

Michele Greco, Domenica Mirauda, Antonio Volpe Plantamura\*

## STIMA DEL PARAMETRO ENTROPICO PER CORRENTI STAZIONARIE IN PRESENZA DI SCABREZZA INTERMEDIA

### ENTROPY PARAMETER ESTIMATION FOR STEADY FLOWS WITH MEDIUM-SCALE ROUGHNESS

*Nel presente lavoro, una metodologia speditiva, basata sulla distribuzione entropica di velocità, è proposta per ricostruire il campo di moto di correnti a pelo libero in presenza di scabrezza intermedia. Tale metodologia consente di determinare il parametro entropico nota che sia la sommergenza relativa. Un'ampia serie di misure sperimentali è stata acquisita da prove condotte su un canale rettangolare situato presso il Laboratorio di Idraulica dell'Università degli Studi della Basilicata, per differenti valori di pendenza e portata, in condizioni di moto stazionario, con valori intermedi di sommergenza relativa e rapporto di aspetto minore di 7.5.*

**Parole chiave:** Profilo di velocità, Parametro entropico, Scabrezza intermedia, Sommergenza relativa.

*In the present work an expeditive methodology, based on velocity entropic profile, is proposed to estimate the flow field asset in open channel flows in medium-scale roughness. The method allows to determine the entropy parameter through the relative submergence. A large set of experimental measurements was performed on a rectangular flume located in the Hydraulics Laboratory of the Basilicata University, for different values of slope and discharge, in steady flows conditions, medium relative submergence and aspect ratio less than 7.5.*

**Keywords:** Velocity Profile, Entropy Parameter, Medium-Scale Roughness, Relative Submergence.

#### 1. INTRODUZIONE

La conoscenza della distribuzione di velocità lungo il profilo verticale di una corrente turbolenta a pelo libero è di fondamentale importanza per lo studio dei fenomeni di resistenza al moto e per la valutazione delle condizioni di inizio dei processi di trasporto solido al fondo.

Ancora oggi, la ricostruzione del campo di moto prevede l'utilizzo delle equazioni classiche dell'idraulica, la cui corretta ed efficace applicazione richiede la stima attenta di numerosi coefficienti. Risultano, pertanto, indispensabili delle semplificazioni allo schema di calcolo che implicano, però, l'introduzione di ulteriori parametri e grandezze di difficile misurazione o valutazione. D'altro canto, un'eccessiva semplificazione porta ad affrontare la riproduzione dei processi idrodinamici in termini di grandezze medie che, in molte circostanze, non sono sufficienti a fornire risultati efficaci.

Tali problemi suggeriscono la necessità di ricercare un'unica equazione che possa descrivere completamente la distribuzione di velocità nell'intera verticale e, al contempo, essere funzione di un numero limitato di parametri di semplice determinazione che tengano conto, in modo particolare, della curva granulometrica dei sedimenti (scabrezza) che formano il letto dell'alveo e della forma della sezione.

In condizioni idrauliche di scabrezza di piccola scala è possibile ricostruire, con una buona approssimazione, l'anda-

mento della componente principale della velocità lungo la verticale mediante un'equazione di tipo logaritmico. In realtà, se si considera un canale con letto in ghiaia e si procede dal fondo verso la superficie, considerando trascurabile lo spessore del sottostrato viscoso, si ha lo sviluppo di un profilo con distribuzione logaritmica delle velocità nella "inner region", mentre nella "outer region" tale distribuzione può non approssimare bene i dati osservati. In particolare, Ferro e Baiamonte (1994) e precedentemente Keulegan (1938) hanno dimostrato come l'utilizzo del profilo di velocità proprio della "inner region" si adatti bene a descrivere la distribuzione di velocità fino alla distanza dal fondo dove si localizza la velocità massima. Inoltre, per rapporti tra la larghezza della sezione ( $B$ ) e la profondità media della corrente ( $D$ ) inferiori a 6, gli stessi Autori hanno evidenziato una chiara tendenza della velocità massima a localizzarsi al di sotto della superficie libera "dip-phenomenon" tendenzialmente migrante dall'asse del canale verso la parete (Ferro, 2003).

Per meglio rappresentare questo comportamento, in letteratura sono state proposte diverse tipologie di espressioni analitiche del profilo, che apportano dei correttivi alla distribuzione logaritmica canonica, introducendo una funzione di divergenza additiva (funzione di scia) che consente un'estensione della legge logaritmica anche alla "outer region" (Nezu e Rodi, 1986; Fenton, 2002). Tuttavia, in molti casi

\* Michele Greco, Professore Associato, tel.: +39 0971 205199, fax.: +39 178 2277113, e-mail: michele.greco@unibas.it, Domenica Mirauda, Ricercatore Confermato, tel.: +39 0971 205211, fax.: +39 0971 205160, e-mail: domenica.mirauda@unibas.it, Antonio Volpe Plantamura, Assegnista di Ricerca, tel.: +39 0971 205357, fax.: +39 0971 205160, e-mail: antonio.volpeplantamura@unibas.it, Scuola di Ingegneria, Università degli Studi della Basilicata, viale dell'Ateneo Lucano 10, 85100 Potenza, Italia.

anche il profilo logaritmico, così modificato, può non essere affidabile in presenza del dip di velocità, poiché prevede un incremento di velocità allontanandosi dalla parete.

