

Giornate di studio in onore del Prof. Edoardo Orabona

nel centenario della nascita

Bari, 13-14 ottobre 1997



EDITORIALE BIOS

SUI FENOMENI ALTERNATIVI IN UN RISALTO IDRAULICO

M. Mossa, A. Petrillo

Dipartimento di Ingegneria delle Acque, Politecnico di Bari, Bari

Sommario

Nella presente memoria vengono descritti dei fenomeni alternativi rilevati nei risalti idraulici analizzati sperimentalmente. Si presenta un'analisi delle immagini riferite ad alcune configurazioni in cui il risalto si manifestava ciclicamente secondo due diverse tipologie. Un'analoga sequenza di immagini è riportata per l'analisi delle fluttuazioni del piede di un risalto che si presentava secondo una singola tipologia. Nella memoria si richiamano i pochi lavori presenti in letteratura che affrontano il problema o che ne fanno menzione. L'analisi delle immagini è stata accompagnata da una serie di valutazioni quantitative riguardanti le oscillazioni dei tipi di risalti e il profilo di superficie a valle degli stessi. Si propone una spiegazione dell'esistenza di tali fenomeni alternativi alla luce delle nuove teorie secondo le quali nei flussi turbolenti è possibile individuare uno scenario ordinato e deterministico sovrapposto ad una turbolenza intesa nel senso classico di disordine e casualità.

1. Introduzione

Le esperienze condotte da Abdel Ghafar et al. (1995) sui processi di escavazione su un fondo sabbioso ad opera di un risalto idraulico posizionato a valle di una piastra misero in evidenza, per alcune configurazioni, l'esistenza di fenomeni alternativi. Questi consistevano nell'alternanza di tipi di risalti idraulici con una regolarità temporale che ha consentito di definire un periodo del fenomeno. Nel presente lavoro, partendo dagli studi allora condotti e da quelli di Nebbia (1942), si analizzano i fenomeni in parola alla luce di nuove esperienze condotte in un canale a fondo fisso, con un profilo del letto sagomato in modo da riprodurre un profilo di escavazione all'equilibrio, rilevato da Abdel Ghafar et al. (1995), in cui i fenomeni alternativi si presentavano. L'idea di riprodurre un analogo profilo in legno ha consentito di verificare se i processi alternativi siano legati alla presenza di un fondo in materiale erodibile o se, piuttosto, essi dipendano dalla forma del fondo stesso, indipendentemente dal fatto che sia erodibile o fisso, e dalle caratteristiche idrodinamiche del flusso in canale. A tal riguardo si osserva che in letteratura sono pochi i lavori sull'argomento e che essi non sono concordi nel dare una risposta univoca circa le ragioni per cui si innescano i fenomeni alternativi.

Long et al. (1991), riferendosi al caso di un risalto in un canale a sezione rettangolare a fondo fisso piano, rilevarono l'esistenza di fenomeni ciclici consistenti nelle fluttuazioni del piede del risalto stesso e nella formazione di strutture vorticose e successiva coalescenza delle stesse.

I fenomeni precedentemente menzionati, pur essendo stati osservati in letteratura, non sono stati analizzati con sistematicità. Nel presente lavoro essi vengono analizzati attraverso le immagini riprese durante le esperienze.

2. Richiami bibliografici

Alcuni fenomeni alternativi nei risalti idraulici furono messi in evidenza da Nebbia (1942), il quale osservava che "nei processi effossori che si verificano a valle di opere di scarico frequentemente accade che la corrente assuma alternativamente due profili limiti, di configurazione nettamente diversa, che si succedono con oscillazioni di carattere quasi periodico. Il passaggio dall'uno all'altro profilo avviene, a seconda di circostanze non ancora precisate, talora bruscamente tal altra quasi gradualmente attraverso un rapido succedersi di profili istantanei di transizione". L'autore mise in evidenza che fenomeni del genere furono descritti da Roth durante una piena del Sihl presso Zurigo, e da Gruner e Locher che li avevano rilevati in esperienze di laboratorio. "E tuttavia, anche quando ci siano divenuti quasi familiari, ogni volta che li incontriamo siamo indotti a considerarli con un senso sempre rinnovato di pensoso stupore: perché sembra quasi di assistere ad un armonioso gioco di natura, di cui le spiegazioni proposte illustrano ragionatamente la parte formale appariscente piuttosto che la causa intima, la quale appare ancora in certa guisa un po' misteriosa" (Nebbia, 1942).

Le esperienze di Nebbia furono inizialmente condotte su un canale con un fondo costituito per un primo breve tratto da una platea orizzontale non erodibile e successivamente da terreno sciolto (sabbia e ghiaietto). Per quanto riguarda l'apparato sperimentale si rimanda a Nebbia (1942). Qui preme mettere in evidenza che per alcune configurazioni si innescavano i fenomeni alternativi, i quali consistevano nell'avere profili di escavazione che si deformavano ciclicamente e, di conseguenza, risalti di diverso tipo. Circa il profilo della corrente l'autore mise in evidenza che non appena l'escavazione aveva raggiunto un certo sviluppo, anche esso incominciava a deformarsi e ad assumere alternativamente degli andamenti di diverso tipo.

Un primo tentativo di spiegazione di questi fenomeni è dovuto a Rehbock (Nebbia, 1942), il quale pensò di attribuirli all'azione del processo effossorio. Einwachter (Nebbia, 1942) condusse studi sull'argomento presso l'istituto di Karlsruhe. L'autore giunse a determinare due particolari valori critici y' e y'' della quota del pelo libero della corrente lenta di valle rispetto alla platea che definiscono i limiti oltre i quali si hanno le seguenti caratteristiche: per $y < y'$ non può costituirsi la vena che Nebbia chiama ondulata e si ha solo quella definita sommersa; per ogni $y > y'$ invece non può costituirsi la vena sommersa e si ha solo quella ondulata. Poiché normalmente si ha $y'' < y'$ nell'intervallo $[y'', y']$ si ha una condizione di labilità in cui si può riscontrare ciascuno dei due tipi

con possibilità di innescare le oscillazioni periodiche.

Secondo Einwachter (Nebbia, 1942) il fenomeno alternativo sarebbe da attribuire al fatto che la vena sommersa esercita una intensa azione effossoria a causa della quale la profondità dell'escavazione va gradatamente crescendo sino a raggiungere una profondità critica in corrispondenza della quale, non potendo più sussistere la vena sommersa, si costituisce la vena ondulata; questa, a sua volta, esercita un'azione di interrimento nella regione in cui più profonda è l'escavazione, per modo che la profondità stessa va a mano a mano regredendo sino a raggiungere un altro valore critico che non consente più il permanere della vena ondulata e si costituisce così di nuovo la vena sommersa.

Fenomeni alternativi furono osservati anche da Dupin e Tessie-Solier (Nebbia, 1942), per i quali essi trovano origine nelle variazioni del profilo del letto in materiale sciolto pure esse alternative. Gli autori, a conferma della loro tesi, eseguirono una serie di esperienze senza sabbia riscontrando che solo un tipo di risalto era compatibile, mentre l'altro era al più presente per durate limitate più o meno brevi.

Schoklitsch (Nebbia, 1942), infine, diede del fenomeno alternativo la seguente spiegazione: al disotto della prima cresta d'onda della vena ondulata, cioè immediatamente a valle della platea, si riscontra un grosso vortice che preleva materiale dal fondo della escavazione e lo spinge verso la platea. Lo spazio occupato dal vortice viene così gradatamente interrato sinché improvvisamente la vena cambia configurazione e si sommerge. La vena sommersa esercita un'azione effossoria asportando nuovamente il materiale che ha interrato la zona del vortice, questo si ricostituisce e si torna nuovamente alla vena ondulata.

