

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI FEDERICO II  
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA IDRAULICA ED AMBIENTALE  
"GIROLAMO IPPOLITO"

**XXIV CONVEGNO DI IDRAULICA E  
COSTRUZIONI IDRAULICHE**

Napoli, 20-22 Settembre 1994

**Volume II**

**Memorie - Temi 3a, 3b e 4**

**INDAGINE SPERIMENTALE SULL'ESCAVAZIONE IN UN CANALE  
A FONDO MOBILE POSTO A VALLE DI UN RISALTO IDRAULICO**

**E. Habib<sup>\*</sup>, M. Mossa<sup>\*\*</sup>, A. Petrillo<sup>\*\*\*</sup>**

<sup>\*</sup> Hydraulics and Sediment Research Institute, Delta Barrage, Egitto

<sup>\*\*</sup> Dipartimento di Difesa del Suolo - Università della Calabria

<sup>\*\*\*</sup> Dipartimento di Ingegneria delle Acque - Politecnico di Bari

**SOMMARIO**

Nel presente lavoro si riportano i risultati sperimentali sull'escavazione che si produce in un canale a fondo mobile posto a valle di un dissipatore a risalto con platea di lunghezza variabile. Nello studio si sono esaminate diverse configurazioni sperimentali cambiando sia le condizioni cinematiche della corrente che la lunghezza della platea rigida sulla quale si sviluppa il risalto idraulico.

L'analisi dei dati sperimentali ha consentito di trovare una relazione che lega le grandezze caratteristiche della fossa di erosione con quelle cinematiche della corrente e con la lunghezza della piastra rigida. Inoltre, mediante un misuratore di velocità LDA, è stata effettuata un'indagine sulla turbolenza della corrente a valle del risalto idraulico e, con l'ausilio di una video-camera, è stata analizzata la turbolenza a larga scala di tutto il fenomeno. Si è infine analizzata l'influenza di queste ultime grandezze sul processo di escavazione.

**SUMMARY**

This paper reports on the scour of loose bed of sand downstream of hydraulic jump formed over a rigid apron. Different conditions are produced, changing both the kinematic condition of the stream and the length of the apron, to investigate the scourholes and their development. The experimental data are used to study the relationship among the scour depth, the kinematic characteristics of the stream and the apron lengths. LDA measurements are made to show the influence of the turbulence downstream of the hydraulic jump on the scour. In addition, a video-camera enables to analyse the flow structure in the roller zone and the large eddy scales features of the jump on the scouring process.

**1. INTRODUZIONE**

Il problema dell'escavazione dei letti mobili localizzati in

vicinanza di strutture idrauliche è di considerevole importanza nel campo dell'ingegneria. L'escavazione a valle di un risalto idraulico, usato come dissipatore di energia, è un fenomeno che ha ricevuto notevole attenzione da parte di diversi ricercatori. Molti di questi studi sono indirizzati all'analisi dello sviluppo

dell'escavazione nel tempo (Colaric et Al. [2]), alla similitudine dei profili di escavazione (Farhoudi et Al. [3]) e alla determinazione di relazioni che consentano di determinare la profondità di scavo per particolari condizioni di flusso (Catakli et Al. [1],

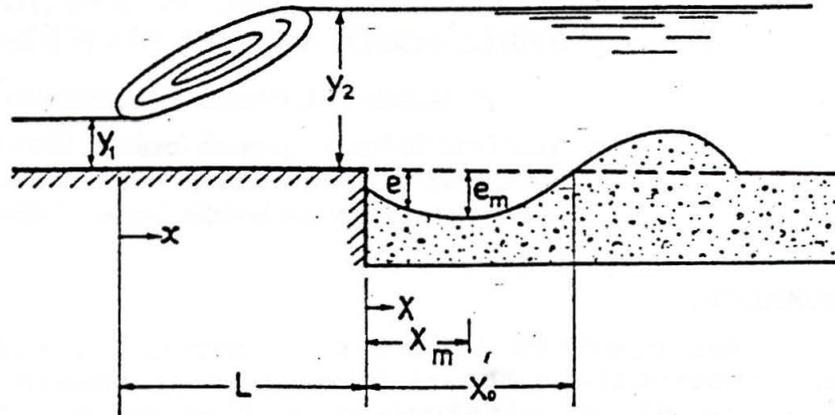


Fig.(1). Tipico profilo di escavazione.

Gunko et Al. [4], Nola et Al. [8], Razavan [10], Valentin [15]). E' noto che l'energia del flusso supercritico a monte del risalto idraulico non è completamente dissipata attraverso quest'ultimo. Alla fine del risalto, infatti, la corrente ha un'energia cinetica turbolenta residua, che normalmente viene chiamata energia macroturbolenta (Hartung et Al. [5]). Questa energia presenta il suo massimo immediatamente a valle del risalto idraulico e decade nella direzione del moto. Essa, inoltre, è legata all'indice di turbolenza medio  $K_v$  della sezione trasversale della corrente. Quest'ultimo parametro è stato oggetto di studi da parte di molti ricercatori. Rouse et Al. [14] e Razavan ([10], [11]) osservarono che l'indice di turbolenza  $K_v$  decresce a partire dalla sezione immediatamente a valle del risalto fino a raggiungere un valore costante, caratteristico della corrente di moto uniforme. Resch et Al. ([12], [13]) mostrarono la dipendenza di  $K_v$  dalle condizioni cinematiche proprie del flusso. Ortiz [9] mise in evidenza anche la grande influenza che ha la forma del dissipatore sui valori di  $K_v$ .

