmiche, di potenza o polinomiali, rappresentano, nella esigenza di determinare un numero significativo di parametri per la loro applicazione, strumenti generalmente poco funzionali soprattutto nelle fasi operative e di campo legate al monitoraggio dei deflussi sia ordinari sia di piena e, ancor di più, nella determinazione o ricalibrazione delle scale di deflusso negli alvei naturali o nei canali artificiali.

Negli ultimi anni, anche in risposta ad un sensibile avanzamento della ricerca nel campo ed a risultati sempre più confortanti e rassicuranti, ha preso piede l'impiego della distribuzione entropica di velocità proposta, nella formulazione originaria, da Chiu (1987) e successivamente arricchita

di notevoli e significativi contributi teorici ed applicativi provenienti da un ampio bagaglio sperimentale e di studio (Chiu, 1989, 1991; Chiu et al., 1995; Xia, 1997; De Araújo et al., 1998; Greco, 1998; Greco et al., 2002, 2004; Moramarco et al., 2004; Marini et al., 2011; Mirauda et al., 2011).

La peculiarità di tale legge risiede nella esigenza di valutare un solo parametro per determinare la distribuzione di velocità, il parametro entropico M , derivabile dal rapporto tra le velocità media e massima della corrente, $\Phi(M)$.

L'attenzione via via prestata alla determinazione del parametro M , o meglio del rapporto $\Phi(M)$, è tuttora oggetto di osservazione ed indagine e rappresenta un argomento di approfondito dibattito in relazione alla possibilità che risulti ragionevolmente invariante nella sezione in esame e tale da configurarsi come una caratteristica peculiare del corso d'acqua (Burnelli et al., 2008; Moramarco et al., 2010). In particolare la sensibile uniformità del valore di tale rapporto durante i deflussi di portate di piena, induce a maggior ragione all'impiego della distribuzione entropica di velocità

* Scuola di Ingegneria, Università degli Studi della Basilicata, Potenza, viale dell'Ateneo Lucano 10, 85100, Italia, tel.: +39 0971 205199, fax.: +39 178 2277113, e-mail: michele.greco@unibas.it.

per derivare le scale di deflusso e, quindi, utili strumenti di monitoraggio e controllo dei corsi d'acqua. Ma le stesse risultanze sperimentali che da un lato propongono il parametro entropico costante per regimi sostenuti di deflusso in occasione di profondità della corrente relativamente alte, lasciano spazio ad una incertezza sulla possibile variabilità del rapporto tra velocità media e velocità massima in corrispondenza di deflussi contenuti se non proprio effimeri, definibili di "acque basse", laddove il ruolo delle scabrezze condiziona, anche in maniera decisa, il flusso liquido.

In tali ultime condizioni, l'uso della modellistica numerica interviene con correttivi imputati/bili ad un diverso valore del coefficiente di resistenza e, quindi, evidenzia la necessità di migliore caratterizzazione della dinamica dei flussi energetici che potrebbero essere alterati nella loro stima laddove non si intervenisse, ad esempio, variando il punto di nullo del profilo di velocità (y_0) (Moramarco et al., 2010) ovvero ammettendo che per tali regimi di acque basse il parametro entropico è condizionato dall'importanza della scabrezza, o meglio della dimensione della scabrezza, rispetto ai tiranti in gioco.

Ed in tale contesto che si inserisce il contributo del presente lavoro che, partendo dall'analisi di dettaglio di un ampio campione di misure di velocità condotte in laboratorio ed in situ su corsi d'acqua naturali, perviene ad una formulazione empirica di dipendenza del rapporto tra le due velocità media e massima dalla scabrezza relativa, qui espressa in termini di profondità relativa o sommergenza relativa, determinata dal rapporto tra la profondità media della corrente, D , e la dimensione caratteristica degli elementi di scabrezza, d . Tale dipendenza è sensibilmente marcata per valori di sommergenza relativa inferiori a 4, che coincide ragionevolmente con il limite per cui al di sotto di tali rapporti si manifestano condizioni di deflusso in presenza di macroscabrezze, propriamente di larga scala o intermedie, (Bathurst et al., 1981; Bathurst, 1985), mentre risulta decisamente debole, se non praticamente inesistente, per valori superiori, giustificando, nei fatti, l'assunzione di invariabilità del rapporto $\Phi(M)$ per deflussi sostenuti di morbida e di piena.