A riguardo di quanto detto in precedenza, Nebbia (1942) osservava che "si tratta di spiegazioni notevolmente differenti tra loro: tutte però concordano nel riconoscere come causa prima del fenomeno alternativo la mobilità del fondo che interviene a modificare or l'uno or l'altro elemento della sagoma della escavazione".

Nebbia osservava che questo era lo stato dell'arte quando iniziò i suoi studi sui fenomeni alternativi. Durante questi studi, che furono intrapresi inizialmente per il caso di fondo mobile, l'autore osservò che non sempre esisteva una costante corrispondenza tra la sagoma dell'escavazione e il profilo della vena. Tutto ciò fece sorgere il dubbio che la mobilità del fondo non esercitasse quella influenza esclusiva di causa unica e necessaria che altri autori le avevano attribuito.

Nebbia concludeva i suoi studi con la seguente osservazione che riteneva, tuttavia, troppo rigida e da ritoccare: "il materiale mobile costituente l'alveo non ha alcuna influenza diretta sui fenomeni alternativi i quali, a parità di altri elementi, si verificano egualmente su fondo mobile e su fondo stabilito, e dipendono principalmente dalla portata, dal carico totale e dalla sagoma dell'alveo, alla quale è legata la possibilità di formazione di necessari vortici di fondo. La mobilità del letto interviene pertanto solo in via indiretta in quanto permette che le successive sagome assunte dalla escavazione durante il processo effossorio siano sempre tali da consentire il permanere del fenomeno alternativo, quando questo si manifesti".

Per quanto riguarda i risalti su fondo non piano, nel seguito si farà riferimento alla classificazione proposta da Moore e Morgan (1959) e utilizzata da molti autori. A tal riguardo si faccia riferimento alla figura 1 tratta da Ohtsu e Yasuda (1991). Sebbene tale classificazione si riferisca al caso in cui la cavità del letto sia generata da un gradino, è possibile estendere la terminologia utilizzata al caso in studio nel presente lavoro, in cui, come già detto, la cavità sul letto ligneo è di forma più complessa.

Fenomeni alternativi sono stati osservati anche successivamente da altri autori, che tuttavia non hanno mai approfondito lo studio del fenomeno, limitandosi a evidenziare l'esistenza degli stessi. Hager e Bretz (1986), analizzando i risalti idraulici su fondi con presenza di gradini, osservarono che, nel

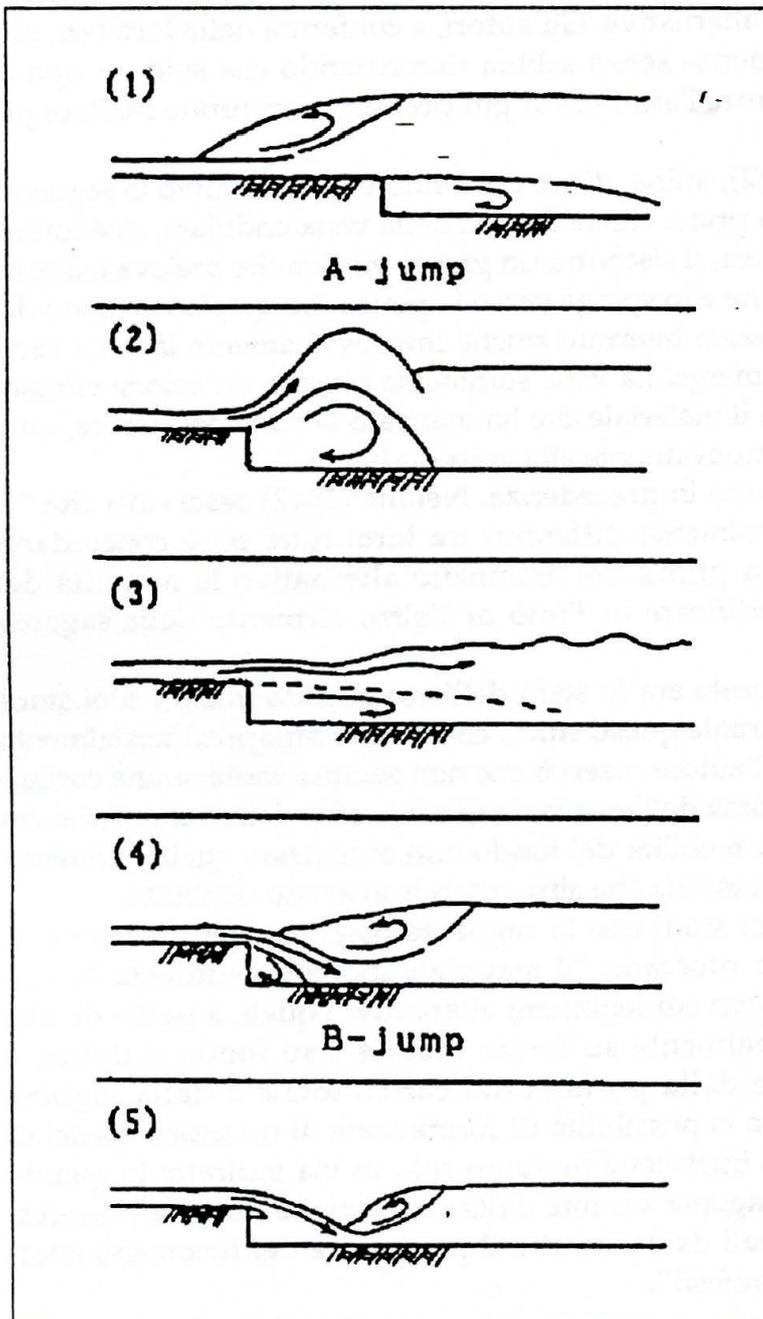


Fig. 1 - Tipi di risalti idraulici. Dall'alto verso il basso: (1) risalto A; (2) risalto a onda; (3) risalto con treno d'onda; (4) risalto B; (5) risalto B minimo. (Da Ohtsu e Yasuda, 1991)

caso dei risalti ad onda, la formazione di quest'ultima poteva essere alquanto instabile. In questi casi gli autori osservarono fenomeni alternativi di formazione di risalti ad onda e di tipo B. Anche Ohtsu e Yasuda (1991) condussero studi sui risalti su un fondo con presenza di un gradino. Nel caso di gradino basso e numeri di Froude della corrente di monte relativamente bassi gli autori osservarono l'instaurarsi di fenomeni periodici con i diversi tipi di risalti che si alternavano nel tempo. Fenomeni analoghi erano stati osservati dagli stessi autori nel caso di gradino alto per numeri di Froude della corrente di monte relativamente grandi.

Appare interessante notare che anche Moore e Morgan (1959), presentando dei diagrammi sulle regioni di stabilità di un risalto idraulico, osservarono l'esistenza di regioni di incertezza sulla formazione del risalto ad onda o di tipo B. Anche se gli autori non parlano di fenomeni alternativi è possibile che tale incertezza sia imputabile proprio all'esistenza degli stessi; tra l'altro la regione di incertezza è posizionata a cavallo tra quella di risalto di tipo B stabile e quella del risalto ad onda stabile.

Abdel Ghafar et al. (1995), analizzando i processi di escavazione localizzata a valle di una piastra orizzontale causati dalla presenza di un risalto idraulico, evidenziarono per alcune configurazioni l'esistenza di alternanze cicliche di tipi di risalti con un ben definito periodo. La presente memoria riporta i risultati sperimentali tesi a verificare l'eventuale esistenza di tali fenomeni alternativi nel caso di letto fisso con un profilo uguale ad uno di quelli per i quali Abdel Ghafar et al. (1995) osservarono l'innescarsi delle alternanze cicliche dei tipi di risalti idraulici.