Secondo Shields, la condizione di moto incipiente delle particelle di sabbia al fondo di un canale si ha quando la tensione tangenziale media  $\tau_0$  al fondo raggiunge il valore critico  $(\tau_0)_{cr}$  definito da una relazione del tipo:

$$\frac{(\tau_0)_{cr}}{(\gamma_s - \gamma) d_{50}} = f\left(\frac{d_{50} U_*}{\nu}\right). \quad (1)$$

Nelle esperienze condotte da diversi Autori su canali a valle di risalti idraulici è stato osservato un considerevole movimento di

particelle di sabbia per valori della tensione tangenziale più bassi di quella critica ricavabile dalla (1). Tale movimento è certamente causato dall'energia macroturbolenta residua a valle del risalto. Al fine di definire le condizioni medie del flusso a valle del

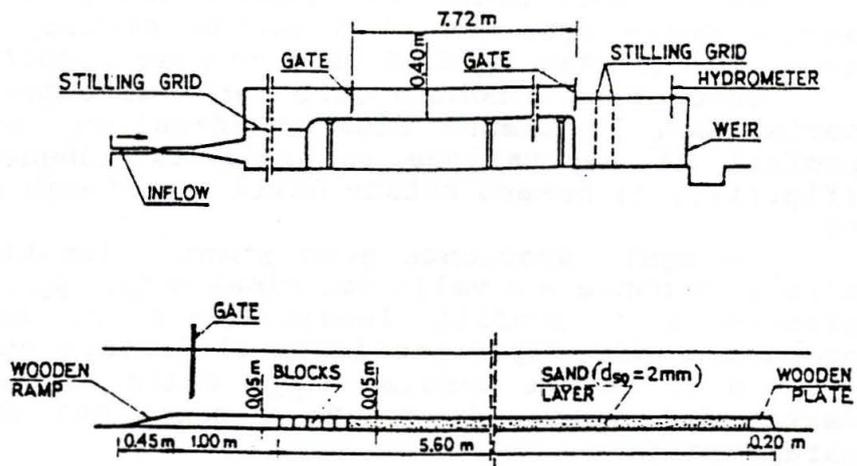


Fig.(2). Sezione del canale. /

risalto e le condizioni di moto incipiente delle particelle, si è introdotto il parametro  $T_r$  definito come il rapporto tra la tensione critica  $(\tau_0)_{cr}$  e l'effettivo valor medio  $\tau_0$ :

$$T_r = \frac{(\tau_0)_{cr}}{\tau_0} \quad (2)$$

Nel processo di erosione, come si vedrà in seguito, ha grande importanza definire non solo le caratteristiche della turbolenza a valle del risalto, ma anche quelle del moto medio e, in particolare la grandezza  $T_r$ . Infatti, in una data sezione, è da attendersi che, a parità di indice di turbolenza, quanto più piccolo è il valore di  $T_r$ , tanto maggiore sarà la quantità di materiale trasportato.

Nel presente studio viene analizzata l'influenza delle condizioni medie del flusso, della turbolenza a valle del risalto idraulico e della lunghezza della piastra ( $L$ ), su cui si forma il risalto, sulla forma e dimensione del profilo di escavazione (fig.(1)).

## 2. APPARATO SPERIMENTALE E PROVE CONDOTTE

Le indagini sperimentali sono state condotte presso il laboratorio dell'Advanced Mediterranean Agronomic Studies di Valenzano (Bari) in un canale avente una pendenza dello 0.33%, una lunghezza di 7.72 m e una sezione rettangolare, di base 0.3 m e di altezza di 0.4 m (fig.(2)). Due paratoie poste alle estremità di monte e di valle del canale hanno consentito di controllare le posizioni dei diversi risalti sperimentali esaminati. Immediatamente a valle della paratoia di monte si sono posizionati una piastra di legno e blocchetti di cemento removibili che hanno consentito di variare la lunghezza della

piastra.

Sull'intero fondo del canale è stato realizzato un letto di sabbia dello spessore di 5 cm. La sabbia, alquanto uniforme, aveva un diametro  $d_{50}$  di 2 mm e un peso specifico di 2.56 g/cm<sup>3</sup>.

Sono state condotte otto serie di esperienze. In ciascuna serie, con lo stesso risalto idraulico, si sono rilevati i profili di escavazione variando la lunghezza della piastra (fig.(1)). Il numero totale delle esperienze condotte è stato di 44.