Ad avvalorare, e quindi rafforzare, la soluzione sperimentale, affidata in prima battuta alla determinazione dei coefficienti della regressione logaritmica che meglio interpreta il volume di dati sperimentali, il lavoro sviluppa una trattazione teorica-analitica che, partendo dalla formulazione entropica del rapporto $\Phi(M)$ e pescando nel paniere delle leggi classiche dell'idraulica fluviale per la valutazione della velocità media, della velocità massime e del coefficiente di resistenza, spiega fisicamente la sussistenza di tale relazione tra il rapporto di velocità e la scabrezza relativa.

L'importanza di tale risultato, oltre che di carattere scientifico, risiede nella maggiore affidabilità della distribuzione entropica di velocità ossia della sua più efficace applicabilità nel campo dei bassi regimi di flusso in cui la conoscenza del campo di moto e dei gradienti di velocità rappresenta un elemento rilevante nello studio della dinamica degli inquinanti e degli ecosistemi fluviali in relazione alla qualità della risorsa idrica e dei sistemi biocenotici e naturali in genere.

2. ANALISI DEI DATI SPERIMENTALI DI LABORATORIO E DI CAMPO

La ricerca di una possibile dipendenza del rapporto tra la velocità media e massima della sezione, $\Phi(M)$, e la scabrezza relativa della corrente, espressa in termini di sommergenza relativa, quindi rapporto tra la profondità media della corrente, D , e dimensione caratteristica degli elementi di scabrezza del fondo dell'alveo/canale, d , è stata condotta sulla base di un volume significativo di misure di velocità condotte sia in laboratorio su correnti stazionarie sia in campo su corsi d'acqua naturali in regimi di magre e deboli morbidie.

Il volume di dati disponibili è risultato particolarmente significativo e sensibilmente omogeneo con un campo di variabilità della sommergenza relativa ricompreso nell'intervallo 1.9-17 e portate differenziate in termini di ordini di grandezza tra i dati di laboratorio e quelli di campo. Procedendo ad un rapido inquadramento dei due database analizzati, è utile osservare che:

- *dati di campo*: relativi a sezioni monitorate su corsi d'acqua naturali con pendenza variabile tra 0.2% e 0.8%, portata media compresa nell'intervallo 3.7-9 m³/sec e diametro medio dei sedimenti (d_{50}) con un minimo di 3 cm ed un massimo di 8.6 cm, a cui corrisponde un campo di variabilità della sommergenza relativa ($D/d=D/d_{50}$) prossimo a 5-17;
- *dati di laboratorio*: relativi ad una campagna estesa di misure condotte sul canaletta rettangolare con tronco di misura interamente ricoperto di sfere in legno di diametro (d_s) 3.5 cm con pendenza variabile tra 0.1% e 1%, portata media compresa nell'intervallo 7, 72 lt/sec, a cui corrisponde un campo di variabilità della sommergenza relativa ($D/d=D/d_s$) prossimo a 2-7 (Mirauda et al., 2011; Greco et al., 2013)

Il campo di variabilità delle velocità medie e massime, risente, inevitabilmente, dell'effetto scala che pone, in termini assoluti, i due set di misure in ambiti differenti, come riportato nella Fig. 1. La stessa figura, d'altro canto, evidenzia attraverso le rette di regressione, il valore del rapporto $\Phi(M)$ tra la velocità media della corrente e quella massima misurate nella sezione di controllo, che risulta pressoché costante tra i due casi di studio, rendendo comunque confrontabili i dati.

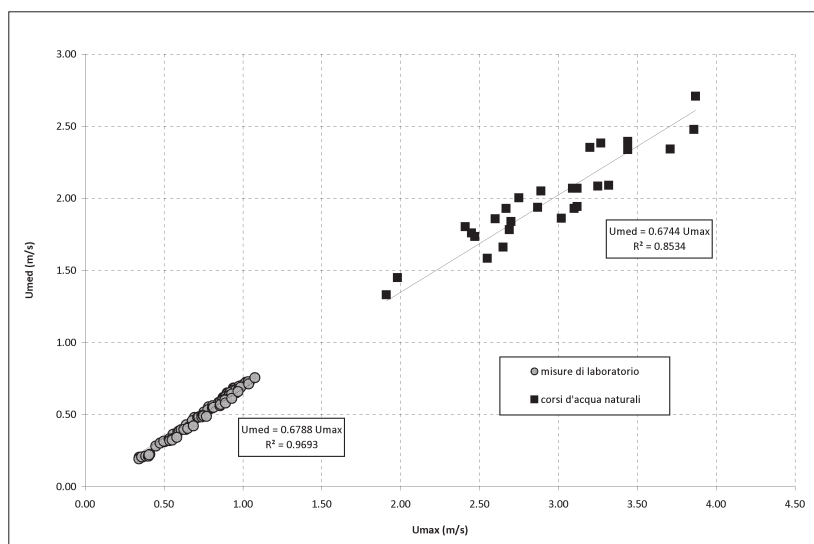


Figura 1 - Rapporto tra le velocità media e massima per i due set di misura in alveo ed in laboratorio.