3. Apparato sperimentale e configurazioni analizzate

Le indagini sperimentali sono state condotte presso il laboratorio di idraulica dell'Istituto Agronomico Mediterraneo di Valenzano (Bari) in una canaletta di lunghezza 7.72 m con sezione trasversale rettangolare avente base di 30.1 cm e altezza di 40.0 cm. Il fondo è in plexiglas e le pareti in vetro. A monte della canaletta è posta una vasca di carico munita di sistema di griglie per dissipare l'energia cinetica della corrente in arrivo e di uno scarico di superficie, con ciglio a quota regolabile, che consente di mantenere a monte della paratoia un livello costante. L'alimentazione avviene attraverso la rete in pressione del laboratorio. La portata e le condizioni idrodinamiche in canaletta sono state regolate tramite due paratoie poste a monte e a valle del canale. La paratoia di valle era del tipo a ventola. A quest'ultima fa seguito una vasca di calma al cui interno sono poste griglie dissipatrici e nella cui parte terminale è ubicato uno stramazzo triangolare per la misura delle portate.

In figura 2 si riporta la conformazione del fondo utilizzata per tutte le configurazioni analizzate nel presente studio. In pratica il profilo di fondo è uguale ad uno di quelli rilevati da Abdel Ghafar et al. (1995) nella sezione longitudinale centrale del canale quando in esso si raggiungevano le condizioni di sostanziale equilibrio all'erosione. Ovviamente, nel caso del presente studio, il profilo

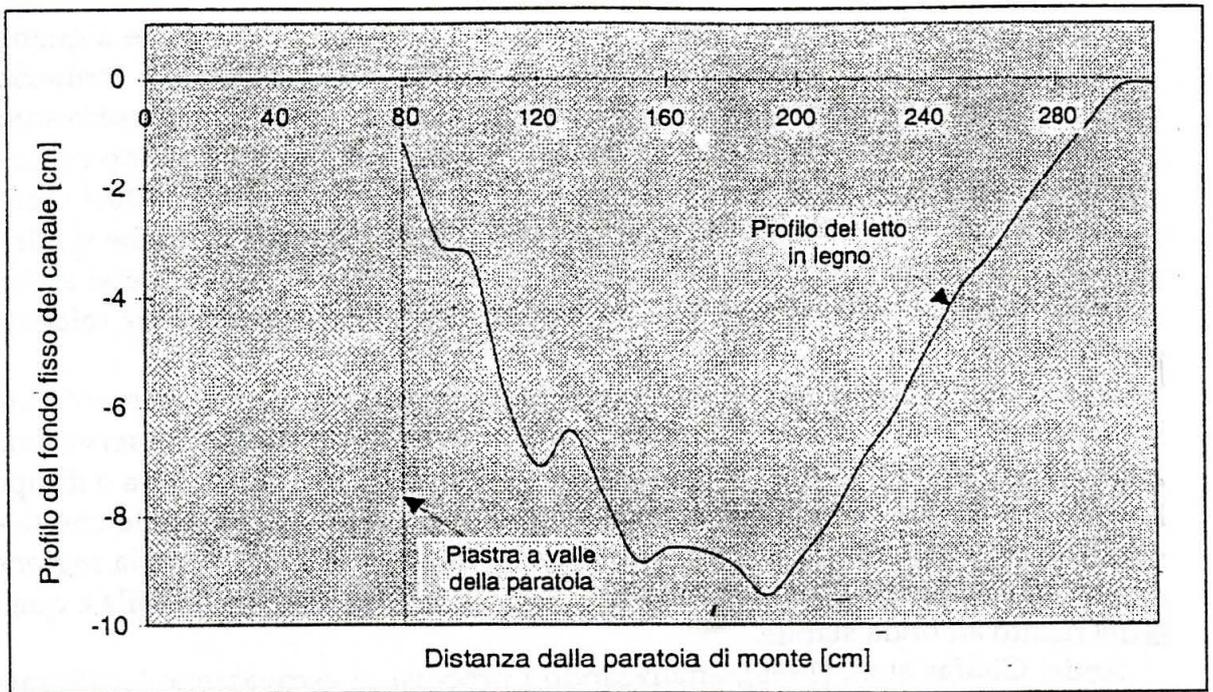


Fig. 2 - Profilo del fondo fisso del canale sperimentale

della cavità è in materiale ligneo. Come è possibile osservare dalla figura 3, a valle della piastra a fondo piano e della cavità lignea, è posizionato un tratto rettilineo di lunghezza 3.30 m.

Durante tutte le prove si è provveduto a misurare la temperatura dell'acqua facendo uso di un termometro in grado di apprezzare il decimo di grado Celsius. Al fine di poter analizzare i risalti con accuratezza, si è fatto uso di una videocamera che riprendesse la zona del roller e quelle immediatamente adiacenti ad essa. Per alcune configurazioni, al fine di poter valutare l'esistenza di

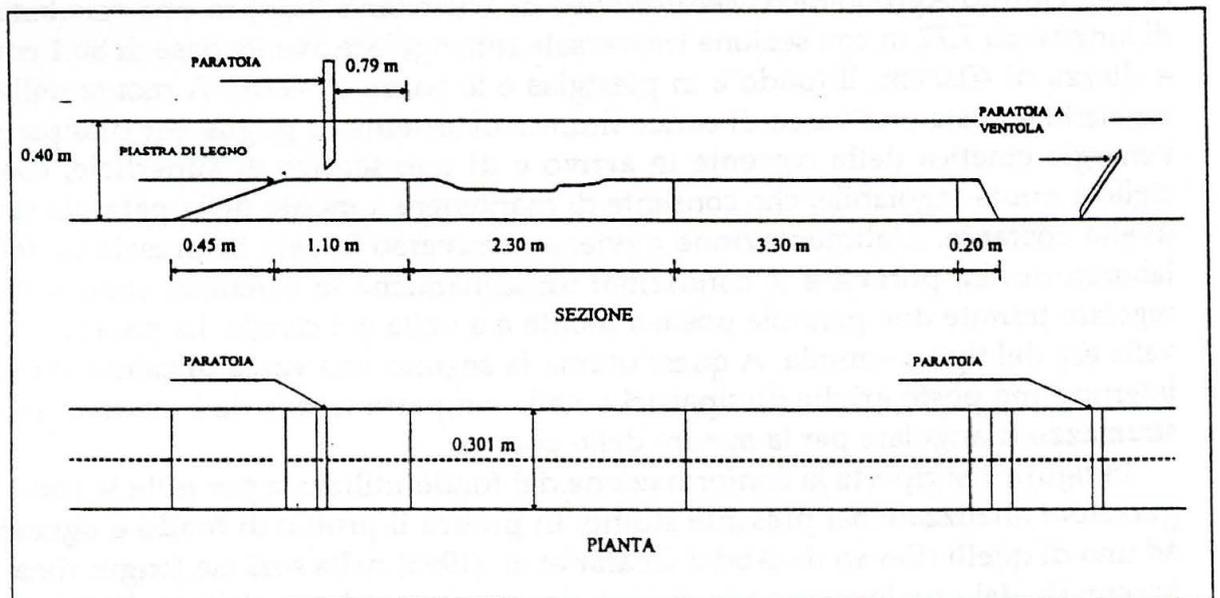


Fig. 3 - Schema del canale sperimentale

un risalto ad onda o di tipo A o B, si è fatto uso di una particolare sonda di tipo resistivo, costituita da due punte metalliche di diversa lunghezza. Quando dette punte sono ambedue immerse nel liquido, il condizionatore elettrico, a cui esse sono collegate, fornisce un segnale positivo; mentre, quando la punta più corta è in aria, il condizionatore fornisce un segnale negativo. La sonda si è rivelata utile per le configurazioni con alternanze cicliche dei tipi di risalti. In tutti questi casi essa veniva posizionata nella sezione immediatamente a monte del risalto, quando esso si manifestava secondo la tipologia ad onda, verificando che la punta più lunga fosse sempre immersa in acqua e la seconda fosse in aria. È evidente, allora, che nel caso in cui il risalto era del tipo ad onda il circuito era aperto e il condizionatore forniva un segnale negativo. Quando il risalto ad onda evolveva nel tipo A o B, la tipica generazione di vortici, con conseguente innalzamento del livello idrico, provocava la chiusura del circuito e, quindi, un segnale positivo. Il sistema brevemente descritto, dunque, è in grado di segnalare, nel caso di alternanze dei tipi di risalti, gli intervalli di tempo in cui si sia stabilito il tipo ad onda (circuito aperto) e quelli in cui si sia stabilito il tipo A o B (circuito chiuso).

