

LE RESISTENZE AL MOTO IN PRESENZA DI MACROSCABREZZE

Michele Greco, Vito A. Copertino e Bernardo De Bernardinis
Dipartimento di Ingegneria e Fisica dell'Ambiente, Università della Basilicata
Via della Tecnica, 3 - 85100 Potenza - I

SOMMARIO

Vengono presentati i risultati di prove sperimentali condotte in laboratorio e mirate alla misura diretta della tensione tangenziale al fondo, esercitata dalla corrente idrica di un corso d'acqua con macroscabrezze al fondo. La disponibilità della misura diretta della tensione al fondo ha consentito di verificare l'idoneità del raggio idraulico a rappresentare la scala delle lunghezze caratteristiche del processo dissipativo e la validità delle precedenti formule di resistenza al moto, ottenute con diversi modelli dissipativi anche in corsi d'acqua naturali.

ABSTRACT

First results obtained through laboratory experiments and targeted to the measurement of the bottom shear stress are reported in the paper. Direct measurements of shear stress allow to determine the dissipative length scale coinciding to the hydraulics radius. Data collected are compared to estimation of flow resistance, resulting from different equations.

1. INTRODUZIONE

La caratterizzazione dei processi energetici attivi nelle correnti dei corsi d'acqua naturali, seppur animate mediamente da moto uniforme, presenta ancor oggi notevoli incertezze dipendenti dalla difficile stima delle grandezze che intervengono nelle dinamiche fluviali.

Le condizioni di deflusso della corrente idrica in moto turbolento pienamente sviluppato risentono sensibilmente non solo della geometria della sezione ma anche della forma, dimensione e natura degli elementi di scabrezza presenti sul fondo dell'alveo, delle modalità di evoluzione dei processi di trasporto dei sedimenti e quindi dell'importanza relativa della dimensione delle scabrezze al fondo in rapporto alla profondità media della corrente (Malaika et al. 1961; Perry et al., 1969; Becchi, 1970; Becchi, 1978; Pyle et al., 1981; Becchi et al., 1987; Bianco et al., 1993; Bianco et al., 1993; van Swol, 1993).

Non si può quindi prescindere dalle condizioni al contorno del campo di moto: la resistenza offerta dal perimetro bagnato di un alveo fluviale è sensibilmente variabile nello spazio e nel tempo e risulta impossibile definire un singolo parametro rappresentativo di tale processo; inoltre l'effetto dell'irregolarità del fondo dell'alveo sulla corrente fluida si differenzia a seconda del valore assunto dal rapporto tra la profondità della corrente e l'altezza degli elementi di scabrezza.

Assunto un contorno di materiale incoerente, è possibile allora riconoscere condizioni di deflusso in presenza di scabrezza di *piccola scala* quando, definita Y la profondità di moto uniforme della corrente e D la dimensione caratteristica di tale materiale solido, risulta $Y \gg D$; viceversa la condizione di scabrezza di *grande scala*, anche detta *macroscabrezza*, è espressa dalla condizione $Y \cong D$.

Nel caso di alvei naturali, la determinazione della dimensione, D , rappresentativa delle irregolarità del contorno non è univoca, rendendo incerto il limite tra macroscabrezze e scabrezze di piccola scala. Generalmente si distingue il regime di macroscabrezze da quello di scabrezze di piccola scala in dipendenza dal rapporto Y/d_ϕ , dove d_ϕ è un diametro di riferimento per il quale il ϕ è la percentuale in peso delle particelle di diametro inferiore. Solitamente si adotta la suddivisione proposta da Bathurst et al. (1981), per cui si hanno macroscabrezze con $Y/d_{50} < 2$ e $Y/d_{84} < 1.2$, si ha transizione con $2 < Y/d_{50} < 7.5$ e $1.2 < Y/d_{84} < 4$, si hanno infine scabrezze di piccola scala con $Y/d_{50} > 7.5$ e $Y/d_{84} > 4$.

A tale classificazione deve affiancarsi un coefficiente di forma definito dal rapporto B/Y , con B larghezza della corrente. Per valori di $B/Y < 5$, è stato evidenziato (Nezu et al., 1985; Ferro et al., 1992) uno scostamento sensibile del profilo di velocità dall'andamento logaritmico, proprio della turbolenza di parete, per connotarsi in una configurazione caratteristica "a forma di S". Tale fenomeno sembra suggerire atti di moto turbolento in cui la presenza di strati di equilibrio sia sopraffatta da processi di interazione tra le scie, generate a valle delle macroscabrezze, e i getti che si producono negli interspazi presenti tra le stesse. Tali processi non possono essere ritenuti localmente né mediamente stazionari.

E' così possibile individuare campi di moto turbolento con un diverso contenuto di strutture coerenti e vorticosi, in cui all'influenza della sommergenza relativa della corrente, Y/D , si aggiunga quella della densità degli elementi di scabrezza presenti sul fondo (Copertino et al., 1994). E' comune definire tale densità in termini di concentrazione unitaria, cioè del numero di macroscabrezze presenti sull'unità di area.

Studi condotti da vari autori (Perry et al., 1969; Bathurst, 1978; Bathurst et al., 1981; Bayazit, 1976; Graf, 1989; Graf, 1994; Nakagawa, 1991) constatano che il fattore d'attrito λ valutato nell'ipotesi di validità della legge logaritmica delle velocità, ben si accorda con i risultati sperimentali solo per alte sommergenze relative, mentre viene sottostimato in condizioni di bassa sommergenza. Tali considerazioni sono evidenziabili nel caso che il materiale incoerente sul fondo presenti almeno due classi granulometriche significativamente distinte. In una curva granulometrica continua, questa distinzione è misurabile nella differenza tra il d_{50} ed il d_{84} della distribuzione.

Tra gli studi condotti nel caso di deflussi strettamente bidimensionali in canali fortemente scabri, Gordienko (1967), ha riconosciuto distinti regimi di moto in funzione della sommergenza relativa e della spaziatura longitudinale, successivamente sistemati nella classificazione delle scabrezze di tipo "d" e "k" proposta da Perry et al. (1969).