L'andamento del profilo di velocità subisce delle ulteriori modifiche nel caso di scabrezza di grande scala, quando il rapporto fra la profondità della corrente e la dimensione caratteristica della scabrezza di fondo ( $d_{s4}$ ) è compreso tra 1 e 4 (regime di macroscabrezza e transizione). Nel caso di macroscabrezza, infatti, la scabrezza di fondo impegna localmente una notevole quantità di moto della corrente e, in tali condizioni, diverse osservazioni sperimentali (Marchand et al., 1984; Bathurst, 1985; Ferro e Baiamonte, 1994) hanno messo in luce che il profilo di velocità può assumere un andamento ad S, con un deficit di velocità in prossimità del fondo e notevoli incrementi verso la superficie libera. Anche per questo tipo di profilo sono state proposte delle funzioni di divergenza aventi forma polinomiale (Dean-Finley, in Ferro e Baiamonte, 1994) o logaritmico-polinomiale (Ferro, 2003), che risultano soddisfacenti se opportunamente calibrate attraverso misure sperimentali. Tuttavia, in condizioni di scabrezza di grande scala non è agevole trasferire i risultati di laboratorio alla scala di campo, infatti, Byrd et al. (2000) hanno riscontrato almeno quattro differenti tipologie di profilo: approssimativamente logaritmico, approssimativamente lineare, ad S e irregolare.

Studi più recenti condotti su correnti in moto uniforme o permanente hanno evidenziato, invece, la possibilità di descrivere efficacemente il campo di moto attraverso leggi di velocità derivate da formulazioni alternative a quelle rigorose, che discendono dall'applicazione delle teorie di massimizzazione del contenuto entropico informazionale della corrente (Chiu, 1987).

Tali leggi si rifanno alla parametrizzazione semplice della struttura analitica della distribuzione di velocità, inglobando, in un solo coefficiente, l'influenza della geometria della sezione e della scabrezza, e, basandosi sul valore medio delle grandezze idrauliche, conferiscono maggiore elasticità al modello e semplicità di applicazione.

La distribuzione entropica di velocità, infatti, richiede la valutazione dell'unico parametro  $M$ , che, nella formulazione originaria in condizioni di moto uniforme e permanente (Chiu, 1987), può essere ottenuto dal rapporto tra la velocità media e massima della corrente nella sezione investigata.

Per i corsi d'acqua naturali, alcune osservazioni condotte su correnti di diversa potenza hanno evidenziato una possibile dipendenza lineare tra la velocità media e quella massima della sezione (Xia, 1997), con una contenuta variabilità del rapporto,  $\Phi(M)$ , tra le due velocità, generalmente funzione della morfologia locale del sistema. Tale risultato ha conferito un maggiore respiro al modello entropico, avvalorandone la possibilità di un impiego efficace soprattutto nell'ambito delle correnti naturali.

In particolare, le classiche distribuzioni di velocità entropiche (1-D e 2-D) sono state diffusamente applicate nell'idraulica dei moti a pelo libero in condizioni stazionarie e non (Chiu, 1989; Chiu e Said, 1995; Greco e Mirauda, 2004; Moramarco et al., 2008; Marini et al., 2011) fornendo risultati importanti, soprattutto nel caso di correnti caratterizzate da scabrezza di piccola scala.

Una minore affidabilità dell'approccio entropico è stata, invece, riscontrata nella ricostruzione del profilo di velocità per correnti in presenza di scabrezza di grande scala. Infatti, è stato mostrato come per bassa profondità,  $M$  sembra essere influenzato dagli effetti del fondo (Moramarco e Singh,

2010) e quindi dal ruolo giocato dalla sommergenza relativa, (Mirauda et al., 2011)  $D/d$  (definita come il rapporto tra la profondità media,  $D$ , e la dimensione della scabrezza,  $d$ ), sull'assetto della corrente. Inoltre, in tali condizioni, il rapporto di aspetto,  $B/D$ , sembra influenzare significativamente la posizione in cui si verifica la massima velocità della corrente ( $y_{max}$  o similmente  $h$ ), inducendo ad assumere il dip di velocità ( $\delta h = 1 - y_{max}/D$ ) indipendente dalla concentrazione di scabrezza e generalmente decrescente per rapporti di aspetto crescenti ( $B/D > 6$ ) (Ferro, 2003).

Il presente lavoro, pertanto, sulla base di numerose misure di velocità acquisite in un canale di laboratorio a pelo libero nel caso di geometria regolare, scabrezza intermedia, portate e pendenze variabili e bassi rapporti di aspetto, nonché nell'ipotesi di ragionevole invariabilità del dip di velocità, propone di verificare l'efficacia di una formulazione speditiva del profilo entropico di velocità, ricercando una possibile correlazione funzionale tra il coefficiente  $\Phi(M)$  e la sommergenza relativa,  $D/d$ .