Immediatamente a valle del risalto si provvedeva a posizionare una classica sonda resistiva per la misurazione del profilo di superficie collegata ad una centralina di controllo.

Le tensioni rilevabili dalle due sonde sono state acquisite simultaneamente attraverso l'uso di un calcolatore di processo dotato di una scheda di conversione A/D e D/A della National Instruments modello AT-MIO 16 H.

In tabella 1 si riportano le configurazioni dei risalti idraulici analizzati, avendo indicato con Q la portata immessa in canale, con y_1 l'altezza dell'acqua in corrispondenza della sezione 1 in cui l'elemento ligneo piano presentava un piccolo gradino a partire dal quale iniziava a profilarsi la cavità che ospitava il risalto (ad eccezione dei risalti di tipo A, per i quali y_1 è stato misurato nella sezione in cui mediamente si posizionava il piede), con y_t l'altezza dell'acqua sulla parte terminale e piana del basamento ligneo a valle della cavità, con F_1 il numero di Froude nella sezione 1 e con $Re = V_1 / y_1 / \nu$ il numero di Reynolds, avendo indicato con V_1 la velocità media nella sezione 1 e con ν la viscosità cinematica molecolare dell'acqua. Si osserva che, per le configurazioni caratterizzate da alternanze di risalti ad onda e di tipo A, il valore di y_1 è da riferirsi a quest'ultimo tipo di risalto. Le configurazioni sono state suddivise nei gruppi G1 e G2. Per tutte le configurazioni le analisi sono state condotte solo dopo aver atteso un intervallo di tempo maggiore di quello del regime transitorio iniziale. Inoltre, si sono protratte tutte le esperienze per tempi mai inferiori alle due ore. Nelle esperienze del primo gruppo si è provveduto a individuare i tipi di risalti idraulici che si realizzavano per definite condizioni del carico di monte e dell'apertura delle paratoie di monte e di valle. Normalmente, per fissate condizioni di monte (carico e apertura della paratoia), si sono analizzate diverse configurazioni variando l'apertura della paratoia di valle. Le esperienze del secondo gruppo sono state realizzate al fine di analizzare le singole configurazioni con l'ausilio delle due sonde di cui si è parlato in precedenza. Alcune con-

N.	Carico di monte [cm]	Altezza paratoia di valle [cm]	Q [l/s]	Y1 [cm]	Yt [cm]	Yt/Y1	F1	Re	Tipo
1G1	27.0	5.20	21.87	4.20	10.19	2.43	2.70	72658	B
2G1	19.2	aperta	21.11	6.81	10.00	1.47	1.26	70133	ad onda
3G1	41.0	aperta	15.32	1.65	7.80	4.73	7.67	50897	B
4G1	42.0	9.0	12.83	1.77	7.79	4.40	5.78	42625	B
5G1	42.0	11.5	12.30	1.73	7.59	4.39	5.73	40864	B
6G1	42.0	16.0	12.12	1.92	8.30	4.32	4.83	40266	B
7G1	42.0	12.5	12.04	1.84	7.60	4.13	5.12	40000	B
8G1	42.0	18.2	12.70	1.94	10.43	5.38	4.99	42193	B e ad onda
9G1	42.0	19.5	12.30	1.64	11.94	7.28	6.21	40864	ad onda
10G1	42.0	19.0	12.43	1.62	11.35	7.01	6.39	41296	ad onda
11G1	42.0	19.9	12.10	1.52	11.85	7.80	6.85	40199	A e ad onda
12G1	42.0	21.0	12.02	1.84	13.39	7.28	5.11	39933	A
13G1	33.0	17.9	16.49	2.72	11.36	4.18	3.90	54784	B e ad onda
14G1	33.0	aperta	16.36	2.58	8.82	3.42	4.19	54325	B
15G1	33.0	10.0	16.17	2.57	8.83	3.44	4.16	53721	B
16G1	33.0	18.5	16.20	2.69	12.34	4.59	3.89	53821	ad onda
17G1	33.0	19.0	16.43	2.60	13.04	5.02	4.16	54585	ad onda
18G1	33.0	19.3	16.28	2.50	13.20	5.28	4.37	54086	A e ad onda
19G1	33.0	20.0	16.40	3.05	14.07	4.61	3.27	54485	A
1G2	41.0	16.7	9.60	2.50	7.70	3.08	2.58	31894	B e ad onda
2G2	41.7	16.8	9.60	1.90	7.90	4.16	3.89	31894	B e ad onda
3G2	41.6	16.4	9.33	2.40	7.60	3.17	2.66	30997	B e ad onda
4G2	41.5	17.4	9.23	2.30	8.40	3.65	2.81	30664	B e ad onda
5G2	40.0	19.0	14.00	2.80	11.20	4.00	3.17	46512	B
6G2	31.0	aperta	15.70	3.60	7.90	2.19	2.44	52159	ad onda
7G2	31.0	19.3	16.20	3.60	13.00	3.61	2.52	53821	A e ad onda

Tab. 1 - Configurazioni analizzate -

figurazioni del gruppo G2 si riferiscono a risalti stabili nella loro tipologia. La loro analisi è risultata utile per lo studio dei fenomeni, rilevatisi anch'essi ciclici, di formazione, evoluzione e coalescenza dei vortici del roller. Per le esperienze di entrambi i gruppi G1 e G2 si è fatto uso della videocamera.

È da evidenziare come a parità di condizioni di monte (carico e apertura della paratoia) si avessero risalti di tipo B per valori relativamente bassi dell'altezza della paratoia di valle (al limite totalmente aperta), risalti ad onda per altezze intermedie della paratoia di valle e risalti di tipo A per le altezze maggiori della paratoia di valle. Le configurazioni per le quali si sono presentate le alternanze cicliche dei tipi di risalti si sono sempre realizzate quando, a parità di condizioni di monte, l'altezza della paratoia di valle era intermedia rispetto a quelle che consentivano la formazione di un unico tipo di risalto.

In figura 4 si riporta un diagramma simile a quello proposto da Mohamed e McCorquodale (1992), che consente di evidenziare le regioni di stabilità di ciascun tipo di risalto. In tale diagramma si riportano sull'asse delle ascisse il numero di Froude F_1 e sull'asse delle ordinate il rapporto y_2/y_1 . In accordo con quanto affermato in precedenza, dalla figura richiamata è possibile notare che le configurazioni in cui apparivano le alternanze cicliche dei tipi di risalti sono rappresentate da punti posizionati a cavallo di due regioni limitrofe. Dalla stessa figura si osserva ancora che, per valori bassi del numero di Froude F_1 le regioni di stabilità di un singolo tipo di risalto idraulico tendono a rimpicciolirsi. Infatti, durante le esperienze condotte, per le configurazioni in parola, erano sufficienti, a parità di condizioni di monte, lievi variazioni dell'apertura della paratoia di valle, perché si generassero i diversi tipi di risalti.