L'esistenza di una regione interna del campo di moto, sottomessa allo strato di equilibrio, risulta comunque evidente in condizioni di bassa sommergenza sia per uniformi distribuzioni areali di scabrezza (O'Loughlin et al., 1969; Bayazit, 1976; Nakagawa et al., 1989) che per distribuzioni disuniformi (Bathurst et al., 1981; 1985). Il conseguente scostamento del profilo di velocità dalla distribuzione logaritmica origina inevitabili correzioni in quest'ultima riconducibili ad un diverso valore della costante B_r (Pyle et al., 1981) della formula logaritmica o alla determinazione della funzione di scia (Coles, 1957). Recentemente, studi mirati alla caratterizzazione delle tensioni turbolente in funzione di distribuzioni areali non uniformi di scabrezza (Lyn, 1993; Mazouz et al., 1994) cercano di interpretare lo scostamento del profilo di velocità in funzione della sommergenza relativa alla luce dei processi turbolenti attivi nella corrente.

Nel presente lavoro si procede ad uno studio del processo dissipativo in condizioni di bassa sommergenza in un canale artificiale, in cui le macroscabrezze, che hanno una forma irregolare nella realtà, sono state sostituite da elementi di forma sferica e di diametro costante, D , identificato con il d_{84} di una distribuzione granulometrica continua e bimodale.

Al fine di ricercare le grandezze scala che caratterizzano il processo dissipativo, si è voluto privilegiare, oltre la bassissima sommergenza, la variazione della distribuzione areale nella densità e nella uniformità degli elementi di scabrezza pur mantenendone la regolarità. Si sono forniti, così, contributi volti ad evidenziare l'esistenza di condizioni di transizione tra configurazioni areali limite, passando con diverse configurazioni sperimentali da una distribuzione regolare a: a) un predominante allineamento longitudinale che *canalizzasse* la corrente, facendo prevalere gli effetti di parete su quelli di fondo; b) un uniforme aumento della densità delle scabrezze al fine di osservare una parzializzazione del campo di moto in due regioni sovrapposte, la prima propria di un moto in un mezzo "quasi" poroso, la seconda di una corrente traspirata, così come suggerito da Rubatta (1968) e da Tsujimoto (Tsujimoto et al., 1986).

2. LE RESISTENZE AL MOTO IN PRESENZA DI MACROSCABREZZE

La relazione classica di Chézy:

$$U = C \sqrt{R_i j} = C(\Lambda_c / \varepsilon) u_* \quad (1)$$

evidenzia che la velocità media U è esprimibile come prodotto della velocità d'attrito u_* per il coefficiente di resistenza, C , che nel caso di moto pienamente turbolento, è funzione della sola scala delle lunghezze Λ_c e più precisamente del rapporto Λ_c / ε , con ε altezza della scabrezza.

Gli esperimenti riportati in letteratura sono stati sempre interpretati alla luce di un legame diretto tra il coefficiente C e la velocità d'attrito u_* , ascrivendo ad entrambe le grandezze una stessa scala delle lunghezze coincidente con il raggio idraulico R_i . Poiché ad oggi nulla può essere precisato in merito all'esistenza di una diversa scala per la caratterizzazione di tali grandezze, un primo contributo all'analisi di tali aspetti deriva dalla proposta di una misura indipendente della velocità media U e della velocità d'attrito, al fine di verificare l'attitudine della grandezza R_i a rappresentare la scala delle lunghezze caratteristica dei processi dissipativi in presenza di macroscabrezze.

Per il calcolo del coefficiente C sono state riconosciute ed applicate quelle relazioni che portano in conto la differenziazione dei tipi di scabrezza secondo lo schema "k" e "d", e dedotte sia da esperienze di laboratorio, analoghe a quelle condotte nella presente ricerca, sia da campagne di misura relative a corsi d'acqua montani, dove è possibile riconoscere deflussi caratterizzati da bassi valori di sommergenza relativa ed in condizioni di moto turbolento pienamente sviluppato.

Secondo Gordienko (1967), per qualunque regime di moto turbolento scabro e per qualsiasi condizione di scabrezza, il coefficiente di resistenza adimensionale può essere espresso in maniera semplice dalla relazione

$$C = \frac{1}{n} \beta^m \quad (2)$$

dove β rappresenta la profondità relativa della corrente riferita alla dimensione, D , caratteristica della scabrezza ($\beta=Y/D$) e n e m sono dei coefficienti sperimentali indicativi del regime di moto.

Due ipotesi di lavoro sono possibili nel caso di regime di moto del tipo IV (figura 1), in cui il coefficiente di resistenza è indipendente dalla sommergenza relativa:

1. il fondo si comporta come una parete a scabrezza di tipo “d” (Perry et al., 1969; Townsend, 1956); il moto di grande scala presente nella regione esterna allo strato di parete penetra attraverso la regione logaritmica e influenza direttamente la parete, caratterizzando il moto con una *scabrezza efficace* di scala proporzionale alla dimensione caratteristica del campo di moto e non alla dimensione caratteristica della scabrezza;

2. la corrente defluente è assimilabile allo schema (Morris, 1959) di *skimming flow* secondo il quale, pur in presenza di strutture vorticosse emesse dagli elementi di scabrezza e confinate negli interspazi longitudinali, il fluido defluisce su una pseudo parete scivolando sugli elementi di scabrezza e sulle masse d’acqua confinate che non partecipano al movimento di parete.

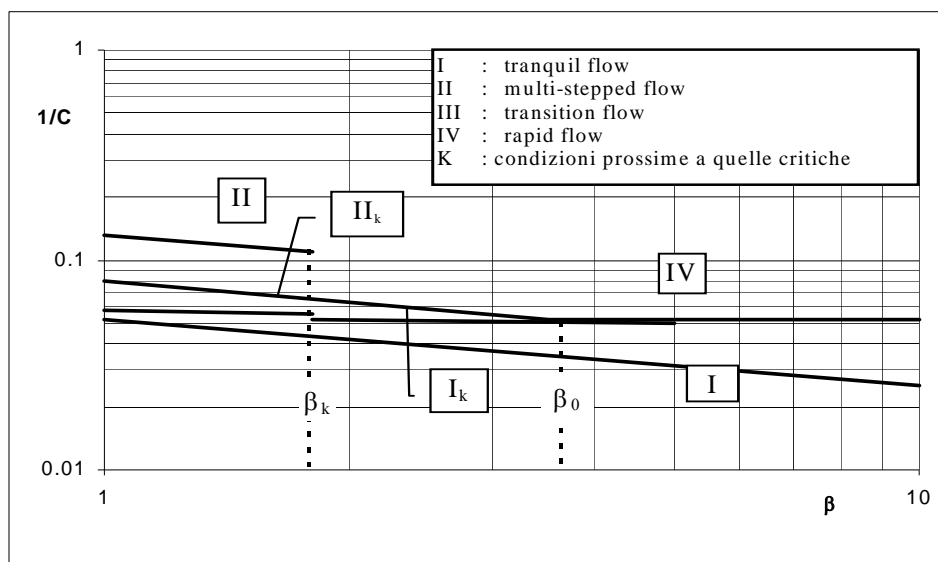


Figura 1 - Andamento del coefficiente di scabrezza C in funzione della profondità relativa β da Gordienko (1967)