In ogni esperienza sono stati rilevati la portata  $Q$ , le altezze a monte e a valle del risalto ( $y_1, y_2$ ), la lunghezza della piastra e i profili longitudinali di escavazione. Queste grandezze sono riportate in Tab.I insieme con il valore minimo ( $L_{min}$ ) e il valore massimo ( $L_{max}$ ) delle lunghezze delle piastre usate, del numero di Froude a monte del risalto ( $Fr_1$ ) e del parametro  $T_r$ .

SERIE N.	$y_1$ (m)	$y_2$ (m)	$q$ (m <sup>2</sup> /s)	$Fr_1$	$T_r$	$L_{min}$ (m)	$L_{max}$ (m)
1	0.013	0.129	0.0353	6.87	2.27	0.50	1.40
2	0.025	0.093	0.0360	2.90	1.17	0.45	1.35
3	0.015	0.155	0.0448	7.42	2.22	0.84	1.68
4	0.019	0.162	0.0520	6.19	1.78	1.10	1.82
5	0.021	0.172	0.0588	6.12	1.68	1.30	1.84
6	0.012	0.136	0.0355	8.30	2.76	0.80	1.58
7	0.021	0.103	0.0363	3.60	1.38	0.62	1.46
8	0.027	0.114	0.0457	3.27	1.16	0.96	1.56

Tab.I.

I valori del parametro  $T_r$ , sempre maggiori dell'unità, indicano che la corrente di moto uniforme che si stabilisce a valle del risalto determinerebbe una condizione di fondo fisso, mentre l'azione della turbolenza residua del risalto provoca il trasporto e, quindi, la fossa di erosione.

Per alcune configurazioni iniziali è stata rilevata l'evoluzione temporale della massima escavazione ( $e_m$  di fig.(1)), pervenendo alla conclusione che dopo un tempo di otto ore il profilo di erosione raggiungeva una condizione di sostanziale equilibrio.

### 3. ANALISI DEI RISULTATI SPERIMENTALI

In fig.(3), per le diverse configurazioni sperimentate, è riportata la massima profondità di escavazione ( $e_m$ ) in funzione della lunghezza della piastra ( $L$ ), adimensionalizzate con

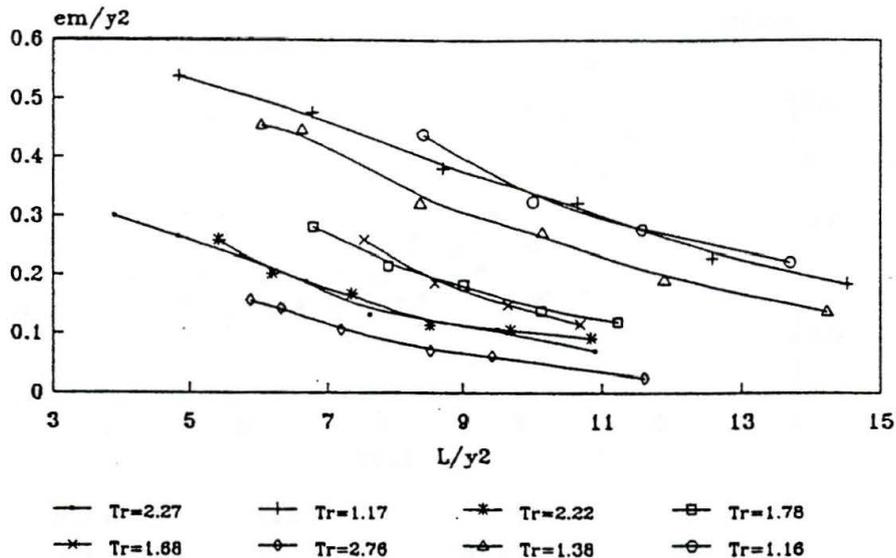


Fig. (3). Andamento della massima escavazione ( $e_m$ ) in funzione di  $L$  e  $T_r$ .

l'altezza della corrente a valle del risalto  $y_2$ .

Dalla figura si nota che, per uno stesso risalto  $e$ , quindi, a parità del fattore  $T_r$ , la massima profondità di escavazione diminuisce all'aumentare della lunghezza  $L$  della piastra di fondo. Questo risultato indica che le dimensioni della fossa di erosione dipendono fortemente dall'energia turbolenta residua nelle sezioni a valle del risalto e quindi dall'indice di turbolenza  $K_v$ , in quanto quest'ultimo diminuisce all'aumentare di  $L$ . La fig. (3) evidenzia, inoltre, anche se in modo qualitativo, la dipendenza della massima profondità di escavazione dalle condizioni di sollecitazione che la corrente esercita sui granuli di sabbia al fondo. Infatti dalla figura si nota che, a parità di  $L/y_2$ , l'escavazione massima aumenta al diminuire del fattore  $T_r$ ; ossia quando più le condizioni idrodinamiche al fondo si avvicinano alla condizione critica di trasporto definita dalla curva di Shields.

Come si è detto innanzi, quest'ultima osservazione è qualitativa, in quanto l'escavazione è influenzata, oltre che da  $T_r$ , da  $K_v$ , legato, a sua volta, alle caratteristiche cinematiche della sezione iniziale del risalto e alla forma della vasca di dissipazione.