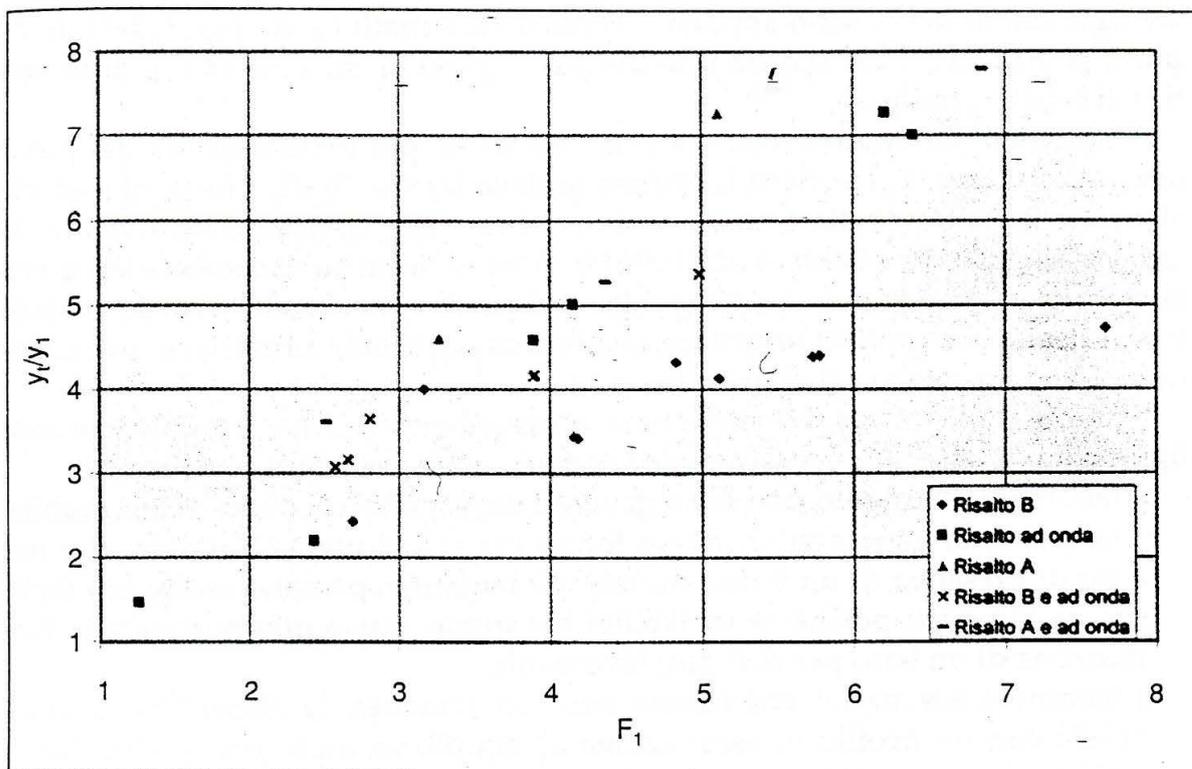


Fig. 4 - Abaco dei risalti idraulici analizzati

4. Analisi delle immagini

Nelle figure 5a÷5h si riportano le immagini del risalto idraulico 8G1 di tabella 1. Il tempo riportato nelle didascalie delle figure richiamate e in quelle che seguiranno è espresso in minuti, secondi e centesimi di secondi a partire dall'inizio della ripresa, che avveniva dopo un intervallo di tempo sufficientemente lungo dall'inizio dell'esperienza. In figura 5b è evidente un risalto di tipo ad onda mentre in figura 5c si nota l'inizio della fase di passaggio da risalto ad onda a risalto di tipo B. Le immagini sono state opportunamente scelte per mettere in evidenza questa fase di transizione (Figg. 5c÷5e). In figura 5e le

strutture vorticose sembrano completamente sviluppate in quelle proprie di un risalto B, come si evince dalla particolare concentrazione di aria in prossimità del piede. A partire dalla figura 5g il risalto B diviene instabile e comincia a trasformarsi in risalto ad onda che può ritenersi completamente stabilito in figura 5h. Si mette in evidenza che i fenomeni ciclici rilevati in precedenza sono caratterizzati da un grosso vortice con rotazione oraria, nel caso di apparizione del risalto ad onda, e da vortici con rotazione antioraria, nel caso di apparizione del risalto di tipo B.

Nelle figure 6a÷6f si riportano le immagini della configurazione 18G1. In tali immagini è possibile osservare le oscillazioni tra risalto A e risalto ad onda. In figura 6b si nota come il risalto precedentemente ad onda stia evolvendo in quello di tipo A, ossia con il piede posizionato sulla piastra di monte. Dal diagramma di figura 4 è possibile osservare, come si è detto in precedenza, che le configurazioni in cui sono apparsi i fenomeni alternativi sono rappresentate da punti posizionati a cavallo tra due distinte regioni in cui sono stabili differenti tipi di risalti idraulici.

I fenomeni alternativi sono stati rilevati anche per le fluttuazioni del piede dei risalti di tipo A. In effetti le immagini delle figure 7a÷7h, che si riferiscono al risalto 19G1 di tabella 1, mettono in evidenza tale fenomeno già rilevato da Long et al. (1991) e Habib et al. (1994a-b-c) per i risalti su canale a sezione rettangolare a fondo piano. Anche per le configurazioni caratterizzate da un solo tipo di risalto si è potuto osservare un processo ciclico di formazione, evoluzione e coalescenza dei vortici del roller.

L'analisi delle immagini richiamate in precedenza relative a tre diverse configurazioni di tabella 1 consentono di addivenire alle seguenti conclusioni:

- I fenomeni alternativi non sono generati dalla presenza di un fondo mobile. Essi possono generarsi anche su fondo fisso. È evidente, tuttavia, che nel caso di presenza di un fondo mobile tali fenomeni possono essere più facilmente innescati poiché la variabilità del fondo stesso può portare alla formazione di un letto per così dire favorevole.
- I fenomeni alternativi, che furono messi in evidenza da Abdel Ghafar et al. (1995) con un profilo di escavazione all'equilibrio analogo a quello ligneo utilizzato nel presente lavoro, si manifestarono per condizioni idrodinamiche differenti da quelle che si sono rilevate necessarie in questo studio. È possibile ipotizzare, dunque, che, sebbene la presenza di un letto erodibile non sia una condizione necessaria per l'instaurarsi delle oscillazioni dei tipi di risalti idraulici, essa consenta, in taluni casi, l'apparizione dei fenomeni in parola anche per condizioni idrodinamiche diverse da quelle necessarie nel caso di fondo fisso. Ciò è anche imputabile alla normale disuniformità propria dei letti sabbiosi.
- I fenomeni alternativi non comportano necessariamente un'oscillazione dei risalti di tipo ad onda e B. Nell'ambito delle esperienze condotte è stato possibile osservare alternanze tra risalti ad onda e quelli di tipo B o tra i primi e quelli di tipo A. A parità di condizioni di monte, i tipi di risalti che si alternano nei fenomeni oscillanti sono legati alle condizioni di valle. A tal riguar-