Entrambe le ipotesi sono accettabili e verificabili sperimentalmente nel caso di deflussi con alti valori della densità di scabrezza. Una recente conferma della validità degli schemi sopra esposti è riportata da Bianco e Rosso (Bianco et al., 1993) in una serie di esperimenti che ripropongono le esperienze di deflusso su macroscabrezze prevalentemente monodimensionali, riproducendo configurazioni di moto sensibilmente bidimensionali. La loro esperienza avvalorava l'ipotesi di Gordienko ritrovando una relazione analoga alla (2), con una dipendenza dei coefficienti n e m dalla spaziatura longitudinale, s_l , ossia dalla densità di scabrezza. Poiché gli elementi di scabrezza non presentavano, in tali esperienze, alcuna spaziatura trasversale, s_t , nessuna dipendenza è osservata dalla disposizione degli elementi di scabrezza se non dalla frequenza longitudinale.

Un'analisi dell'influenza della spaziatura trasversale, e quindi del carattere *non monodimensionale* della scabrezza, fu proposta come condizione limite da Rubatta (1968). Nelle sue esperienze, che interessano un deflusso confinato in un tubo rettangolare reso

fortemente scabro dalla presenza di sferette a stretto contatto, oltre ad evidenziare la dipendenza ‘alla Nikuradse’ del parametro di resistenza per valori di sommergenza relativa medio alta, si rileva la presenza di un deflusso secondario che si attiva tra le intercapedini trasversali esistenti tra gli elementi di scabrezza. L’Autore si spinge nella sperimentazione al caso di contatto delle due pareti del condotto simulando, nei fatti, un moto di filtrazione. Anche in questo caso ritrova per il fattore di resistenza una dipendenza di tipo logaritmico simile alla relazione di Nikuradse:

$$\lambda = \frac{8}{C^2} = \frac{0.25}{(\log 3.715 \frac{4R}{\varepsilon} f)^2} \quad (3)$$

dove il termine $(4R/\varepsilon)$ rappresenta l’inverso della scabrezza relativa, ossia la profondità relativa della corrente β , ed f è il fattore di forma introdotto da Marchi (1961). Di questo tipo sono le relazioni proposte da Colosimo et al. (1988) e Copertino et al. (1988, 1993):

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = \frac{\sqrt{8}}{C} = 2.03 \log \frac{11.75 y_m}{3.16 \varepsilon} \quad (4)$$

(con y_m , profondità media della corrente ed ε ,altezza rappresentativa dell’elemento di scabrezza) e

$$C = \frac{H_0}{(H_0 - Y_0)} \frac{1}{k} \log \left(\frac{H_0}{Y_0} \right) - \frac{1}{k} \quad (5)$$

in cui H_0 è la profondità della corrente computata a partire dal livello di riferimento (coincidente con il fondo dell’alveo), Y_0 è la distanza tra il livello di riferimento e la superficie in cui la velocità è nulla e k è la costante universale di von Karman pari a 0.4.

La prima relazione, dedotta da misure sperimentali in sito su corsi d’acqua montani, porta in conto l’effetto della sommergenza relativa sul profilo di velocità. La seconda, invece, è dedotta dal confronto con dati sperimentali di vari Autori, adottando però l’accorgimento di computare il raggio idraulico come il rapporto tra *l’area effettiva della sezione idrica* ed il *reale contorno bagnato*, ovvero non trascurando il perimetro delle scabrezze. Infatti, come riportato da vari Autori in letteratura (Marchi, 1961; Rubatta, 1968) non sempre la stima della scala delle lunghezze caratteristiche del processo dissipativo può essere considerata coincidente con il raggio idraulico dedotto in maniera indipendente dalla dimensione della scabrezza. Del resto, già Marchi nel 1961 introdusse, come sopra riportato, un opportuno coefficiente correttivo f (fattore di forma) che nei fatti ripropone l’indeterminatezza che a volte si presenta nella definizione della scala geometrica nei processi dissipativi in presenza di macroscabrezze. Paris (Paris, 1989) evidenziò una stretta correlazione tra la tensione tangenziale al fondo e le dimensioni caratteristiche delle dune, in particolare la dipendenza dello sforzo tangenziale sulla superficie del corpo della duna ed il rapporto di contrazione definito come l’altezza della cresta della duna riferita alla profondità della corrente, in altre parole $1/\beta$, a sua volta correlato alla spaziatura longitudinale della scabrezza (Engel, 1980).

3. ATTIVITÀ SPERIMENTALE

Le misurazioni sono state condotte in una corrente defluente mediamente in moto uniforme in una canaletta da laboratorio idoneamente strumentata (figura 2).