In dettaglio, le misure di velocità sono state acquisite con un micro mulinello in un canale rettangolare, con una concentrazione di elementi sferici in legno fissati al fondo, che hanno consentito di ottenere rapporti di aspetto ( $B/D$ ) minori di 7.5 e condizioni di scabrezza intermedia ( $1.9 < D/d < 6.5$ ). Tali misure sono state, quindi, elaborate per derivare la relazione tra  $\Phi(M)$  e la sommergenza relativa, successivamente validata sulla base della determinazione dell'errore percentuale tra i profili di velocità osservati e quelli calcolati, nonché sulla misura/calcolo della portata per le diverse condizioni di pendenza.

L'utilizzo di tale metodologia speditiva per la stima del profilo di velocità potrebbe, quindi, risultare fondamentale per ridurre i tempi e i costi delle attività di campo, e per limitare le difficoltà ordinariamente incontrate dagli operatori durante le campagne di misura.

## 2. APPARATO SPERIMENTALE E MISURE

Le prove sperimentali sono state effettuate su un canale a pendenza variabile situato nel Laboratorio di Idraulica della Scuola di Ingegneria dell'Università degli Studi della Basilicata. Il canale è connesso ad un circuito idraulico che consente di ottenere portate stazionarie. Il canale, lungo 9.00 m, presenta una sezione rettangolare ( $0.5 \times 0.5 \text{ m}^2$ ), e il suo fondo è regolabile in pendenza nel range 0-1 % (Fig. 1a). Nella sezione di uscita è installata una griglia per regolare la profondità della corrente per ciascuna portata assegnata, in modo da avere solo una piccola variazione del livello idrico lungo l'asse longitudinale e per consentire una condizione di flusso quasi costante nel tratto di misura. La portata in ingresso è verificata mediante un diaframma installato nella condotta di alimentazione dell'impianto.

In base alla massima altezza della corrente prevista ( $\approx 0.25 \text{ m}$ ), il tratto di misura scabro (lungo 3 m) è stato localizzato a 4 m dalla sezione di imbocco (Fig. 1a), in maniera da smorzare i disturbi di grande scala e avere un livello idrico quasi costante. L'altezza della corrente è stata misurata da due idrometri posti all'inizio e alla fine del tratto di misura e la profondità,  $D$ , è stata assunta come valore medio dei due valori osservati.

Un sistema di sfere in legno, di diametro pari a  $d = 0.035 \text{ m}$ , è stato posizionato sul fondo del canale per riprodurre un letto fisso caratterizzato da elevata scabrezza (Fig. 1b, 1c). Per la configurazione degli elementi al fondo, le sfere disposte nel tratto di misura hanno permesso di ottenere una

concentrazione superficiale pari a 0.15, corrispondente alla massima resistenza al moto in accordo con Rouse (1965), e valutata come rapporto tra l'area totale proiettata dalle sfere sul piano e l'area totale del tratto scabro.

Il livello di riferimento utile per la valutazione dell'area equivalente, che tenesse conto degli elementi di scabrezza presenti nel tratto di misura, è stato calcolato, in accordo con Ferro e Baiamonte (1994), uguagliando il volume del letto scabro (sfere in legno) con un letto equivalente di sezione rettangolare e spessore costante ( $y_0=0.0036$  m).

Le prove sperimentali sono state condotte in condizioni di flusso stazionario per valori di portata nel range 7-76 l/s, pendenza 0.05-1 % e rapporto profondità/scabrezza,  $D/d$  (sommergenza relativa), tra 1.9 e 6.5.

La distribuzione di velocità è stata valutata su sette verticali nella sezione trasversale in corrispondenza del centro del tratto di misura, scelte rispettivamente a 1/8, 1/4, 1/3, 1/2, 2/3, 3/4 e 7/8 della larghezza del canale (Fig. 1b), e che hanno consentito di stimare con elevata precisione la velocità media della corrente, utile per il calcolo di verifica della portata. Le velocità sono state acquisite mediante un micro mulinello avente diametro dell'elica pari a 0.01 m, ed il numero dei punti di misura per ogni verticale è stato ottenuto sia imponendo il criterio che la differenza tra due velocità consecutive misurate fosse minore del 20% rispetto al massimo valore osservato tra le due (ISO 748, 1997), sia in base alla dimensione caratteristica del micro mulinello stesso.

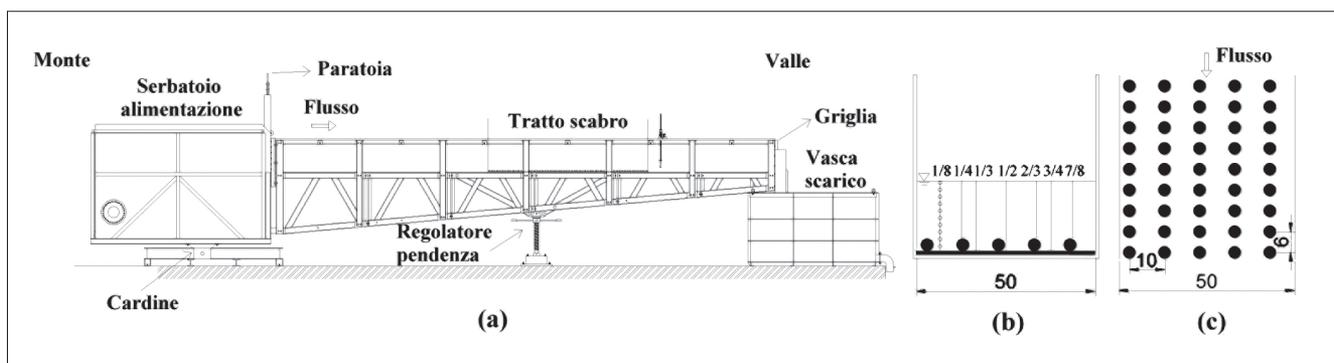


Figura 1 - (a) Canale sperimentale; (b) sezione trasversale del canale e ubicazione verticali di misura; (c) planimetria della distribuzione di scabrezza.