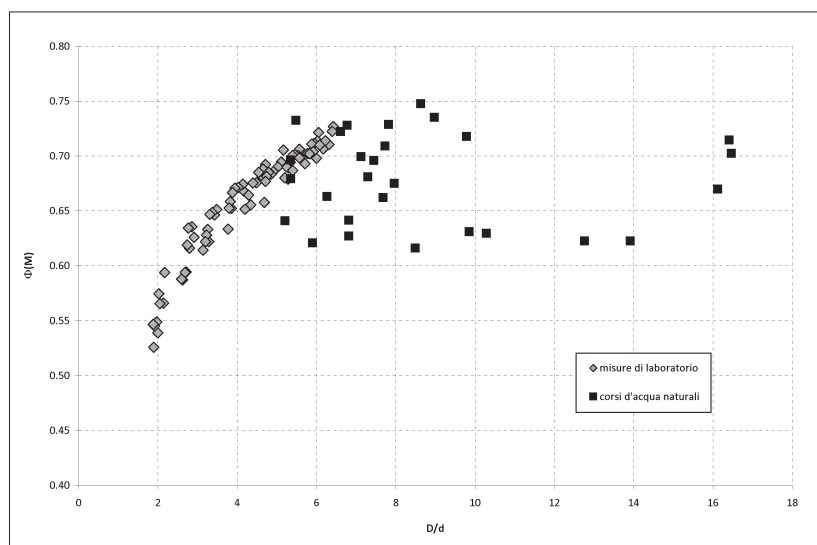


Figura 2 - Distribuzione del rapporto di velocità $\Phi(M)$ osservato in funzione della sommergenza relativa (D/d) nei due set di misure di campo ed in laboratorio.

Ad adiuvandum, la Fig. 2 riporta la distribuzione del rapporto tra le velocità media e massima, $\Phi(M)$, in funzione della sommergenza relativa osservata che pone, nella logica di confronto per similitudine, i due domini di dati in continuità con una parziale sovrapposizione in corrispondenza dell'intervallo di passaggio tra macroscabrezze, propriamente di larga scala e intermedie e scabrezze di piccola scala ($D/d \sim 4$). Nei fatti la classificazione proposta da Bathurst (1985) per la definizione dei campi di variabilità del regime di scabrezza individua tre ambiti distinti in funzione del rapporto tra la profondità della corrente, D , e la dimensione caratteristica della scabrezza individuata nel dimaetro d_{84} (D/d_{84}), ossia scabrezze di larga scala ($D/d_{84} < 1$), scabrezze intermedie ($1 < D/d_{84} < 4$) e scabrezze di piccola scala ($D/d_{84} > 4$).

Prestando maggiore attenzione al dato sintetico riportato in Fig. 1, si osserva che per bassi valori di velocità media e massima, la legge lineare di interpolazione, caratterizzata dal coefficiente angolare $\Phi(M)$, tende a sovrastimare l'effettivo rapporto tra le velocità che risulterebbe tendenzialmente inferiore via via che si riduce la velocità media della corrente. Tale processo è stato osservato da vari Autori per dati di monitoraggio relativi a sezioni di controllo di corsi d'acqua naturali. In particolare, Moramarco et al. (2010) nello spiegare la connessione analitico-teorica tra il coefficiente di Manning, n , ed il parametro $\Phi(M)$, imputano la differenza tra il valore osservato di n e quello atteso dal modello proposto, alla variabilità del punto di nullo del profilo di velocità (y_0) che assume particolare importanza nel passaggio tra bassi regimi di flusso ad alti, caratterizzando tale discontinuità direttamente dal valore assunto dalla profondità media della corrente. Il campo di variabilità della sommergenza relativa a cui fanno riferimento gli Autori (Moramarco et al., 2010) è confrontabile con quello investigato nel presente lavoro ed, in particolare, è ricompreso tra 3.3 e 16.5.

L'interpretazione fornita è congruente con l'ipotesi fatta da Moramarco et al. (2010) di invariabilità del rapporto $\Phi(M)$ ai vari regimi di flusso e che, di conseguenza, richiede l'aggiustamento proposto sul valore di y_0 .