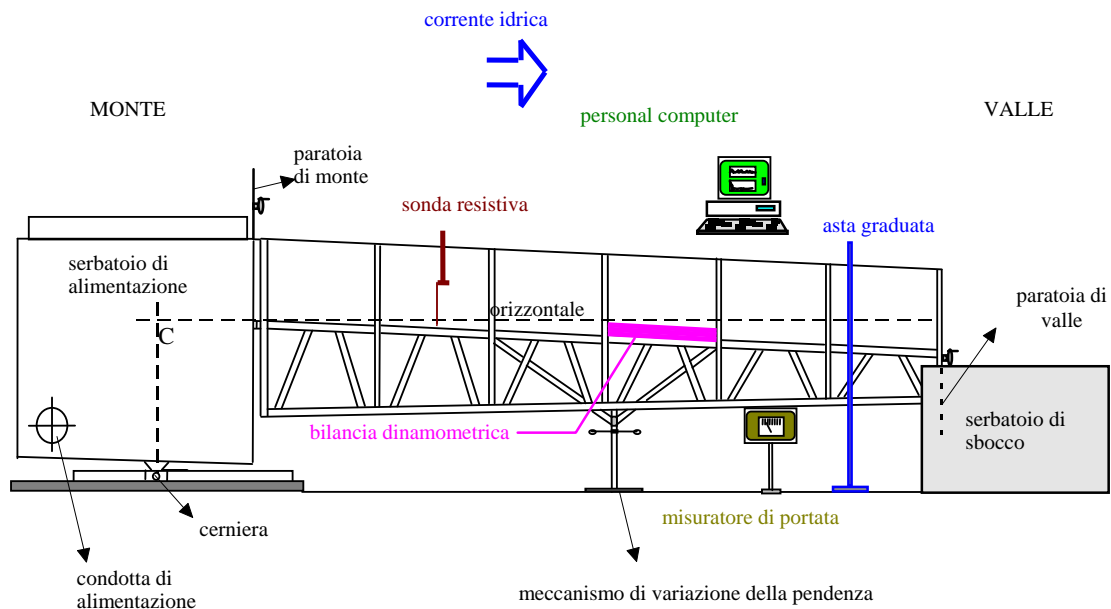


Figura 2 - Schema dell'apparato di misura

Interamente costituita in acciaio nella sua struttura portante, l'attrezzatura consta di un cassone di alimentazione e di un fondo basculante (figura 2). Le pareti laterali del canale sono realizzate in vetro trasparente ed il fondo, in plexiglas, è stato successivamente ricoperto da fogli di legno compensato marino, sui quali sono stati inchiodati gli elementi di scabrezza. Il corpo del canale risulta solidale ad una boccola a cremagliera montata su vite verticale, che consente di variare la pendenza del canale.

La misura della portata è ottenibile a mezzo di un manometro differenziale, collocato sul circuito di alimentazione del cassone. In una prima fase, la profondità nelle sezioni di misura è stata rilevata con idrometri mobili al decimo di millimetro, successivamente sostituiti, per quasi il 90% delle prove e per le profondità relative $\beta < 2$, con un sistema di sonde resistive.

La misura della tensione tangenziale media esercitata dalla corrente è stata effettuata con una bilancia dinamometrica (figura 3).

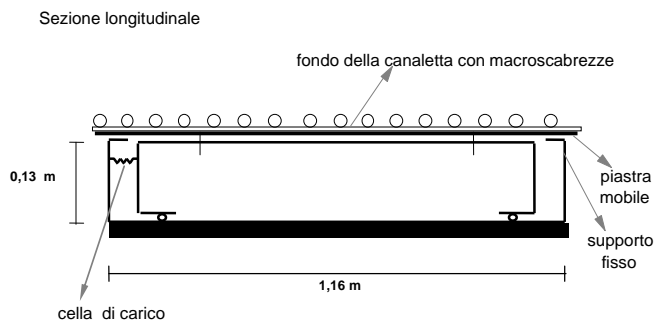


Figura 3 - Bilancia dinamometrica

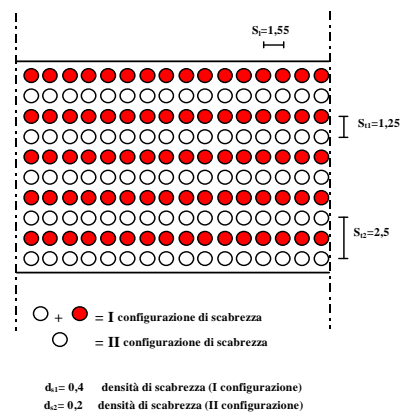


Figura 4 - Configurazioni di scabrezza utilizzate

Essa consta di una base solidale al fondo fisso della canaletta e di un corpo mobile nella direzione longitudinale (equidirezionato al flusso idrico), collegato alla base a mezzo di una cella di carico impermeabile. La porzione superiore della parte mobile è corredata di un pannello in plexiglas, sul quale sono stati posizionati gli elementi di scabrezza.

La cella, dapprima direttamente connessa ad un trasduttore digitale, è stata successivamente collegata ad una scheda di acquisizione a 16 canali e 12 bit, consentendo così, tramite un opportuno software, la registrazione continua della forza di trascinamento ed il corrispondente spettro di potenza.

Essendosi adottata la concentrazione di scabrezza sul letto del canale come *densità superficiale di scabrezza* d_s , definita (Roberson, 1968) dalla relazione:

$$d_s = \frac{A_E}{A_L} n \quad (6)$$

con A_E , area in pianta del singolo elemento caratteristico di scabrezza, A_L area del letto su cui sono fissate le scabrezze e n numero di elementi di scabrezza, sono state così realizzate due concentrazioni areali di scabrezza, mediante il fissaggio di sfere in legno del diametro di 4 cm sul fondo. Corrispondenti rispettivamente alle densità 0.4 e 0.2, (figura 4), si differenziano per il diverso valore della spaziatura trasversale. Indicando con i_t l'interasse trasversale intercorrente tra due elementi di scabrezza e con i_l il corrispondente interasse longitudinale e avendo definito con $s_t = i_t/D$ la spaziatura trasversale intercorrente tra due elementi di scabrezza e con $s_l = i_l/D$ l'analoga spaziatura longitudinale, si è caratterizzata la prima configurazione con $i_{t1} = 50$ mm e $s_{l1} = 1,25$, la seconda con $i_{t2} = 10$ mm e $s_{l2} = 2,5$; entrambe le configurazioni hanno spaziatura longitudinale $s_{l1} = 1,55$.

Nella sperimentazione si è seguito un protocollo di prove così articolato:

1. posizionamento della canaletta alla pendenza selezionata;
2. misura della portata;
3. misura della profondità della corrente nelle diverse sezioni longitudinali di misura;
4. misura dello sforzo tangenziale al fondo ed acquisizione dello spettro di potenza tramite la bilancia dinamometrica.

Sono state condotte 70 prove con valori di portata variabili tra 5 e 90 l/sec e pendenze tra 0.05% e 5%. La sommergenza relativa è risultata compresa tra 0.8 e 6 (tabella 1).