La Tab. I riporta i range dei parametri misurati campionati per numero di test, con  $U_m$  = velocità media e  $U_{max}$  = velocità massima della corrente.

TABELLA I - Sintesi delle prove e delle grandezze misurate in termini di campi di variabilità

Test	$i$ (%)	$Q$ (l/s)	$D/d$	$U_m$ (m/s)	$U_{max}$ (m/s)
1 - 9	0.05	7 - 76	2.17 - 6.43	0.20 - 0.68	0.34 - 0.94
10 - 18	0.1	7 - 75	2.14 - 6.40	0.19 - 0.68	0.34 - 0.94
19 - 27	0.25	7 - 76	2.06 - 6.31	0.21 - 0.70	0.36 - 0.98
28 - 36	0.375	7 - 75	2.03 - 6.23	0.21 - 0.70	0.36 - 0.98
37 - 45	0.5	7 - 76	2.00 - 6.17	0.22 - 0.71	0.41 - 1.01
46 - 54	0.625	7 - 76	1.97 - 6.09	0.21 - 0.72	0.39 - 1.02
55 - 63	0.75	7 - 75	1.91 - 6.00	0.22 - 0.73	0.41 - 1.04
64 - 72	0.875	7 - 74	1.90 - 5.91	0.21 - 0.73	0.40 - 1.03
73 - 81	1	7 - 76	1.89 - 5.83	0.22 - 0.76	0.41 - 1.08

### 3. ANALISI DEL PARAMETRO ENTROPICO SPERIMENTALE

Come ben noto, il profilo entropico di velocità derivato da Chiu (1987) si basa sull'approccio probabilistico e rappresenta uno strumento, a livello operativo e di modellazione, molto utile per ricercatori e ingegneri perché fondato su pochi parametri sintetici relativamente facili da derivare. La distribuzione di velocità per la verticale in cui si verifica la massima velocità è rappresentata dalla seguente equazione:

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

dove  $u$  è la velocità locale misurata lungo la verticale,  $\xi$  è la variabile adimensionale dipendente dal sistema di riferimento utilizzato per la rappresentazione del campo di moto,  $\xi_0$  e  $\xi_{max}$  sono i valori della variabile adimensionale a cui corrisponde il minimo ( $u=0$ ) e il massimo ( $u=U_{max}$ ) della velocità,  $M$  è il parametro entropico adimensionale necessario per la chiusura analitica del problema, e che, in maniera rigorosa, può essere calcolato mediante la relazione proposta da Chiu e Said (1995) che lega  $M$  al rapporto tra la velocità media e massima della sezione:

$$\frac{U_m}{U_{max}} = e^M \cdot (e^M - 1)^{-1} - \frac{1}{M} \quad (2)$$

D'altro canto, la relazione tra la velocità media e massima può essere descritta dall'equazione lineare (Chiu e Said, 1995; Xia, 1997):

$$U_m = \Phi(M) \cdot U_{max} \quad (3)$$

dove il coefficiente  $\Phi(M)$  dipende dal regime di moto, dalla tipologia del campo di moto, dalla morfologia e dalla portata. L'Eq. (2) può, quindi, essere riscritta come:

$$\Phi(M) = e^M \cdot (e^M - 1)^{-1} - \frac{1}{M} \quad (4)$$

la cui soluzione è funzione del rapporto  $\Phi(M)$ .

L'espressione generale della variabile adimensionale  $\xi$  è, invece, la seguente:

$$\xi = \frac{y}{D-h} \exp \left( 1 - \frac{y}{D-h} \right) \quad (5)$$

in cui  $y$  è la coordinata verticale,  $D$  è la profondità della corrente lungo la verticale considerata e  $h$  la distanza dalla superficie libera dove si verifica la velocità massima ( $h=D-y_{max}$ ), in corrispondenza della quale si osserva il *dip* di velocità.

Per correnti a pelo libero in canali naturali e artificiali, in cui la larghezza in superficie è sensibilmente maggiore della profondità (sezioni larghe o alti valori del rapporto di aspetto  $B/D$ ), è corretto ipotizzare che la velocità cresca in maniera monotona con l'altezza  $y$  della corrente, passando da un valore nullo al fondo a un valore massimo in corrispondenza della superficie libera ( $h=0$ ), e di conseguenza l'Eq. (5) diviene:

$$\xi = \frac{y}{D} \exp\left(1 - \frac{y}{D}\right) \quad (6)$$

Nel caso invece di sezioni in cui la larghezza dell'alveo è confrontabile con la profondità della corrente, l'evidenza sperimentale (Greco e Mirauda, 2002) ha indicato che il massimo della velocità si posiziona al di sotto del pelo libero ad una profondità prossima al 25 % dell'altezza media della corrente. Tale ipotesi è stata verificata e validata anche per le misure sperimentali acquisite e analizzate nel presente lavoro; infatti, in Fig. 2 è stata riportata, in funzione della massima altezza della corrente, l'esatta localizzazione della velocità massima acquisita per l'intera sezione e per tutti i test effettuati. In modo abbastanza evidente, si osserva che la velocità massima si verifica a circa 3/4 della profondità della corrente misurata dal fondo del canale. In tali condizioni, il valore di  $h$  può essere assunto pari a  $1/4 D$  e pertanto la variabile  $\xi$  diviene:

$$\xi = \frac{4y}{3D} \exp\left(1 - \frac{4y}{3D}\right) \quad (7)$$

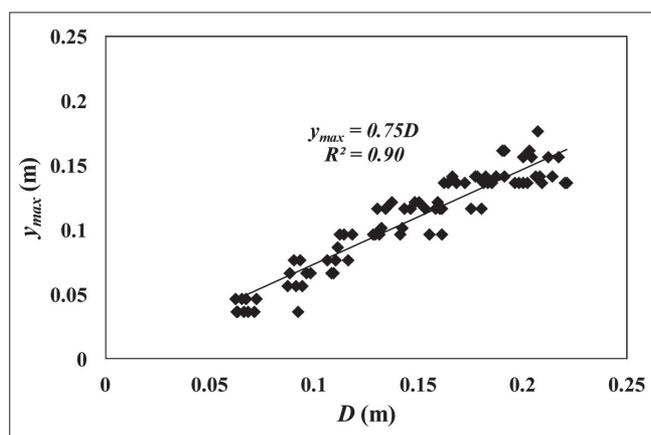


Figura 2 - Relazione tra la localizzazione della velocità massima osservata ( $y_{max}$ ) e la massima profondità della corrente,  $D$ .

Prendendo in considerazione questo risultato, fatte le dovute semplificazioni per  $\xi_0$  e  $\xi_{max}$ , l'Eq. (1) può essere riformulata come:

$$\frac{u}{U_{max}} = \frac{1}{M} \ln \left[ 1 + (e^M - 1) \cdot \frac{4y}{3D} \exp\left(1 - \frac{4y}{3D}\right) \right] \quad (8)$$

La corretta localizzazione della massima velocità della corrente rappresenta, quindi, un risultato particolarmente inte-

ressante ai fini di una semplificazione delle attività di misura in campo. Tuttavia, per limitare le lunghe e, a volte, complicate, operazioni di misura, difatti, può risultare utile e funzionale conoscere a priori il valore di  $\Phi(M)$  della sezione laddove non si disponga della stima alternativa della velocità media della corrente,  $U_m$ .

Ed è proprio in tale contesto, che è stato sviluppato ed inquadrato il presente lavoro finalizzato alla determinazione e validazione di una possibile relazione che legghi direttamente il rapporto  $\Phi(M)$  ad un parametro caratteristico della sezione di misura, di facile valutazione in campo, quale la sommersenza relativa,  $D/d$ . In particolare, la Fig. 3 riporta le coppie ( $U_m, U_{max}$ ) campionate per classi di sommersenza relativa uniformi, mostrando valori di  $\Phi(M)$  variabili nel range 0.55-0.72, tendenzialmente crescenti all'aumentare della sommersenza relativa.

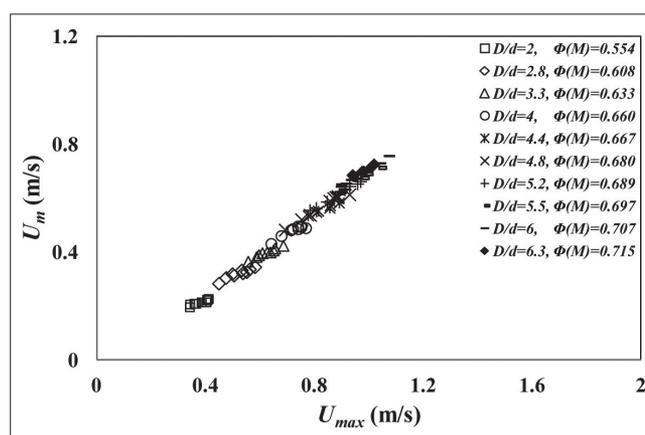


Figura 3 - Relazione tra le velocità medie ( $U_m$ ) e massime ( $U_{max}$ ) osservate durante le prove e campionate per sommersenza relativa,  $D/d$ .