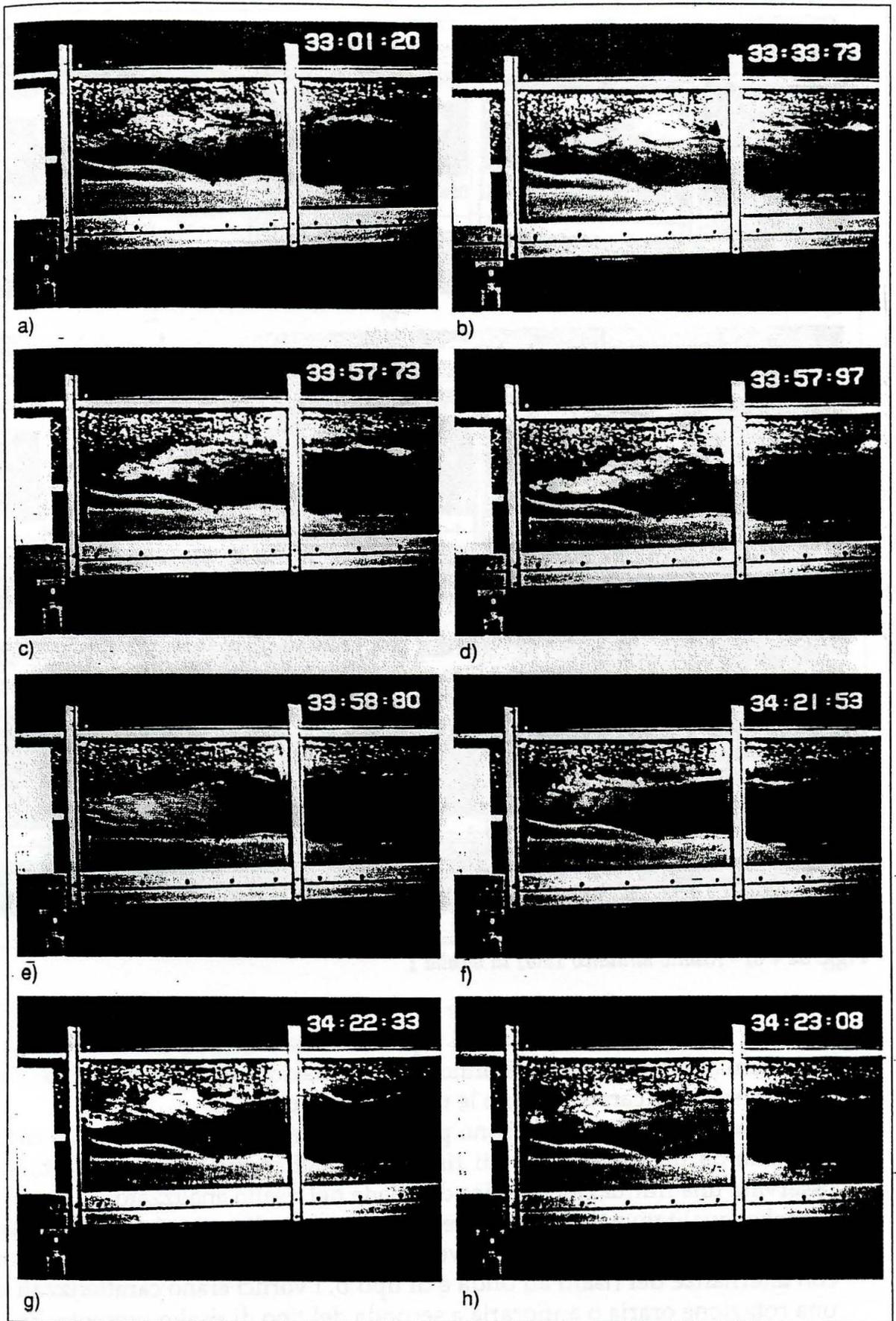
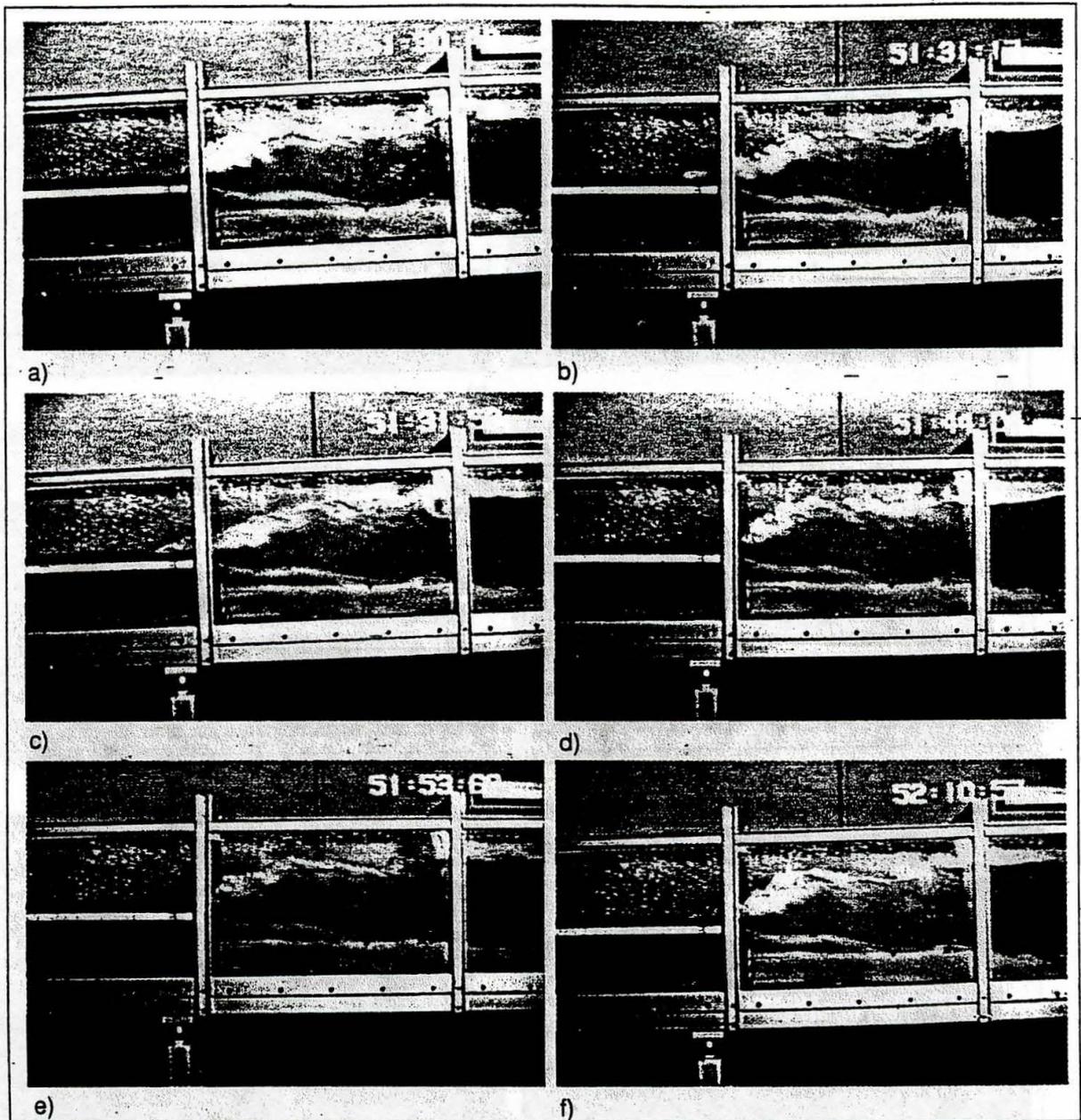