Portata	Froude	Reynolds	Pendenza	$\beta = Y/D$	Densità di scabrezza
5 ÷ 90 l/s	0.5 ÷ 2	$10^4 \div 10^5$	0.05 ÷ 5 %	0.8 ÷ 6	$d_{s1}=0.4$ $d_{s2}=0.2$

Tabella 1- Intervalli dei valori delle grandezze di riferimento durante le prove

4. ANALISI DEI DATI

Dai dati sperimentali, che sono riportati nel dettaglio in (Greco et al., 1995), si perviene alla determinazione dello sforzo tangenziale al fondo, τ_o , per via diretta, attraverso la misura ottenuta con la bilancia dinamometrica, ed indiretta, cioè utilizzando sia il profilo della corrente sia la velocità media, U, ambedue rilevate sperimentalmente. Nella stima di τ_o con

$$\tau_{stimata} = \gamma R_i j_m \quad (7)$$

(dove j_m rappresenta la pendenza della linea dei carichi totali, ottenuta ricostruendo il profilo di corrente per ogni singola prova, in corrispondenza del tronco strumentato con la bilancia dinamometrica), particolare attenzione è stata dedicata alla determinazione del raggio idraulico R_i computando lo sviluppo geometrico delle scabrezze presenti nelle sezioni misurate:

$$R_i = \frac{\Omega}{2Y + b + n\pi D} \quad (8)$$

con n numero di sfere presenti nella sezione e D il loro diametro.

La stima idrodinamica, τ_s , è stata ottenuta invece come valore mediato sulla superficie dell'azione di trascinamento, F_D , esercitata dalla corrente sulla scabrezza. Sempre con riferimento ai valori misurati nella sezione strumentata, la forza F_D è stata ottenuta dalla relazione:

$$F_D = C_d \frac{U^2}{2g} \frac{n_t p D^2}{4} \quad (9)$$

con n_t il numero totale di sfere presenti sulla piastra della bilancia dinamometrica e C_d , coefficiente di trascinamento, assunto pari a 0.70 nell'ipotesi di moto turbolento pienamente sviluppato (Streeter et al., 1949; Pyle et al., 1981). Risulta, pertanto:

$$\tau_s = \frac{F_D}{A_b} \quad (10)$$

dove A_b rappresenta la proiezione in pianta della superficie della bilancia.

Oltre a ciò è stato possibile derivare il valore del coefficiente di resistenza sulla base della relazione:

$$C = \frac{U}{u_*} = \frac{U}{\sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}}} \quad (11)$$

dove U rappresenta la velocità media della corrente.

5. PRIMI RISULTATI

Dal confronto riportato in figura 5, è immediato osservare che i valori della tensione tangenziale misurata e stimata geometricamente per la configurazione $s_t = 1.25$ e per i diversi campi di portata e pendenza, sono molto prossimi ai valori stimati idrodinamicamente. Si deduce che la configurazione a spaziatura *fitta* è ben interpretabile come scabrezza monodimensionale. Ciò è confermato dalla stima di C ottenuta con l'equazione (11) e confrontata nelle figure 6, 8 e 10 rispettivamente con le equazioni (2), (4) e (5).

E' evidente la migliore stima ottenuta dall'equazione di potenza fornita da Bianco e Rosso nel caso di scabrezze monodimensionali. L'esponente della relazione, derivato dalle misure è risultato essere pari a 0.317 e 0.285, rispettivamente per i valori stimati geometricamente e quelli misurati, a fronte di 0.27 e 0.33 ricavati rispettivamente da Bianco e Rosso e da Gordienko per analoghe spaziature longitudinali.

Non è migliore la stima fornita dell'equazione logaritmica proposta da Copertino, Veltri e Colosimo che presenta un errore apparentemente sistematico e legato ad una valutazione di B_r con misure di campo. Tale errore sembra crescere nel confronto con la formula sempre logaritmica, proposta da Copertino, De Bernardinis, Sciancalepore e Sole. E' bene notare che, mentre l'equazione (4) presenta una determinazione sperimentale della costante B_r , l'equazione (5) non utilizza alcun parametro sperimentalmente determinato e fonda la sua valutazione su una rappresentazione della sezione bagnata, e quindi del raggio idraulico, geometricamente vincolata alla granulometria del fondo.

Passando alla spaziatura trasversale $s_t=2.5$, le misure hanno evidenziato in figura 5 un diverso andamento sia della tensione tangenziale stimata geometricamente sia di quella misurata: i due valori, τ_{misurato} e τ_{stimato} , in perfetto accordo tra loro si discostano sensibilmente dal valore stimato idrodinamicamente. La stima idrodinamica è meno efficace rispetto alla stima geometrica, che *risulta essere corretta ed efficace* purché nel calcolo del raggio idraulico siano inclusi l'*effettiva sezione bagnata e l'effettivo perimetro bagnato*.

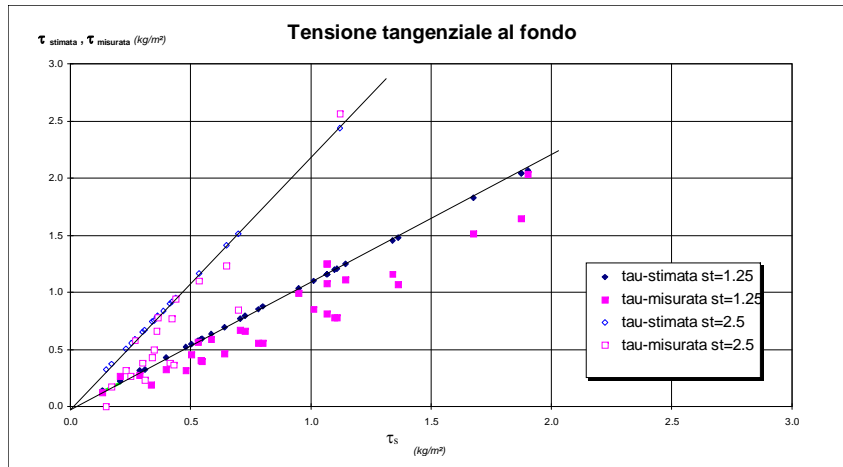


Figura 5 - Confronto tra la tensione tangenziale misurata, $\tau_{misurata}$, stimata geometricamente, $\tau_{stimata}$, e stimata idrodinamicamente, τ_s