Da un'analisi più approfondita e dettagliata, si è osservato che il rapporto  $U_m/U_{max}$  manifesta, per le condizioni investigate, una dipendenza logaritmica dalla sommersenza relativa, come riportato in Fig. 4, che induce a generalizzare la relazione tra le due entità, indipendentemente dalla pendenza locale. Pertanto,  $\Phi(M)$  può essere derivata dalla seguente equazione:

$$\Phi(M) = 0.136 \ln(D/d) + 0.466 \quad (9)$$

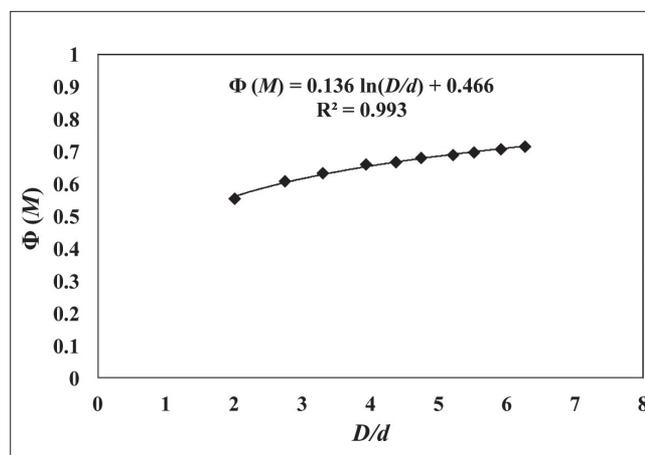


Figura 4 - Distribuzione di  $\Phi(M)$  in funzione della sommersenza relativa,  $D/d$ .

Il valore del parametro entropico,  $M$ , può, quindi, essere calcolato risolvendo la seguente relazione derivata dal sistema di equazioni (4) e (9):

$$e^M \cdot (e^M - 1)^{-1} - \frac{1}{M} = 0.136 \ln(D/d) + 0.466 \quad (10)$$

Al fine di validare la metodologia proposta, la successiva analisi è stata basata sul confronto tra due possibili schematizzazioni fisiche del campo delle velocità: la prima coincide con la formulazione entropica rigorosa proposta da Chiu (1987) attraverso l'Eq. (1), la quale riconosce il massimo delle velocità laddove effettivamente si verifica, necessitando, quindi, di tutte le misure di velocità lungo la verticale, e, di conseguenza, anche della conoscenza della velocità media della corrente, fondamentale per il calcolo di  $M$  mediante l'Eq. (2); la seconda, più speditiva, derivata dalle esperienze di laboratorio precedentemente illustrate e che rappresenta il punto cardine della metodologia proposta. Tale approccio si basa sulla stima di  $M$  formulata mediante la relazione (10) e dalla misurazione della velocità lungo la verticale in corrispondenza del punto posto a  $3/4$  della profondità  $D$ .

Tutto ciò nell'idea di produrre una generalizzazione e, di conseguenza, una semplificazione dell'applicabilità della legge entropica, riducendo le difficoltà nella determinazione del parametro entropico  $M$ , ottenibile attraverso la sola stima della sommergezza relativa della corrente, e l'acquisizione di un'unica misura di velocità sulla verticale, limitando, di fatto, il numero di misurazioni in seno alla corrente fluida.

La Fig. 5 mostra degli esempi di distribuzione di velocità osservata per alcune delle portate e pendenze considerate, e i rispettivi profili entropici calcolati con i due metodi sopra descritti, applicati per la verticale centrale. Analizzando le figure si può notare come la differenza tra gli andamenti dei due profili sia quasi nulla, tuttavia si osserva un leggero scostamento dei punti intermedi delle curve rispetto alla distribuzione effettiva delle velocità osservate, dovuto principalmente all'effetto locale indotto dalla presenza degli elementi di scabrezza distribuiti discontinuamente sul fondo. Ciò nonostante, gli scarti massimi osservati risultano decisamente accettabili, soprattutto se proiettati in una logica di semplificazione delle misure in situ, e comunque confinati nell'intervallo del 10-15 %.