I dati sperimentali sono stati confrontati con i risultati di alcune formule proposte in letteratura per il calcolo della massima profondità di escavazione.

Catakli et Al. [1] proposero una relazione per il caso di una piastra che terminasse immediatamente alla fine del risalto idraulico. Inoltre questa formula fu sviluppata empiricamente per particolari condizioni sperimentali alle quali deve essere limitata.

Prendendo in considerazione l'energia macroturbolenta nel processo di escavazione, valutata attraverso  $K_v$ , Razavan [10] propose la seguente formula per il calcolo della massima

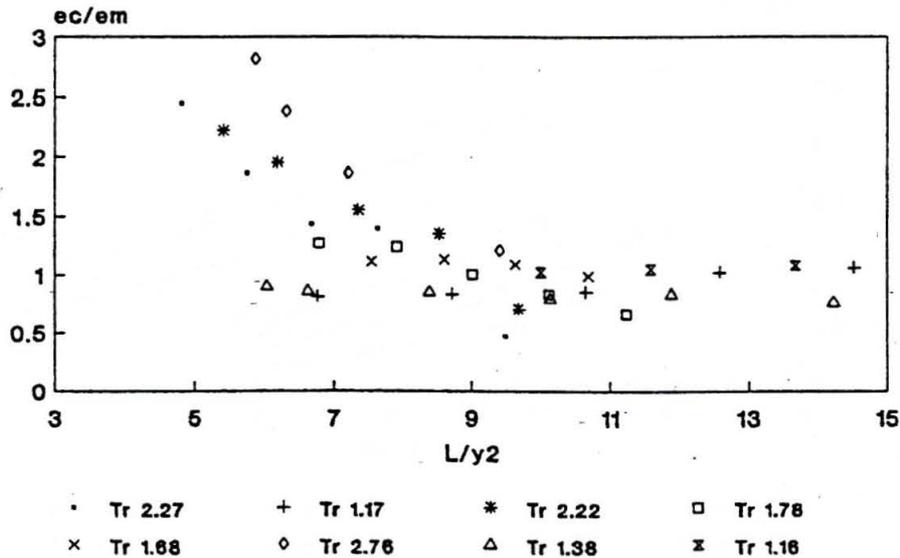


Fig. (4). Andamento di  $e_c/e_m$ .

escavazione  $e_c$ :

$$e_c + y_2 = \frac{q}{\frac{U_a}{1 + 2.5K_v}} \quad (3)$$

Per calcolare il parametro  $K_v$ , Koumine (Ortiz [9]) suggerì la seguente formula empirica:

$$K_v = \frac{1.8}{\frac{x}{y_2} - 1.69 \sqrt{\left(\frac{y_2}{y_1} - 4\right) + 0.195 \left(\frac{y_2}{y_1} - 4\right)}} \quad (4)$$

in cui  $x$  è la distanza fra la sezione iniziale del risalto e quella in cui si valuta  $K_v$ . Questa formula, secondo l'Autore, è valida per numeri di Froude  $Fr_1 > 3.2$ . In questo studio si è fatto uso dell'eq. (4) eccetto per la serie 2, per la quale si è applicata la formula di Kalis (Ortiz [9]) valida per  $2.2 < Fr_1 < 6.3$ .

In fig. (4) si riporta un confronto della profondità di escavazione massima calcolata ottenuta tramite l'eq. (3) ( $e_c$ ) con quella misurata sperimentalmente ( $e_m$ ). La figura mostra che la formula di Razavan è in soddisfacente accordo con i dati sperimentali eccetto per valori di  $L/y_2 < 8$ , quando la sezione finale del risalto è prossima alla sezione terminale della piastra rigida.

Questo risultato indica che ai fini progettuali è possibile calcolare con buona attendibilità la massima profondità dell'erosione utilizzando le (3) e (4) per lunghezze della piastra di fondo che soddisfino la condizione  $L/y_2 > 8$ .

Il fatto che le leggi (3) e (4) forniscano buoni risultati

per  $L/y_2 > 8$  anche per configurazioni sperimentali eseguite su apparati diversi sembra del tutto logica, nel senso che occorre allontanarsi dalla fine del risalto idraulico ove le condizioni di turbolenza sono ancora fortemente influenzate dalle condizioni cinematiche nella sezione iniziale del risalto e dalla forma del bacino di dissipazione. Infatti l'accordo tra i dati sperimentali e quelli calcolati per valori di  $L/y_2$  più grandi di 8 è dovuto a una buona valutazione del  $K_v$  (che varia lungo la direzione longitudinale) ottenuto tramite l'eq. (4). Al contrario, per bassi valori di  $L/y_2$  i valori di  $K_v$  si presentano diffusi, poichè fortemente influenzati dalle condizioni cinematiche a monte del risalto.