Ad un'analisi più puntuale della variabilità del rapporto $\Phi(M)$ dalla sommergenza relativa, come meglio evidenziato

dalla Fig. 2, si riconosce una sensibile dipendenza che tende a ridursi via via che il rapporto D/d tende ad aumentare fino a potersi considerare pressoché insussistente allorché D/d attinga a valori superiori a 4. Quindi, per flussi medio alti, convenzionalmente definiti attraverso valori della sommergenza relativa maggiori di 4, il valore del rapporto di velocità $\Phi(M)$ può, ai fini pratici, considerarsi costante e da ciò la presunta invariabilità adottata nello studio dei deflussi di piena (Burnelli et al., 2008; Moramarco et al., 2010), mentre risulta fortemente influenzata dal rapporto profondità media/scabrezza per valori inferiori a 4.

3. DISCUSSIONE DEI RISULTATI

La distribuzione entropica di velocità introdotta da Chiu (1987) è basata sull'approccio probabilistico attraverso la definizione della funzione di "entropia informazionale" formulata da Shannon (1948) e successivamente applicata in ambito idraulico. La legge

del profilo entropico, quindi, può essere descritta mediante la relazione:

$$\frac{u}{U_{max}} = \frac{1}{M} \ln \left[1 + (e^M - 1) \frac{\xi - \xi_0}{\xi_{max} - \xi_0} \right] \quad (1)$$

dove u è la velocità locale misurata lungo la verticale, ξ è la variabile adimensionale dipendente dal sistema di riferimento utilizzato per la rappresentazione del campo di moto, ξ_0 e ξ_{max} sono i valori della stessa variabile adimensionale in corrispondenza del minimo di velocità ($u=0$) e del massimo ($u=U_{max}$), mentre M rappresenta il parametro entropico, la cui valutazione deriva dal rapporto tra la velocità media e massima della sezione, $\Phi(M)$, secondo l'equazione (Chiu e Said, 1995):

$$\Phi(M) = \frac{U_{med}}{U_{max}} = \left(\frac{e^M}{e^M - 1} - \frac{1}{M} \right) \quad (2)$$

dove, in generale, il coefficiente $\Phi(M)$ dipende dal regime di moto, dalla tipologia del campo di moto, dalla morfologia e dalla portata (Xia, 1997).

La relazione (2) rappresenta, quindi, la relazione fondamentale, dal punto di vista applicativo della distribuzione entropica di velocità sopra introdotta e la valutazione del parametro entropico M passa attraverso la conoscenza del rapporto espresso dal coefficiente $\Phi(M)$.

Spaziando nel campo dell'idraulica classica e fluviale (Rouse, 1950; Marchi, 1961; Streeter, 1961; Rubatta, 1968; Robertson, 1968; Marchi et al., 1981) è possibile attingere ad una cospicuo patrimonio di relazioni che legano sia la velocità media sia la velocità massima alle caratteristiche geometriche e dinamiche della corrente. In particolare è possibile esprimere la velocità media della corrente, U_{med} , attraverso la relazione di Chezy nella forma:

$$U_{med} = C \sqrt{g R_i S_0} = C u_* \quad (3)$$

con u_* la velocità d'attrito espressa come $\sqrt{g R_i S_0}$, R_i il raggio idraulico, S_0 la pendenza della linea dei carichi totali e

C il coefficiente di resistenza adimensionale, esprimibile, tra le varie relazioni disponibili in letteratura, mediante la relazione generalizzata di Colebrook, o similari, estesa alle correnti a pelo libero in moto assolutamente turbolento (Marchi *et al.*, 1981):

$$C = \frac{1}{k} \ln \left(\frac{13.3 \phi R_i}{\varepsilon} \right) = \frac{1}{k} \ln \frac{D}{d} + \frac{1}{k} \ln C_0 \quad (4)$$

dove ε rappresenta la scabrezza equivalente del fondo, ϕ un fattore di forma e C_0 un coefficiente funzionale che consente di esprimere la relazione in funzione del rapporto D/d . L'equazione (3) può essere riscritta in virtù della (4) come:

$$\frac{U_{med}}{u_*} = \frac{1}{k} \ln \frac{D}{d} + \frac{1}{k} \ln C_0 \quad (5)$$