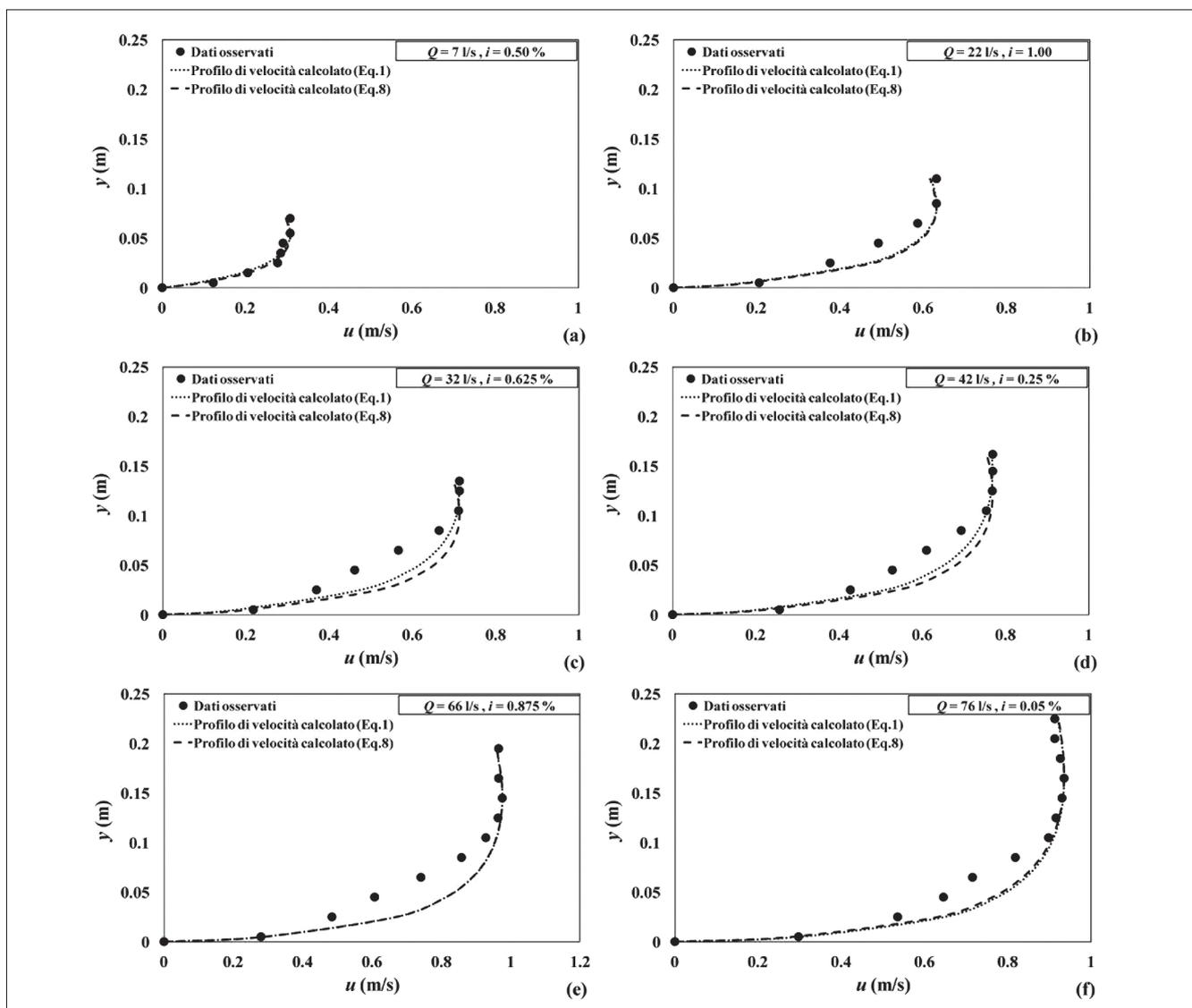


Figura 5 - Distribuzione delle velocità misurate lungo la verticale centrale per alcune portate investigate e alle differenti pendenze, meglio interpolate dai profili entropici di velocità considerati.

L'ulteriore validazione della metodologia proposta è stata operata con l'analisi di sensitività dell'errore percentuale ( $\varepsilon(Q) = (1 - Q_c/Q) \cdot 100$ ) tra la portata osservata ( $Q$ ) e quella calcolata ( $Q_c$ ), quest'ultima ottenuta in forma esplicita dalla seguente relazione:

$$Q_c = [0.136 \ln(D/d) + 0.466] \cdot U_{\max} A_{eq} \quad (11)$$

dove  $A_{eq}$  è l'area equivalente della sezione rettangolare trasversale del canale, pari a  $[B \cdot (D - y_0)]$  (Ferro, 2003) con  $y_0$  corrispondente al punto di nullo del profilo di velocità. Analizzando, infatti, la Fig. 6, che riporta la distribuzione dell'errore percentuale, in funzione della sommergezza relativa, si riscontra come gli errori più alti (minori di  $\pm 10\%$ ) sulla stima della portata si verificano per sommergezze relative minori di 3.5 (regime di macroscabrezza e di transizione), mentre per valori crescenti di  $D/d$  l'errore tende a ridursi (minori di  $\pm 5\%$ ). Tuttavia, è evidente come, per tutto il campo di sommergezza relativa investigato, i valori di portata sono ben riprodotti dall'Eq. (11).

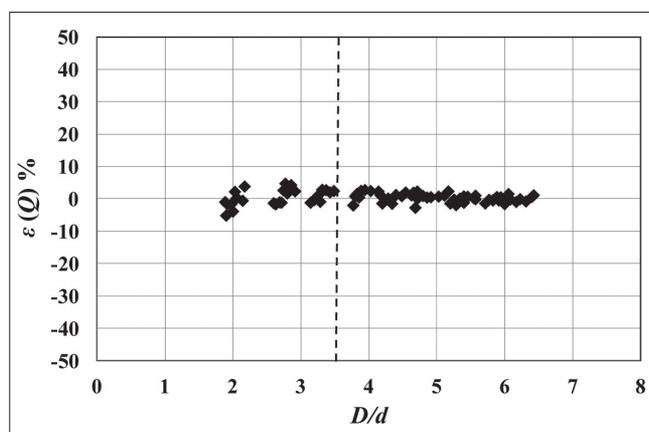


Figura 6 - Errore percentuale per le portate,  $\varepsilon(Q)$  %, in funzione della sommergezza relativa,  $D/d$ .

#### 4. CONCLUSIONI

Il presente lavoro ha mostrato la dipendenza del rapporto tra velocità media e massima,  $\Phi(M)$ , dalla sommergezza relativa,  $D/d$ , in correnti a pelo libero in presenza di scabrezza intermedia, proponendo una metodologia speditiva per il calcolo del parametro entropico,  $M$ , e, quindi, la stima della portata defluente. Lo studio si è basato su un ampio volume di prove di laboratorio effettuate in un canale a pendenza variabile, con rapporti di aspetto minori di 7.5 e con al fondo una nota e definita concentrazione di elementi sferici in legno a simulare una scabrezza regolare. Le misure di velocità, acquisite con un micro mulinello, sono state utilizzate per la determinazione del profilo entropico di velocità per diverse condizioni di pendenza e portata.