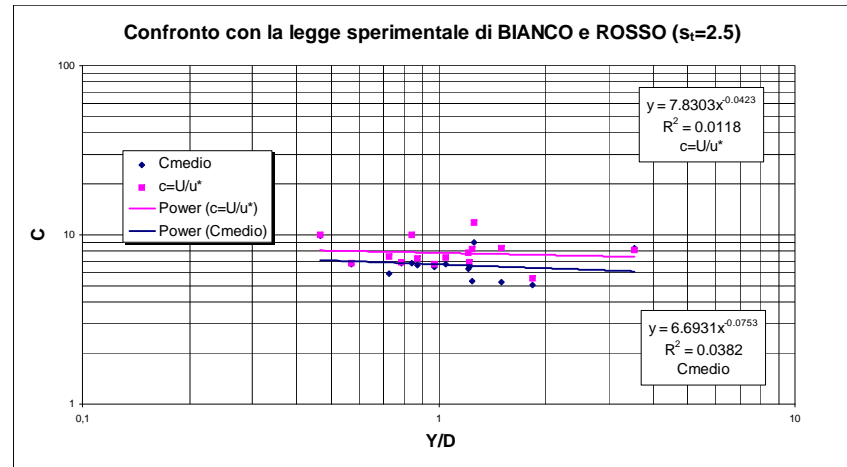


Figura 7 - Andamento del coefficiente di scabrezza in funzione della sommersa relativa per spaziatura $s_t=2.5$

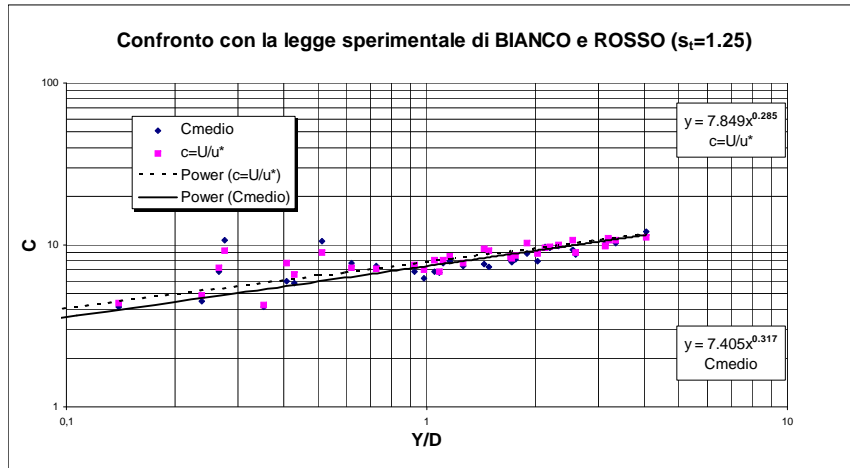


Figura 6 - Andamento del coefficiente di scabrezza in funzione della sommersa relativa per spaziatura $s_t=1.25$

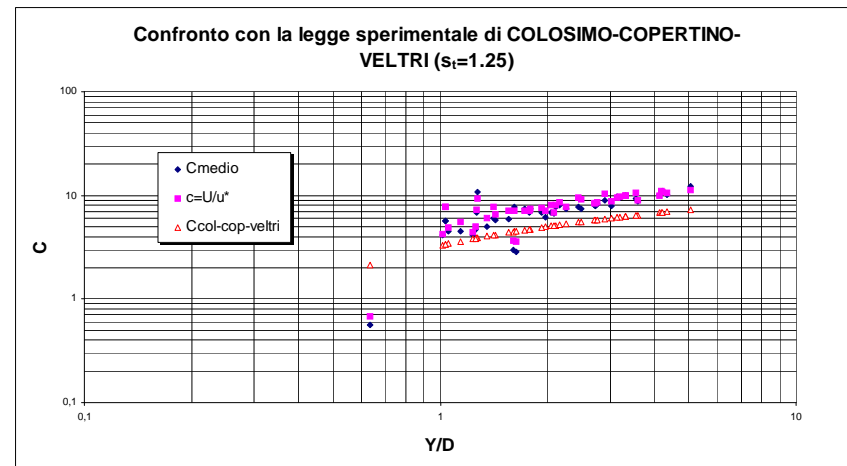


Figura 8 - Confronto dei dati campionati con la relazione di Colosimo et al., 1986, per $s_t=1.25$

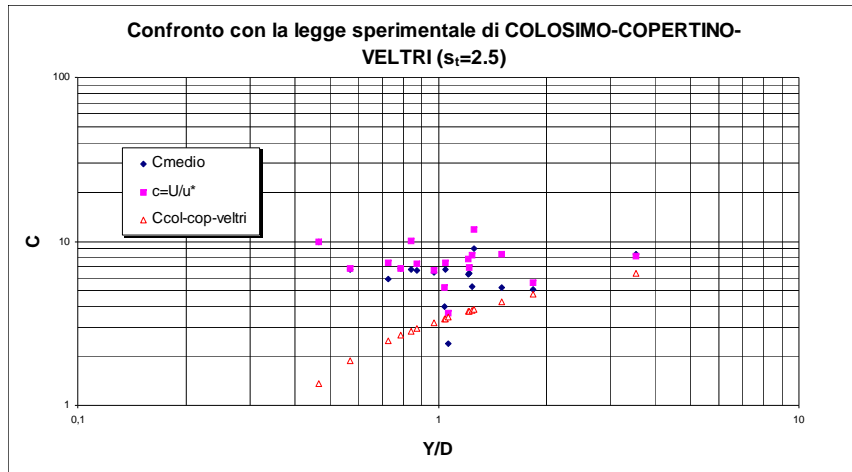


Figura 9 - Confronto dei dati campionati con la relazione di Colosimo et al., 1986, per $s_t=2.5$

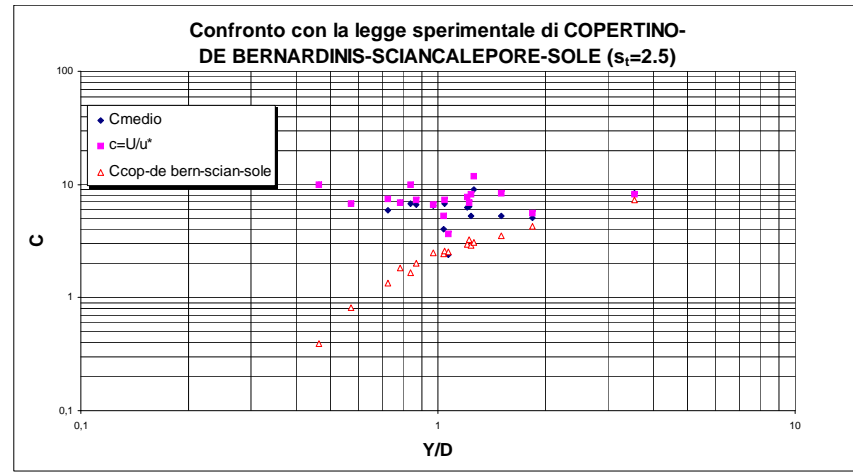


Figura 11- Confronto dei dati campionati con la relazione di Copertino et al., 1986, per $s_t=2.5$