Dalla legge logaritmica di velocità modificata portando in conto il deficit di velocità (*dip-modified velocity law*, Yang *et al.*, 2004), espressa mediante la relazione:

$$\frac{u(y)}{u_*} = \frac{1}{k} \ln \frac{y}{y_0} + \frac{\alpha}{k} \ln \left(1 - \frac{y}{D} \right) \quad (6)$$

con y la posizione corrente dal fondo, α il fattore di correzione del deficit di velocità, funzione della profondità media della corrente, D , e della posizione, y_{max} , in corrispondenza della quale si manifesta il massimo di velocità e tale che:

$$y_{max} = \frac{D}{1 + \alpha} \quad (7)$$

è possibile esprimere la velocità massima come:

$$\frac{U_{max}}{u_*} = \frac{1}{k} \ln \left(\frac{D}{y_0(1 + \alpha)} \right) + \frac{\alpha}{k} \ln \left(\frac{\alpha}{1 + \alpha} \right) \quad (8)$$

Inoltre, sulla base degli studi condotti da Rouse (1965) e successivamente da Ferro (2003) la posizione di nullo del profilo di velocità, y_0 , può essere espressa come proporzionale alla dimensione caratteristica della scabrezza, qui considerata d , mediante la relazione generale:

$$y_0 = C_\xi d \quad (9)$$

con C_ξ coefficiente sperimentale e pertanto:

$$\frac{U_{max}}{u_*} = \frac{1}{k} \ln \left(\frac{D}{d} \right) + \frac{1}{k} \ln \left(\frac{\alpha^\alpha}{C_\xi(1 + \alpha)^{1 + \alpha}} \right) \quad (10)$$

Quindi il rapporto tra velocità media e massima espresso dalla equazione (2) può essere ricavato come funzione della sommergezza relativa D/d attraverso la relazione:

$$\Phi(M) = \frac{U_{med}}{U_{max}} = \frac{\ln \left(\frac{C_0 D}{d} \right)}{\ln \left[\frac{D}{d} \frac{\alpha^\alpha}{C_\xi(1 + \alpha)^{1 + \alpha}} \right]} = A_\phi \ln \frac{D}{d} + B_\phi \quad (11)$$

con A_ϕ e B_ϕ opportuni coefficienti. In particolare, sulla base dei risultati ottenuti dall'analisi dei dati di laboratorio e di campo precedentemente illustrati, si osserva che, attesa la diversità di comportamento del rapporto tra le velocità media e massima a seconda del valore della sommergezza relativa, se $D/d < 4$ o $D/d > 4$, i valori dei coefficienti A_ϕ e B_ϕ si specializzano rispettivamente in:

$$\begin{cases} A_\phi = 0.16 \\ B_\phi = 0.44 \end{cases} \Rightarrow \frac{D}{d} < 4 \\ e \\ \begin{cases} A_\phi = 0 \\ B_\phi = 0.66 \end{cases} \Rightarrow \frac{D}{d} > 4 \quad (12)$$

La Fig. 3 riporta la dipendenza del rapporto $\Phi(M)$ dal valore di sommergezza relativa evidenziando la sussistenza sperimentale della regione di macroscabrezza delimitata dal valore $D/d < 4$, mentre per valori superiori il rapporto tra velocità media e massima tende a restare costante e pari a 0.66, ciò indipendentemente dalla base dei dati considerati se di laboratorio o di alvei naturali, rafforzandone, quindi, la ricaduta applicativa. Tale valore risulta in linea con quanto osservato in letteratura relativamente ad altri corsi d'acqua naturali sia per deflussi di morbida sia di piena (Xia, 1997; Burnelli *et al.*, 2008; Moramarco *et al.*, 2010).

Da ciò, nota che sia la condizione di deflusso della corrente, sia questa in presenza di basse sommergezze relative (macroscabrezza) sia medie-alte, l'equazione (11), specializzata nel valore dei coefficienti così come indicati nelle condizioni espresse dalla (12), consente, attraverso la relazione (2) di determinare $\Phi(M)$ e il corrispondente valore del parametro entropico M nonché, quindi, la calibrazione della distribuzione entropica di velocità.