Sulla base dei dati elaborati, per il campo di sommergezza relativa osservato, è stata verificata la localizzazione della velocità massima ad una distanza di 3/4 dal fondo, ed è stata proposta una relazione esplicita per la stima di  $\Phi(M)$  nota la sommergezza relativa,  $D/d$ . La robustezza di tale formulazione è stata validata mediante la valutazione dei profili di velocità e un'analisi di sensitività sullo scarto tra le portate osservate e quelle calcolate. Dal punto di vista della pratica idraulica, il risultato riportato è rilevante per reindirizzare il monitoraggio delle correnti fluviali in termini di operabilità, consentendo lo sviluppo di una metodologia speditiva utile per la ricostruzione del campo di moto locale e per la stima della portata d'acqua in presenza di scabrezza di grande e media scala. Infatti, secondo lo schema proposto, è possibile effettuare un numero ridotto di misure di velocità, profondità e scabrezza, per ricostruire la distribuzione di velocità e, quindi, la portata, riducendo tempi e costi, nonché limitando le difficoltà durante la misura.

#### RINGRAZIAMENTI

Questo lavoro è stato parzialmente finanziato con i fondi del progetto PRIN 2008: "Modellistica entropica per la determinazione delle caratteristiche idrodinamiche nelle correnti a pelo libero".

#### BIBLIOGRAFIA

- Bathurst J. C., Flow resistance estimation in mountain rivers, *Journal of Hydraulic Engineering*, 111, No. 4, 1985, pp. 625-643.
- Byrd T. C., Furbish D. J., Warburton J., Estimating depth-averaged velocities in rough channels, *Earth Surface Processes and Landforms*, 25, 2000, pp. 167-173.
- Chiu C. L., Entropy and probability concepts in hydraulics, *Journal of Hydraulic Engineering*, 113, No. 5, 1987, pp. 583-600.
- Chiu C. L., Velocity distribution in open channel flow, *Journal of Hydraulic Engineering*, 115, No. 5, 1989, pp. 576-594.
- Chiu C. L., Said C. A. A., Maximum and mean velocities and entropy in open-channel flow, *Journal of Hydraulic Engineering*, 121, No. 1, 1995, pp. 26-35.
- Fenton J. D., The application of numerical methods and mathematics to hydrography, *Proc. 11th Australasian Hydrographic Conference*, 2002, Sydney, Australia.
- Ferro V., ADV measurements of velocity distributions in a gravel-bed flume, *Earth Surface Processes Landforms*, 28, 2003, pp. 707-722.
- Ferro V., Baiamonte G., Flow velocity profile in gravel-bed rivers, *Journal of Hydraulic Engineering*, 120, No. 1, 1994, pp. 60-80.
- Greco M., Mirauda D., Experimental analysis for the entropic parameter evaluation, *Proc. 2nd Int. Conf. on New Trends in Water and Environmental Engineering for Safety and Life: Eco-compatible Solutions for Aquatic Environments*, 2002, Capri, Italy.
- Greco M., Mirauda D., Expeditive methodology for river water discharge evaluation, *Proc. 2nd Int. Conf. on Fluvial Hydraulics, River Flow*, 2004, Naples, Italy.
- ISO 748, Measurement of liquid flow in open channel - Velocity-area methods, 1997.
- Keulegan G. H., Laws of turbulent flow in open channels, *Journal of National Bureau of Standards*, Research Paper 1151, 21, 1938, pp. 707-741.
- Marchand J., Jarrett R., Jones L., Velocity profile, water-surface slope, and bed-material size for selected streams in Colorado, Open-File Rep. 84-773, USGS Washington, D.C., 1984.
- Marini G., De Martino G., Fontana N., Fiorentino M., Singh V. P., Entropy approach for 2D velocity distribution in open channel flow, *Journal of Hydraulic Research*, 49, No. 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 2011*, Phuket, Thailand, 2011, pp. 1357-1362.
- 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.
- Moramarco T., Ammari A., Burnelli A., Mirauda D., Pascale V., Entropy Theory Application for Flow Monitoring in Natural Channels, *Proc. iEMSs 4th Biennial Meeting International Congress on Environmental Modelling and Software (iEMSs 2008)*, M. Sanchez-MArré, J. Béjar, J. Comas, A. E. Rizzoli, and G. Guariso, eds., Int. Environmental Modelling and Software Society, Barcelona, Catalonia, Spain, 2008, pp. 430-437.
- Moramarco T., Saltalippi C., Singh V. P., Estimation of mean velocity in natural channels based on Chiu's velocity distribution equation, *Journal of Hydraulic Engineering*, 9, No. 1, 2004, pp. 42-50.
- Nezu I., Rodi W., Open-channel flow measurements with laser doppler anemometer, *Journal of Hydraulic Engineering*, 112, No. 5, 1986, pp. 335-355.
- Rouse H., A classification of natural rivers, *Journal of Hydraulics Division*, 91, No. 4, 1965, pp. 1-25.
- Xia R., Relation between mean and maximum velocities in a natural river, *Journal of Hydraulic Engineering*, 123, No. 8, 1997, pp. 720-723.