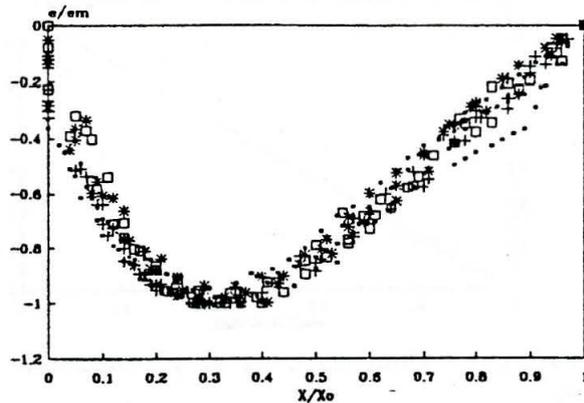


Fig. (5). Alcuni profili di similitudine.

Al fine di completare la descrizione della fossa di erosione è da evidenziare che l'analisi dei diversi profili ha mostrato che essi sono simili se riportati nella forma adimensionale  $e/e_m$  in funzione di  $X/X_0$ , dove  $e$  è l'escavazione alla distanza  $X$  dalla fine della piastra,  $e_m$  la massima escavazione e  $X_0$  la lunghezza della fossa di erosione. Nella fig. (5) sono riportati alcuni profili di escavazione nella forma adimensionale innanzi detta.

Nella fig. (6) sono riportati i valori sperimentali di  $X_0$  in funzione di  $e_m$ , adimensionalizzati mediante l'altezza cinetica nella sezione di monte del risalto. Dalla figura è evidente l'esistenza di un'accettabile correlazione tra la massima escavazione  $e_m$  e la lunghezza  $X_0$  espressa attraverso la seguente equazione:

$$\frac{X_0}{U_1^2/2g} = 9.75 \frac{e_m}{U_1^2/2g} \quad (5)$$

#### 4. ANALISI DEL COMPORTAMENTO DEI VORTICI A GRANDE SCALA E DELL'INTENSITÀ DI TURBOLENZA NEL RISALTO IDRAULICO

L'importanza della macroturbolenza a valle di un risalto idraulico e i risultati ottenuti da uno studio con supporto fotografico condotto da Long et Al. [7] ha indotto gli autori ad analizzare la relazione tra il comportamento della zona dei roller del risalto e il processo di escavazione.

Tutto ciò è stato reso possibile attraverso l'uso di una video-camera con cui si è analizzato un risalto con numero di Froude  $Fr_1$  uguale a 6.45 nella canaletta del laboratorio del Dipartimento di Ingegneria delle Acque del Politecnico di Bari. Le immagini video sono state successivamente studiate con

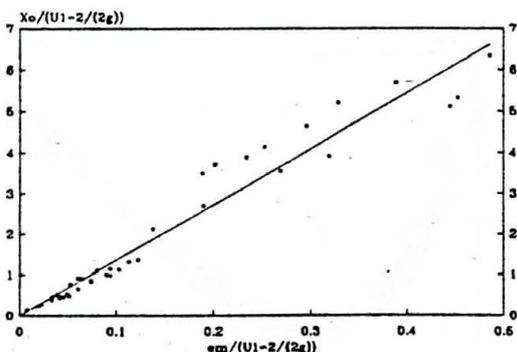


Fig. (6). Andamento di  $X_0$  in funzione di  $e_m$ .

l'ausilio di un videoregistratore in grado di restituire un'immagine ogni 0.04 sec.

L'analisi delle immagini ha consentito di osservare la dinamicità del risalto che si esplica attraverso periodiche fluttuazioni della sua sezione iniziale (piede del risalto). In particolare in fig. (7) vengono riportate le immagini relative ad un periodo, a partire dal momento in cui il piede del risalto è nella sua

massima posizione di monte fino al momento in cui vi ritorna. La zona bianca delle foto evidenzia la parte di corrente aerata. Effettuando una analisi della formazione dei roller come proposto da Long et Al. [7], si possono trarre le seguenti considerazioni. Quando il piede del risalto è nella massima sezione di monte (fig. (7a)) la superficie del risalto stesso presenta una pendenza dolce e sembra costituita da una moltitudine di vortici. Con il tempo i piccoli vortici localizzati in prossimità della superficie del risalto tendono a muoversi verso valle mescolandosi e formando un vortice più grande (fig. (7b)) con un riguardevole spostamento verso valle della sezione del piede del risalto. La formazione del vortice più grosso continua progressivamente (fig. (7c)) con ulteriore spostamento del piede del risalto. A partire da questo istante la superficie del risalto diviene molto ripida e il grosso vortice inizia a rompersi (fig. (7d)); questo causa un riversamento (spilling) di acqua che scivola secondo la pendenza della superficie del risalto (figg. (7e-f-g)), provocando uno spostamento del piede dello stesso verso la sua massima posizione di monte (fig. (7h)).

L'analisi delle immagini ha messo in evidenza un periodo medio del fenomeno di 1.55 sec.

Le fluttuazioni del risalto innanzi osservate influenzano certamente le componenti turbolente di velocità a valle della zona dei roller.