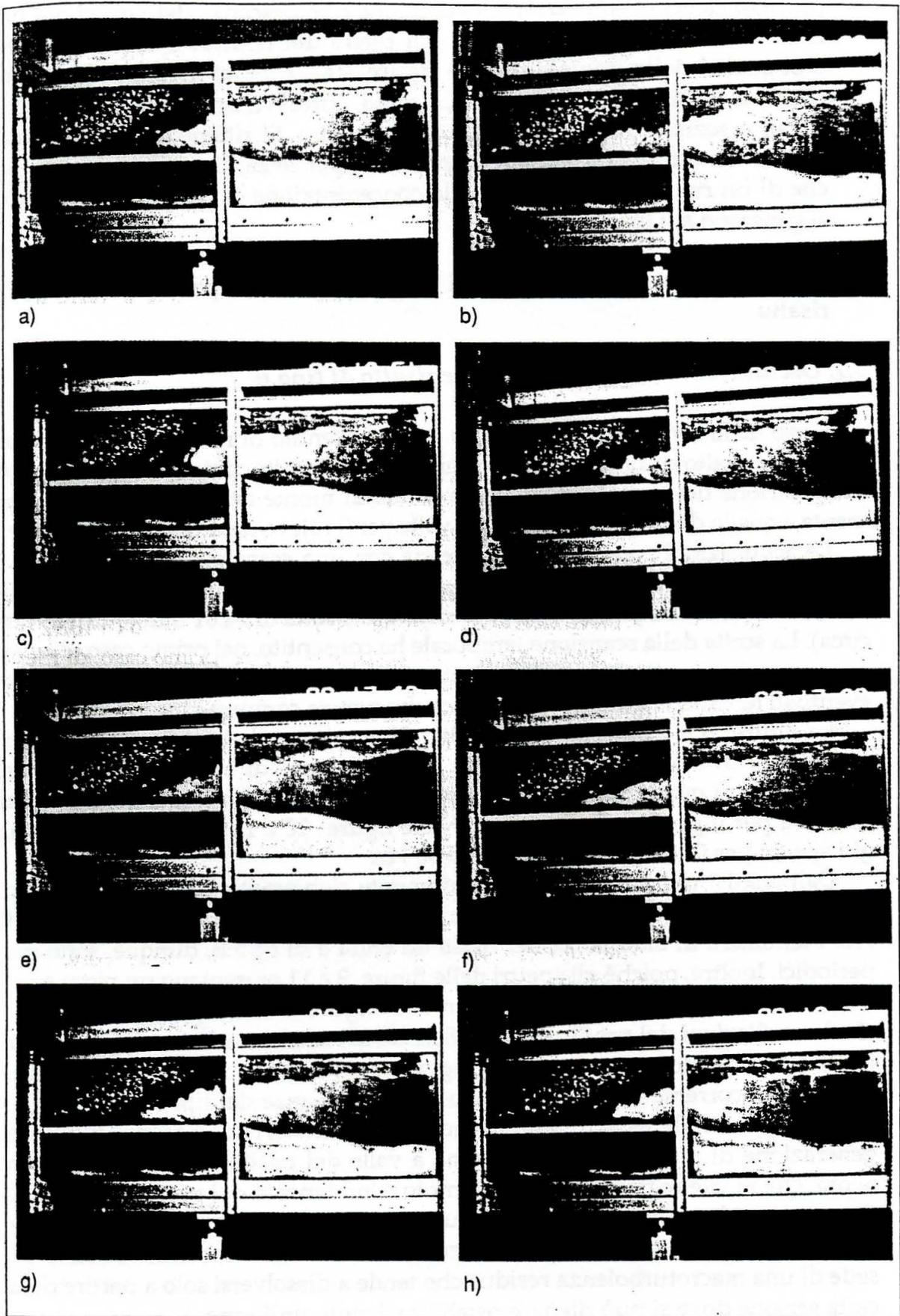
Fig. 5a ÷ 5h - Risalto idraulico 8G1 di tabella 1



Figg. 6a ÷ 6f - Risalto idraulico 18G1 di tabella 1

do il diagramma di figura 4 mette in evidenza che se il punto rappresentativo delle configurazioni in analisi è posizionato a cavallo tra due regioni, i fenomeni alternativi consisteranno nella formazione ed oscillazione dei due tipi di risalti che caratterizzano le regioni in parola.

- Alcuni fenomeni alternativi sono presenti anche per le configurazioni caratterizzate da un singolo tipo di risalto. Per tali configurazioni, infatti, si è osservata una fluttuazione ciclica del piede del risalto analizzato.
- L'analisi qualitativa delle strutture a grande scala di tutti i risalti di tabella 1 ha evidenziato una ciclicità di eventi. In particolare, per le configurazioni con alternanze dei risalti ad onda e di tipo B, i vortici erano caratterizzati da una rotazione oraria o antioraria a seconda del tipo di risalto presente. Per le configurazioni caratterizzate solo dal risalto di tipo A, si sono osservati dei



Figg. 7a ÷ 7h - Risalto idraulico 19G1 di tabella 1

processi ciclici di formazione, evoluzione e coalescenza dei vortici del roller in sincronia con le fluttuazioni del piede del risalto. Questo è evidente dall'analisi delle immagini delle figure 7a÷7h e dai lavori di Long et al. (1991) e Habib et al. (1994a-b-c), i quali, tuttavia, analizzarono i risalti in canali a sezione rettangolare con fondo piano. Si ritiene che i fenomeni in parola siano di fondamentale importanza per le caratteristiche idrodinamiche di un risalto idraulico, come la concentrazione di aria e le pressioni che si generano sul fondo.

5. Analisi dei fenomeni alternativi e del profilo di superficie a valle di un risalto

5.1. Oscillazioni tra risalto ad onda e risalto di tipo B

L'uso della sonda descritta nel cap. 3 ha consentito di rilevare i tempi in cui si stabiliva il risalto ad onda e quelli in cui si aveva il risalto di tipo B. Come già detto, l'acquisizione del segnale relativo alla sonda di monte avveniva contemporaneamente a quello della sonda resistiva di valle per il rilievo del profilo di superficie.

Le acquisizioni sono state eseguite sia con una scansione temporale di 0.1 s che di 0.02 s per un numero di dati uguale a 32768 per ciascuna sonda (rispettivamente la durata complessiva dell'acquisizione è stata di 54.61 min o di 10.92 min circa). La scelta della scansione temporale ha consentito, nel primo caso, di rilevare un numero particolarmente elevato di cicli e, nel secondo caso, di rilevare eventuali fenomeni alternativi anche con frequenze comprese tra 5 Hz e 25 Hz.

Le figure 8 e 9 riportano gli spettri di ampiezza delle serie storiche, per il risalto 2G2 di tabella 1, rilevate, con una frequenza di 10 Hz, rispettivamente dalla sonda di monte, in grado di rilevare il tipo di risalto idraulico, e da quella resistiva per il profilo di superficie. Nelle figure 10 e 11 si riportano gli analoghi spettri per il caso di acquisizioni a 50 Hz.

Dall'analisi delle figure precedentemente richiamate è possibile osservare l'esistenza in ogni spettro di un picco ad una frequenza di poco superiore a 0.1 Hz. I fenomeni di alternanza dei risalti ad onda e di tipo B, dunque, sono quasi periodici. Inoltre, poiché gli spettri delle figure 9 e 11 presentano un picco ad una frequenza analoga a quella degli spettri delle figure 8 e 10, è possibile concludere che le oscillazioni del profilo di superficie della zona immediatamente a valle del roller (intendendo questo come la regione aerata in cui il flusso si allarga per generare la corrente lenta) dipendono dalle alternanze dei tipi di risalti. In altri termini è possibile asserire che i fenomeni alternativi sono responsabili della generazione di piccole onde nella zona a valle del risalto idraulico. È evidente, allora, che in tale regione il campo di moto è influenzato dal profilo di superficie. Questa considerazione in effetti è di una certa importanza poiché è noto che la zona a valle di un risalto idraulico (zona di transizione secondo Ortiz, 1982) è sede di una macroturbolenza residua che tende a dissolversi solo a partire da una certa sezione dove si può ritenere ristabilito il moto uniforme.