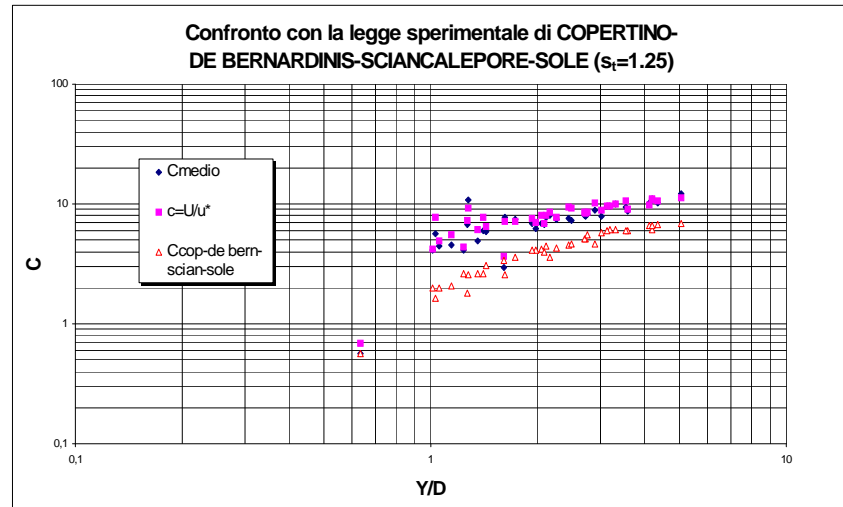


Figura 10 - Confronto dei dati campionati con la relazione di Copertino et al., 1993, per $s_t=1.25$

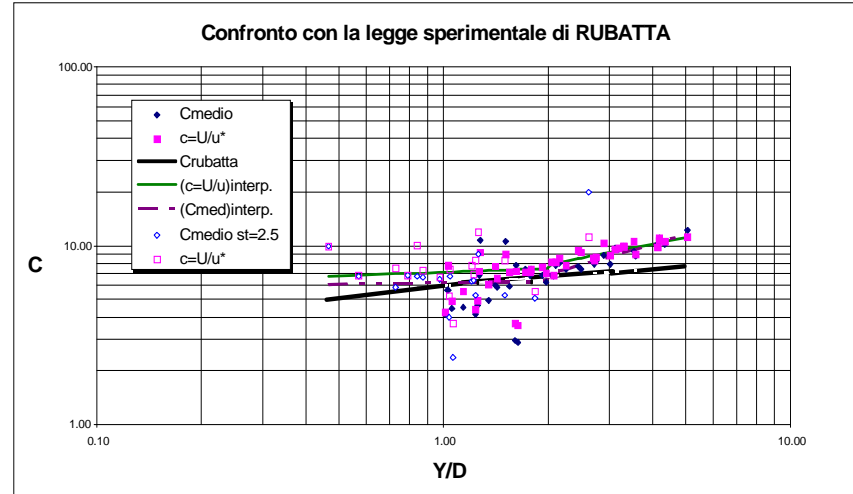


Figura 12 - Rappresentazione del coefficiente di scabrezza adimensionale in funzione della sommergenza relativa. Curva di Rubatta

E' questo un risultato molto importante sulla idoneità del *raggio idraulico* a rappresentare una scala spaziale significativa dei processi energetici attivi all'interno della corrente idrica.

La robustezza delle formule di potenza è ben evidenziata anche nel caso $s_t = 2,5$: la caratterizzazione del moto fornita da Perry et al.(1969) risulta essere ancora efficace confortata dai risultati presentati da Bianco et al (1993). La figura 7 ne evidenzia una certa insensibilità alla sommergenza relativa, anche se essa presenta una bassa correlazione con i dati sperimentali. Al contrario, le formule logaritmiche, nelle figure 9 e 11, sembrano enfatizzare la dipendenza tra C e Y/D, che fornisce una sottostima del coefficiente di resistenza soprattutto per sommergenze relative inferiori all'unità.

Infatti, dalle figure 6 e 7 si riconosce che relazioni determinate da sperimentazioni su elementi di scabrezza caratterizzanti un moto strettamente bidimensionale (Bianco et al. 1993) meglio si prestano di relazioni analoghe derivate su scabrezze naturali (Copertino et al., 1988, 1993) (figure 8, 9, 10 e 11), che, anche se in difetto, continuano a fornire una buona stima dei valori del coefficiente di scabrezza C.

Inoltre in condizioni di bassa sommergenza relativa, $\beta \cong 1$, la condizione limite derivata da Rubatta (1968) risulta ben interpretare la tipologia di deflusso e quindi i processi energetici attivi all'interno della corrente. L'aliquota di portata che defluisce negli interstizi tra gli elementi di scabrezza può essere assimilata ad una portata di filtrazione con dissipazioni di energia rappresentabili dalla relazione classica logaritmica di Nikuradse, eventualmente corretta nel valore della costante.

In figura 12 si evince come la relazione (3) recuperi una debole ma significativa dipendenza dalla sommergenza relativa.

6. CONSIDERAZIONI E CONCLUSIONI

I primi risultati ottenuti consentono di puntualizzare alcuni aspetti significativi della valutazione delle resistenze al moto in presenza di macroscabrezze.

In primo luogo, le configurazioni di scabrezza che presentano una spaziatura trasversale sufficientemente fitta, anche se caratterizzate dall'individualità dei singoli elementi, forniscono un risposta energetica confrontabile con la risposta ottenibile da scabrezze di eguale altezza relativa ma sensibilmente monodimensionali; come sarebbero i listelli trasversali che occupano l'intera larghezza del canale. Invece la risposta a configurazioni meno fitte si discosta sensibilmente dai risultati ottenibili con le relazioni, classiche e non, note in letteratura per la stima del coefficiente C di scabrezza. Per bassi valori di sommergenza relativa la configurazione più fitta sembra ben interpretabile da relazioni che portano in conto l'esistenza di un flusso di filtrazione che evolve negli interstizi presenti, sia longitudinalmente che trasversalmente, tra gli elementi di scabrezza.