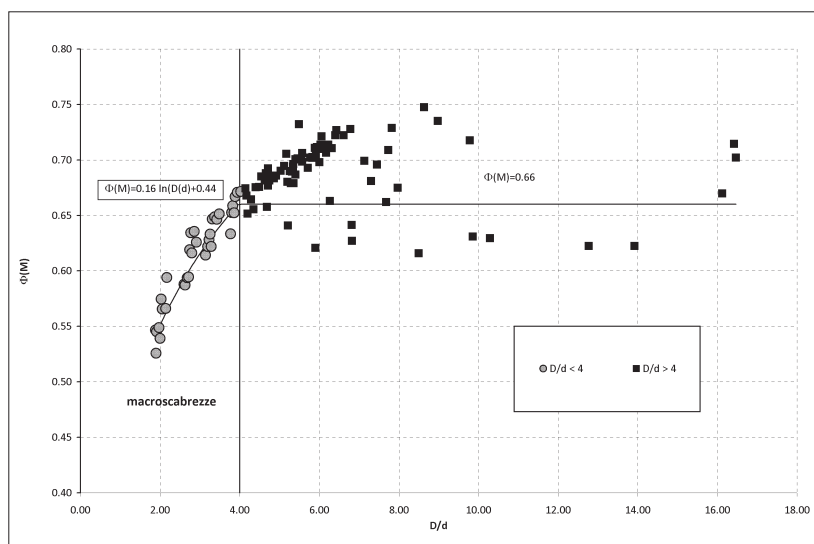


Figura 3 - Variabilità del rapporto $\Phi(M)$ in funzione della sommergezza relativa.

La Fig. 4 confronta il valore calcolato della velocità media della sezione, U_{mcalc} , derivato attraverso le relazioni dedotte dalle condizioni (12) e riportate nel grafico di Fig. 3 sulla base della misura della velocità massima, ed il valore effettivamente osservato, U_{media} , come ricavato dalle misure. La corrispondenza è pressoché ottimale sia alle basse velocità sia alle più elevate presentando una maggiore dispersione, comunque contenuta, per i dati relativi alle misure in campo, imputabile, in prima analisi, alla inevitabile migliore qualità delle misure di laboratorio a fronte delle indissolubili difficoltà di acquisizione dei dati in situ.

Pur tuttavia, come è riscontrabile immediatamente dalla distribuzione dell'errore percentuale sul calcolo della portata in funzione della sommergenza relativa di Fig. 5, l'approssimazione finale nella stima della portata mediante le relazioni proposte per la valutazione di $\Phi(M)$ risulta decisamente contenuta nei limiti di una buona risposta operativa (Errore % < 10%).

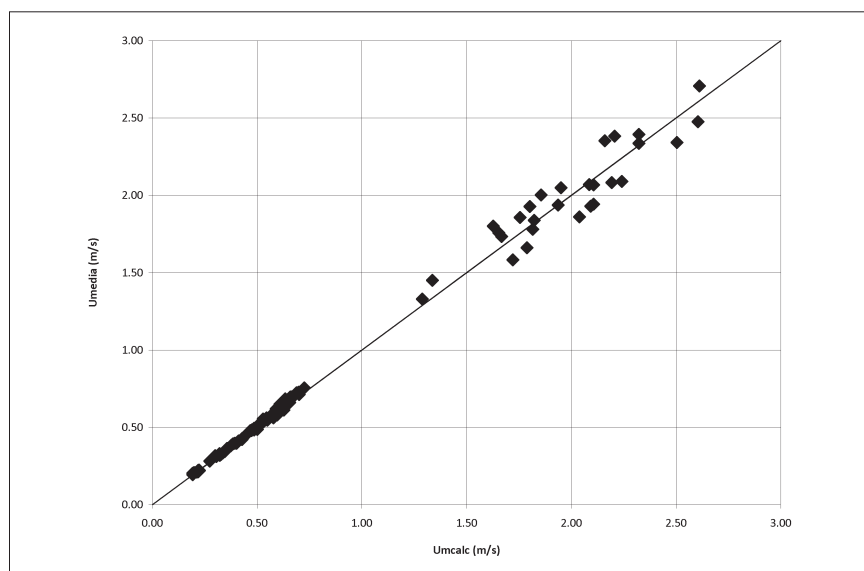


Figura 4 - Confronto tra la velocità media osservata e quella calcolata mediante la stima di $\Phi(M)$.