Al fine di un'analisi della turbolenza a valle del risalto si è utilizzato un sistema LDA tipo 55X Disa per misurare le componenti istantanee di velocità nella direzione del moto e determinare le intensità di turbolenza del flusso.

Si sono rilevati i profili di velocità nelle sezioni di valle dello stesso risalto analizzato con il sistema video, localizzate a  $x/y_2$  uguale a 7.47, 10.23 e 11.87.

L'analisi spettrale delle componenti di velocità ha consentito di mettere in evidenza che frequenze inferiori a 5 Hz presentano ampiezze dominanti. La fig. (8) mostra lo spettro delle ampiezze delle componenti turbolente di velocità in un punto della sezione a valle del risalto posto a  $x/y_2=10.23$ . Dalla figura si osserva che lo spettro mostra i più alti valori di ampiezze nel range 0.1-1 Hz, che include la frequenza di

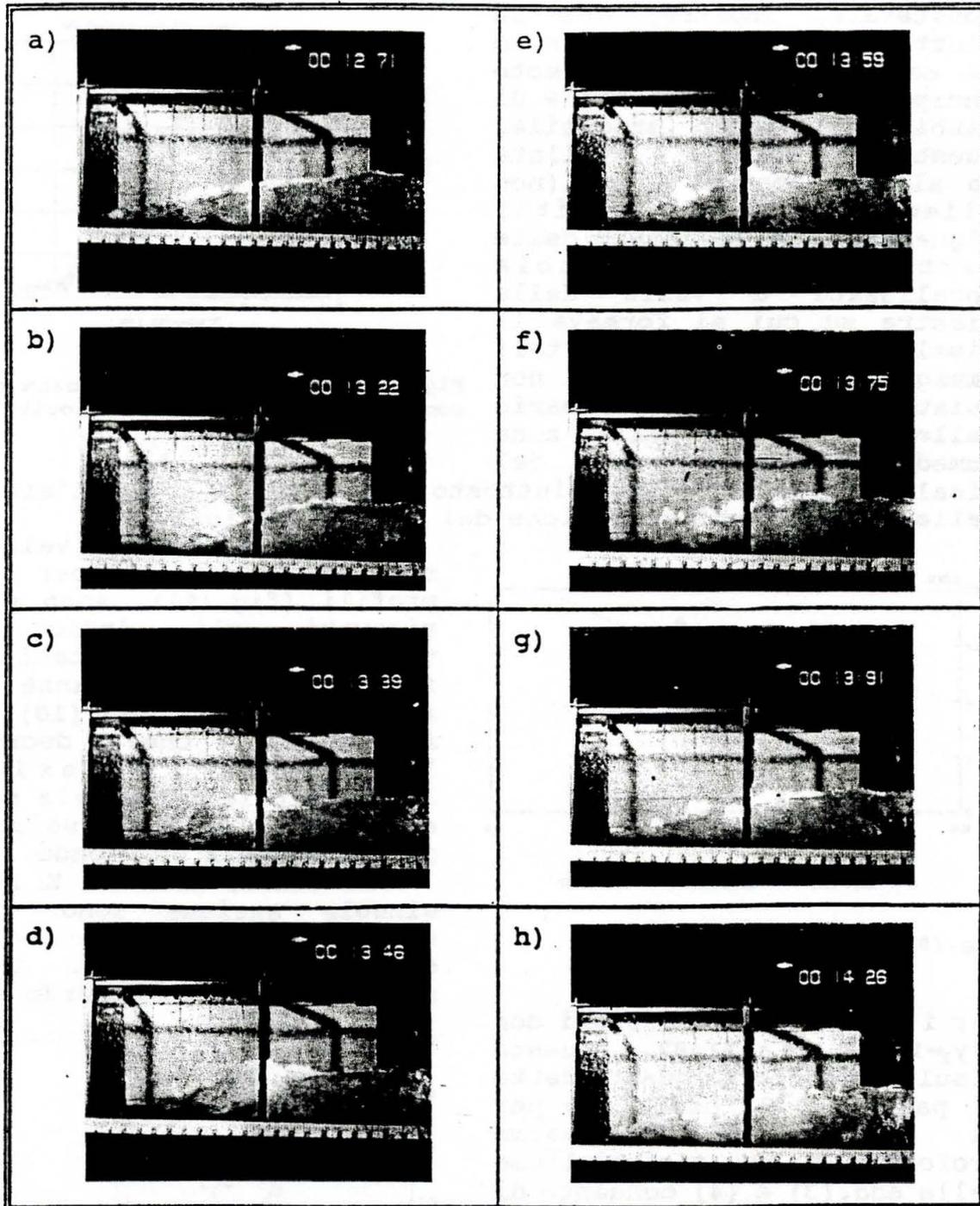


Fig. (7). Struttura dei roller e loro dinamica.

fluttuazione del risalto ( $f=1/1.55=0.65$  Hz) osservato dall'indagine fotografica. Questo risultato mostra l'esistenza di una correlazione tra le fluttuazioni del risalto e le componenti turbolente di velocità del flusso immediatamente a valle della

zona dei roller. Si è potuto constatare, inoltre, che le fluttuazioni del risalto sono la causa principale del moto incipiente delle particelle di sabbia del letto erodibile. Questa conclusione è avallata da alcune immagini video (non allegate per brevità) riguardanti il movimento delle particelle di sabbia localizzate a valle della piastra su cui si formava il risalto. L'analisi di tali immagini ha mostrato che non esiste un moto stazionario delle particelle nella zona immediatamente a valle del risalto, e che queste, piuttosto, si muovono sotto l'effetto delle fluttuazioni-periodiche dei grandi vortici.