In secondo luogo, il confronto tra le possibili stime della tensione tangenziale (geometrica e idrodinamica) con il valore misurato direttamente in alveo tramite la bilancia dinamometrica evidenzia la particolare affidabilità della stima geometrica, purché il raggio idraulico adottato risulti rigorosamente calcolato come *area della sezione idrica effettiva sul reale perimetro bagnato*, senza trascurare cioè l'aliquota di perimetro bagnato ascritto alle scabrezze. Tale stima risulta equivalente a quella idrodinamica nel caso di basse spaziature trasversali, risultando l'unica efficace nel caso di alti valori di densità di scabrezza. Il modello idrodinamico, basato sulla determinazione dell'azione di trascinamento della corrente, mal si presta alla caratterizzazione dei processi dissipativi attivi in una corrente fluida in condizioni di bassa sommergenza relativa e alti valori di spaziatura trasversale degli elementi.

Infine è risultato che l'andamento rilevato nel tempo della forza al fondo misurata dalla bilancia dinamometrica suggerisce l'esistenza di una componente non stazionaria significativa sia nel contribuire inerzialmente al processo dissipativo sia nel forzare armonicamente strutture

coerenti del campo di moto turbolento. Prima però di poter esprimere risultati più sicuri su tale aspetto, sarà necessario approfondire l'analisi in studi successivi.

Ringraziamenti

Gli autori desiderano ringraziare il Prof. Enrico Marchi, Direttore dell'Istituto di Idraulica dell'Università di Genova, per aver gentilmente concesso l'utilizzo delle sonde resistive a bassa deriva per l'acquisizione delle profondità, e l'Ing Luigi Stagi, Responsabile del Laboratorio di Idraulica dell'Università di Genova, per la sua disinteressata disponibilità alla progettazione, realizzazione e controllo della bilancia dinamometrica.

7. BIBLIOGRAFIA

Aguirre-Pe J., Fuentes R., 1990, Resistance to flow in steep rough streams, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE vol. 116, n. 11, 1374-1387

Bathurst J.C., 1985, Flow resistance equation in mountain rivers, Journal of the Hydraulics Division-ASCE, vol 111 n. 4, 1103-1122 .

Bayazit M., 1976, Free surface flow in channel of large relative roughness, Journal of Hydraulic Research, vol.14 n.2, 115-124.

Becchi I., Pedrizzetti G., 1987, Flow resistance on flat movable bed, Euromech 215-set.

Bianco G., Rosso M., 1993, Studio sperimentale di un aspetto idrodinamico di correnti supercritiche in canali con macroscabrezze (parte 1), Idrotecnica n°1, 17-32; (parte 2), Idrotecnica n°5, 265-274.

Colosimo C., Copertino V., Veltri M., 1988, Friction factor evaluation in gravel-bed rivers, Journal of Hydraulic Engineering vol.114 n°8,861-876.

Copertino V., 1988, Regimi morfologici e resistenze al moto negli alvei granulari, Idrotecnica n°4, 317-330.

Copertino V., De Bernardinis B., Sciancalepore F., Sole A., 1993, Flow resistance estimation for large scale roughness, International Conference on Hydrology and water resources, New Dehli.

Copertino V., Sciancalepore F., 1994, Flow resistance in steep mountain streams, International Workshop on Floods and Inundations related to Large Earth Movements, Trento.

Engel P., Lau Y.L., 1980, Friction factor for two dimensional dune roughness, Journal of Hydraulic Research 18 N.3, 213-223.

Ferro V., Giordano G., 1992, Velocity profile and flow resistance in gravel bed rivers, Excerpta vol.7 1992/1993.

Gordienko P.I., 1967, The influence of channel roughness and flow states on hydraulic resistances of turbulent flow, Journal of Hydraulic Research, vol. 5, n.4, 249-261.

Graf W.H., 1994, Turbulence measurements in open-channel flows over artificial bed forms, Journal of Hydraulic Engineering vol.120 n°6, 59-68.

Greco M., Lovallo M., 1995, Indagine sperimentale di processi energetici nei deflussi tra macroscabrezze diffuse, rapporto interno del DIFA 1995

Lyn D.A., 1993, Turbulence measurements in open-channel flows over artificial bed forms, Journal of Hydraulic Engineering vol.119 n°3-mar.

Malaika J., Blench T., Harleman D.R.F., Rumer R.R., Rand W., Davidian J., Carter R.W., Roberson J.A., 1961, Roughness spacing in rigid open channels, Journal of the Hydraulics Division-HY6-nov.

Marchi E. 1961, Il moto uniforme delle correnti liquide nei condotti chiusi e aperti, L'Energia elettrica.

Mazouz A., Labraga L., Tournier C., 1994, Behaviour of the Reynolds stress on rough walls, Experiments in Fluids, vol. 1/2

- Morris H.M., 1959, Design methods for flow in rough conduits , Journal of the Hydraulics Division-HY7-lug.
- Nezu I., Rodi W., Experimental study on secondary currents in open channel flow, Proc. XXI IAHR Congress, Melbourne
- Nakagawa H., Tsujimoto T., Shimizu H., 1991, Turbulent flow with small relative submergence, "Fluvial Hydraulics in Mountain Regions", Lectures notes in Earth Sciences n.37, A.Armanini e G.Di Silvio (Eds) Springer-Verlag
- Nikuradse J., 1933, Strommgsgesetze in Rauben Röhren, VDI for schungsleep p.361
- Paris E., 1989, Dynamics of flow over dunes, 3th International Workshop on Alluvial River Problems
- Perry A.E., Schofield W.H., Joubert P.N., 1969, Rough wall turbulent boundary layers, J. Fluid Mech.
- Pyle R., Novak P., 1981, Coefficient of friction in conduits with large roughness, Journal of Hydraulic Research 19 n°2
- Roberson J.A., 1968, Surface resistance of plane boundaries roughned with discrete geometric shapes, Washington State Univ. Bulletin 308
- Rubatta A., 1968, Numeri di resistenza per fortissime scabrezze relative, L'Energia Elettrica
- Sams K.W., 1952, NAZA RME 52017
- Streeter V.L., Chu H., 1949, Final Report Project 4918 Armour Res.Foundation, Illinois
- Townsend A.A., 1956, The structures of turbulent shear flow, Cambridge Univ. Press
- Tsujimoto T., Shimizu H., 1986, Effect of transpiration velocity on incipient motion of bed materials particles resting on permeable bed, Journal of Hydrosience and Hydraulic Engineering, JSCE, vol. 19 n. 2, 21-32