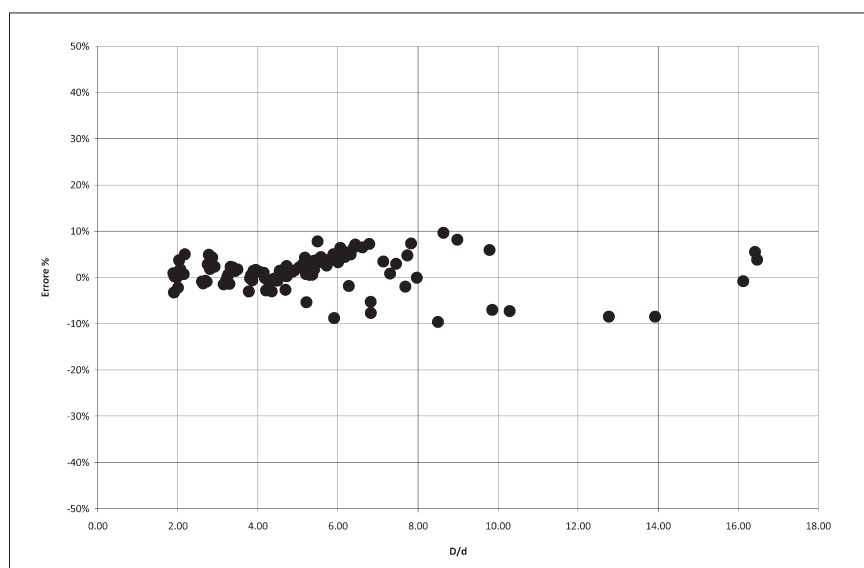


Figura 5 - Distribuzione dell'errore percentuale osservato nel calcolo della portata in funzione del rapporto D/d .

Il risultato ottenuto ha ricadute operative particolarmente significative in quanto interviene in una sensibile semplificazione sia nella modellazione del campo di velocità sia, soprattutto, nella determinazione della scala di deflusso in una sezione di controllo del corso d'acqua.

L'invariabilità del parametro entropico nella sezione investigata per valori di sommergenza relativa superiore a 4, consente di limitare il volume delle misure di velocità, sempre necessarie ai fini della calibrazione della scala di deflusso, a campagne da operarsi in regimi di portata che non comportino particolari rischi per gli operatori e, consapevoli dell'influenza della sommergenza relativa e dell'effetto via via ridotto del *dip-velocity*, limitando i campionamenti alla porzione superiore del campo di moto e indirizzati alla ricerca del massimo di velocità.

CONCLUSIONI

Sulla base della disponibilità di un significativo volume di dati sperimentali di laboratorio e di campo relativi a misure puntuali di velocità, è stata determinata la dipendenza del rapporto, $\Phi(M)$, tra la velocità media e massima della corrente dalla sommergenza relativa, D/d , definita come quoziente tra la profondità media della corrente e la dimensione caratteristica della scabrezza di fondo.

La serie di dati analizzati, che fornisce un campo di variabilità della sommergenza relativa nell'intervallo 2-17, ha consentito una formulazione logaritmica per $\Phi(M)$ fortemente dipendente dal rapporto D/d allorché quest'ultimo risulti inferiore a 4, caso di macroscaezze, ovvero il rapporto tra velocità media e massima si mantiene costante, prossimo a 0.66, laddove la sommergenza relativa attinga valori superiori a 4 indipendentemente dall'origine del dato se di laboratorio o di alvei naturali, in accordo con quanto osservato in letteratura per fiumi in presenza di deflussi di piena.

Tale risultanza sperimentale è stata spiegata, rafforzandone la valenza del dato, attraverso una trattazione teorico-analitica secondo la quale, a partire dalla formulazione della legge entropica di distribuzione della velocità e nell'ipotesi quanto mai verosimile di moto assolutamente turbolento, da cui le classiche leggi di resistenza di Colebrook e del moto uniforme di Chezy, si dimostra una effettiva dipendenza logaritmica del rapporto $\Phi(M)$ dal coefficiente D/d .

Noto il valore del rapporto $\Phi(M)$, risulta immediata la determinazione del parametro entropico M e, quindi, la calibrazione del profilo entropico di velocità e la conseguente valutazione della portata con errori congruenti con una funzionalità operativa di acquisizione del dato e processamento dello stesso.