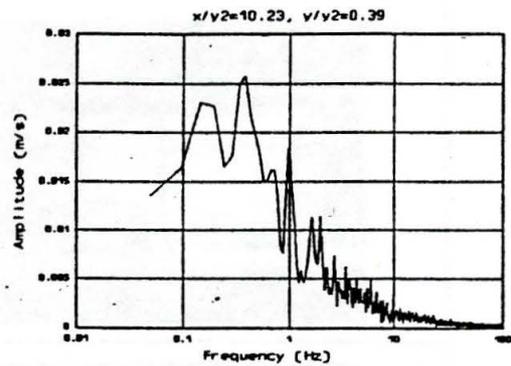


Fig.(8). Spettro delle ampiezze delle componenti fluttuanti di velocità.

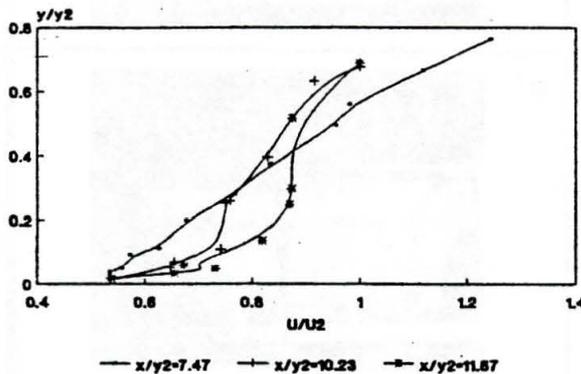


Fig.(9). Profili di velocità.

per i rilievi nelle sezioni con  $x/y_2=10.23$  e  $11.87$ . Questo risultato conferma quanto detto al paragrafo 3, ossia che per il calcolo della massima profondità di escavazione l'uso delle eq.(3) e (4) consente di ottenere buoni risultati per valori di  $L/y_2$  maggiori di 8, in quanto in tale campo il valore di  $K_v$  ricavato con la (4) è attendibile.

Dai valori di velocità rilevati tramite LDA per i tre profili (fig.(9)), sono stati ricavati gli indici di turbolenza  $K_v$ , riportati, in funzione della distanza dal fondo  $y$ , nella fig.(10). La figura mostra che  $K_v$  decresce lungo la direzione longitudinale del canale e che esso ha il valore massimo in corrispondenza del fondo.

I valori medi dei  $K_v$  nella singola sezione sono stati confrontati con i valori ottenuti dall'eq.(4). Si è rilevato un buon accordo solo

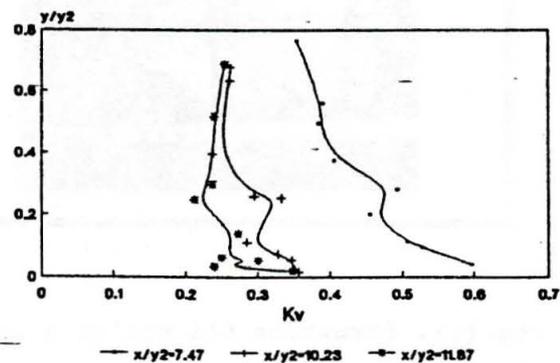


Fig.(10). Profili di  $K_v$ .

## 5. CONCLUSIONI

Per quanto attiene la struttura dell'escavazione si ritiene

che la forma e la dimensione del profilo di escavazione siano dipendenti dalle condizioni cinematiche e dinamiche del flusso alla fine del risalto. Questo può essere quantificato introducendo il parametro di intensità di turbolenza  $K_v$  e un parametro  $T$ , definito come il rapporto tra la tensione tangenziale critica ottenuta dal diagramma di Shields e il corrispondente effettivo valore.

La profondità di scavo decresce con l'aumentare della lunghezza della piastra (cioè col decrescere del parametro  $K_v$ ) e con l'aumentare di  $T$ .

La formula di Razavan, in cui è presente l'intensità di turbolenza del flusso a valle del risalto idraulico, appare essere la più soddisfacente per stimare la massima escavazione per valori di  $L/y_2$  maggiori di 8. Per più bassi valori di  $L/y_2$  si è notato un disaccordo tra i valori sperimentali e calcolati di massima escavazione, dovuto alla difficoltà di valutare il parametro  $K_v$  dalle formule proposte in letteratura. Si è fatto uso di un sistema LDA per la misura delle componenti fluttuanti di velocità a valle del risalto. I valori medi dei parametri  $K_v$  nella singola sezione sono stati confrontati con quelli calcolati attraverso la formula empirica di Koumine. Un buon accordo si è avuto solo per valori di  $L/y_2$  maggiori di 8.

Sono state sviluppate delle analisi fotografiche usando una video-camera per studiare il comportamento a grande scala dei roller. Si sono potuti così osservare fenomeni di formazione e allungamento dei grandi vortici e periodiche oscillazioni della posizione del piede del risalto. Si ritiene che a questi fenomeni siano principalmente legate le instabilità delle particelle di sabbia localizzate a valle del risalto idraulico.

#### SIMBOLI

$d_{50}$ : diametro corrispondente al 50% di passante nell'analisi granulometrica della sabbia;

$e$ : profondità di escavazione al di sotto del livello originario;

$e_m$ ,  $e_c$ : profondità massima di escavazione rispettivamente misurata e calcolata al di sotto del livello originario;

$K_v$ : indice di turbolenza;

$L$ : lunghezza della piastra valutata dalla sezione di monte del risalto;

$L_{min}$ : minimo valore di  $L$ ;

$L_{max}$ : massimo valore di  $L$ ;

$Q$ : portata;

$q$ : portata specifica (portata divisa per la larghezza del canale);

$T_r$ : rapporto di tensioni tangenziali ( $(\tau_0)_{cr}/\tau_0$ );

$U_1$ ,  $U_2$ : velocità media a monte e a valle del risalto;

$U_c$ : velocità critica della condizione di moto incipiente;

$U$ : velocità di attrito;

$x$ : distanza longitudinale dal piede del risalto;

$X$ : distanza longitudinale dalla fine della piastra;

$X_0$ : lunghezza della fossa di erosione;

$y$ : altezza del flusso ( $y_1$  e  $y_2$  altezze del flusso rispettivamente

a monte e a valle del risalto idraulico);  
 $\gamma$ : peso specifico del fluido;  
 $\gamma_s$ : peso specifico delle particelle;  
 $\nu$ : viscosità cinematica;  
 $\tau_0$ : tensione tangenziale media al fondo;  
 $(\tau_0)_{cr}$ : tensione tangenziale critica al fondo ricavata dalla curva di Shields.

#### BIBLIOGRAFIA

- [1] Catakli O., Ozal K., Tandogan A.R., *A study of scours at the end of stilling basin and use of horizontal beams as energy dissipators*, 11th congress of large dams, -Madrid, 1973.
- [2] Colaric, Pichon, Sananes, *Etude des affouillement à l'aval d'un seuil deversant*, 12th congress of IAHR, Fort Collins, 1967.
- [3] Farhoudi J., Smith K.V.H., *Local scour profiles downstream of hydraulic jump*, J. Hydr. Res., Vol.23, No.4, 1985.
- [4] Gunko F.G., Popova K.S., *Etude du processus d'affouillement local des sols a grains fins heterogenes a l'aval des arriere-radiers des barrages-deversoirs*, 14th congress of IAHR, Paris, Vol. 3, No. C45, 1971.
- [5] Hartung F., Csallner K., *The scouring energy of the macroturbulent flow downstream of a hydraulic jump*, 12th congress of IAHR, Fort Collins, 1967.
- [6] Johnston A.J., *Scourhole developments in shallow tailwater*, J. Hydr. Res., IAHR, Vol. 28, No.3, 1990.
- [7] Long D., Rajaratnam N., Steffler P.M., Smy P.R., *Structure of the flow in hydraulic jump*, J. Hydr. Res., IAHR, Vol. 29, No. 2, 1991.
- [8] Nola F., Rasulo G., *Escavazioni a valle di dissipatori a risalto*, Idrotecnica, N.2, marzo-aprile 1989.
- [9] Ortiz J.P., *Macroturbulencia de escoamento a jusante de estruturas de dissipacao por ressalto*, Estudo teorico-experimental, B. Tec. DAEE, Sao Paulo, Vol. 5, No. 3, 1982.
- [10] Razavan E., *Resultats de l'etude du mouvement macroturbulent en aval du ressaut hydraulique*, 12th congress of IAHR, Paris, Vol. 3, paper C3, 1967.
- [11] Razavan E., *L'influence de la haute turbulence sur l'entrainement des alluvions*, 14th congress of IAHR, Paris, Vol. 3, paper C3, 1971.
- [12] Resch F.J., Leutheusser H.J., *Mesures de turbulence dans le ressaut hydraulique*, La Houille Blanche, No.1, 1971.
- [13] Resch F.J., Leutheusser H.J., Coantic M., *Etude de la structure cinematique et dynamique du ressaut hydraulique*, J. Hydr. Res., AIRH, Vol. 14, No.4, 1976.
- [14] Rouse H., Siao T.T., Nagaratnam S., *Turbulence characteristics of the hydraulic jump*, J. Hydr. Div., ASCE, Vol.84, No. HY1, 1959.
- [15] Valentin F., *Considerations concerning scour in the case of flow under gate*, 12th congress of the IAHR, Fort Collins, 1967.