BIBLIOGRAFIA

- Bathurst J. C., Li R. M., Simons D. B.**, Resistance equation for large-scale roughness, *Journal of the Hydraulics Division*, 107(HY12), 1981, pp. 1593-1613.
- Bathurst J. C.**, Flow resistance estimation in mountain rivers, *Journal of Hydraulic Engineering*, 111(4), 1985, pp. 625-643.
- Burnelli A., Mirauda D., Moramarco T., Pascale V.**, Applicability of entropic velocity distributions in natural channel, *Proceedings of 4th Int. Conf. on Fluvial Hydraulics, River Flow*, Izmir-Cesme, Turkey, 2008.
- Chiu C.-L.**, Entropy and probability concepts in hydraulics, *J. Hydr. Engrg. ASCE*, 113 (5), 1987, pp. 583-600.
- Chiu C.-L.**, Velocity distribution in open channel flow, *J. Hydr. Engrg. ASCE*, 115 (5), 1989, pp. 576-594.
- Chiu C.-L.**, Application of entropy concept in open channel flow, *J. Hydr. Engrg. ASCE*, 117 (5), 1991, pp. 615-628.
- Chiu C.-L., Said C. A.**, Maximum and mean velocity and entropy in open channel flow, *J. Hydr. Engrg.*, ASCE, 121 (1), 1995, pp. 26-35.
- De Araújo J. C., Chaudhry F. H.**, Experimental evaluation of 2-D entropy model for open channel flow, *J. Hydr. Engrg. ASCE*, 124 (10), 1998, pp. 1064-1067.
- Ferro V.**, ADV measurements of velocity distributions in a gravel-bed flume, *Earth Surface Processes and Landforms*, 28, 2003, pp. 707-722.
- Greco M.**, Distribuzione entropica di velocità in un corso d'acqua naturale, *XXVI Convegno di idraulica e Costruzioni idrauliche*, 1, 1998, pp. 103-112.
- Greco M., Mirauda D.**, Valutazione globale del parametro entropico di velocità, *L'Acqua*, 5, 2002, pp. 17-23.
- Greco M., Mirauda D.**, Expeditive methodology for river water discharge evaluation, *River Flow 2004*, (eds.) Greco, Carravetta & Della Morte, Taylor & Francis Group, London, ISBN 90 5809 658 0, 1, 2004, pp. 487-493.
- Greco M., Mirauda D., Volpe Plantamura A.**, Stima del parametro entropico per correnti stazionarie in presenza di scabrezza intermedia, *L'Acqua*, 4, 2013, pp. 21-26.
- Horritt M. S., Bates P. D.**, Evaluation of 1-D and 2-D models for predicting river flood inundation, *J. Hydrol.*, 268, 2002, pp.87-99.
- Marchi E.**, Il moto uniforme delle correnti liquide nei condotti chiusi e aperti, *L'Energia elettrica*, 1961.
- Marchi E., Rubatta A.**, Meccanica dei fluidi, UTET, Torino, 1981.
- Marini G., De Martino G., Fontana N., Fiorentino M., Singh V. P.**, Entropy approach for 2D velocity distribution in open channel flow, *J. Hydraulic Res.*, 49(6), 2011, pp. 784-790.
- Mirauda D., Greco M., Volpe Plantamura A.**, Influence of the entropic parameter on the flow geometry and morphology. *Proc. World Academy of Science, Engineering and Technology, ICWEE*, Phuket, Thailand, 2011, pp. 1357-1362.
- Moramarco T., Saltalippi C., Singh V. P.**, Estimation of mean velocity in natural channels based on Chiu's velocity distribution equation, *Journal of Hydrologic Engineering*, 9(1), 2004, pp. 42-50.
- Moramarco T., Singh V. P.**, Formulation of the entropy parameter based on hydraulic and geometric characteristics of river cross sections, *Journal of Hydraulic Engineering*, 15, No. 10, 2010, pp. 852-858.
- Pulci Doria G.**, Statistical quantities distribution in turbulent flows and use of the entropy concepts, *Entropy and Energy Dissipation in Water Resources*, Kluwer Academic Publishers, by V. Psingh and M. Fiorentino, 1992, pp. 541-586.
- Roberson J. A.**, Surface resistance of plane boundaries roughened with discrete geometric shapes, *Washington State Univ. Bulletin*, 308, 1968.
- Rouse H.**, Engineering hydraulics, *Proceedings of the fourth hydraulics conference*, Ed. Wiley, 1950.
- Rouse H.**, A classification of natural rivers, *Journal of Hydraulics Division*, 91(4), 1965, pp. 1-25.
- Rubatta A.**, Numeri di resistenza per fortissime scabrezze relative, *L'Energia Elettrica*, n. 3, 1968, pp. 188-193.
- Shannon C. E.**, A mathematical theory of communication, *The Bell System Technical Journal*, 27, 1948, pp. 623-656.
- Streeter V. L.**, *Handbook of fluid dynamics*, McGraw-Hill, 1° edition, 1961.
- Wiberg P. L., Smith J. D.**, Velocity distribution and bed roughness in high-gradient streams, *Water Resources Research*, 27, 1991, pp. 825-838.
- Xia R.**, Relation between mean and Maximum velocities in a natural river, *J. Hydr. Engrg.*, ASCE, 123 (8), 1997, pp. 720-723.