Il confronto degli spettri relativi alle serie storiche acquisite a 10 Hz con gli

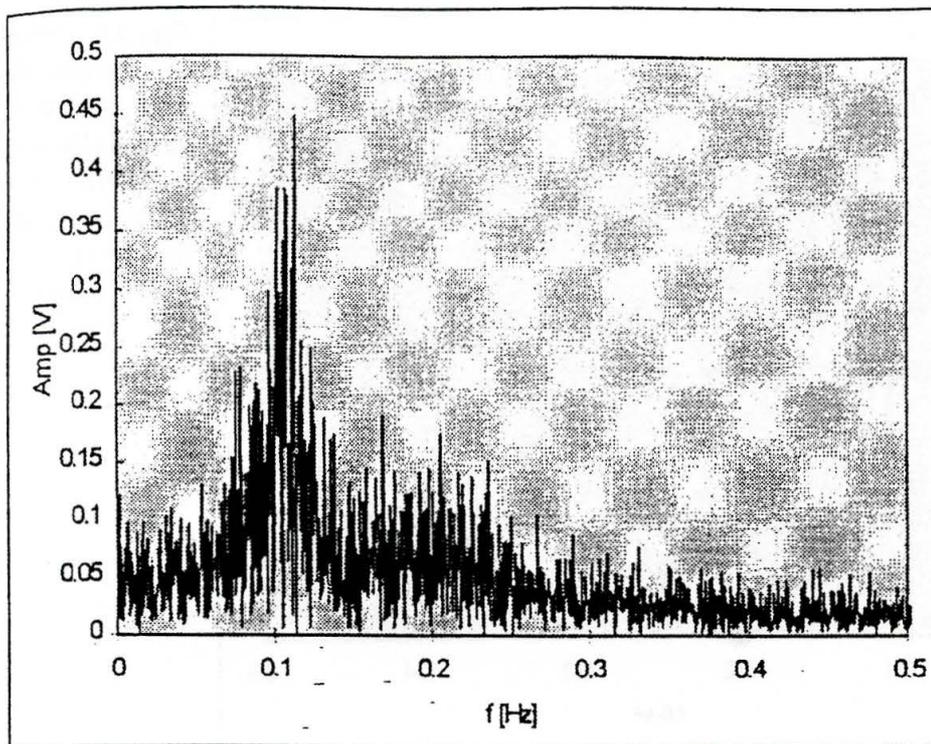


Fig. 8 - Spettro di ampiezza della serie storica rilevata dalla sonda di monte (configurazione: 2G2; frequenza di acquisizione: 10 Hz)

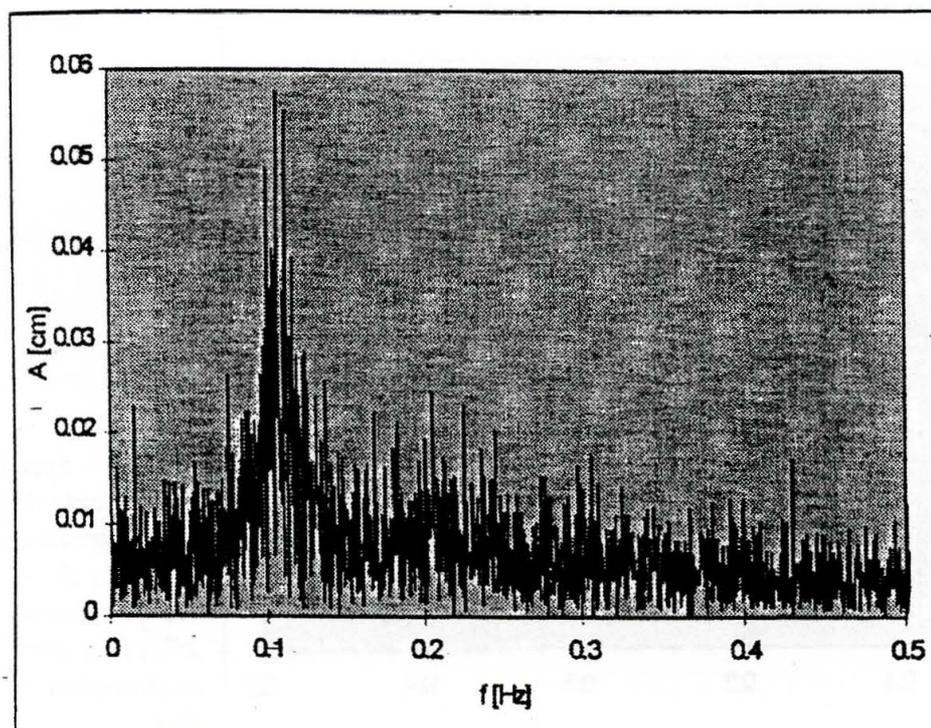


Fig. 9 - Spettro di ampiezza della serie rilevata dalla sonda di valle (configurazione: 2G2; frequenza di acquisizione: 10Hz)

spettri delle medesime serie storiche acquisite a 50 Hz non ha evidenziato sostanziali modifiche. Quest'ultima conclusione è estendibile a tutte le configurazioni analizzate e, pertanto, nel seguito non si proporranno ulteriori confronti tra spettri relativi a diverse frequenze di acquisizione.

Nelle figure 12÷15 si riportano gli spettri delle serie storiche acquisite con le sonde di monte e di valle per le configurazioni 3G2 e 4G2 di tabella 1. Dalle figure richiamate e dall'analisi dei medesimi spettri relativi alla configurazione

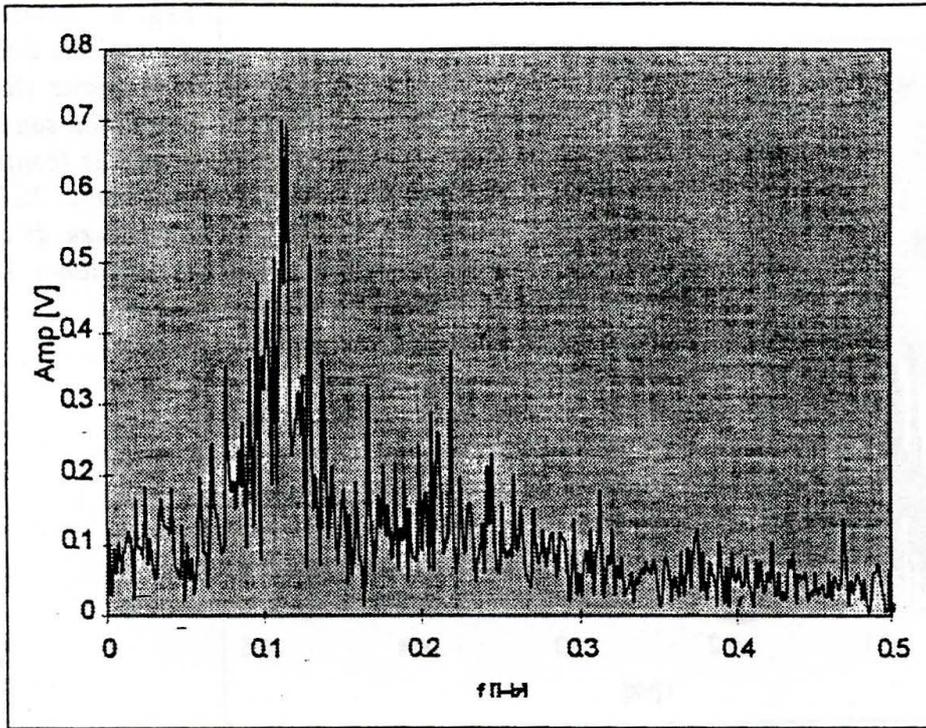


Fig. 10 - Spettro di ampiezze della serie storica rilevata dalla sonda di monte (configurazione: 2G2; frequenza di acquisizione: 50 Hz)

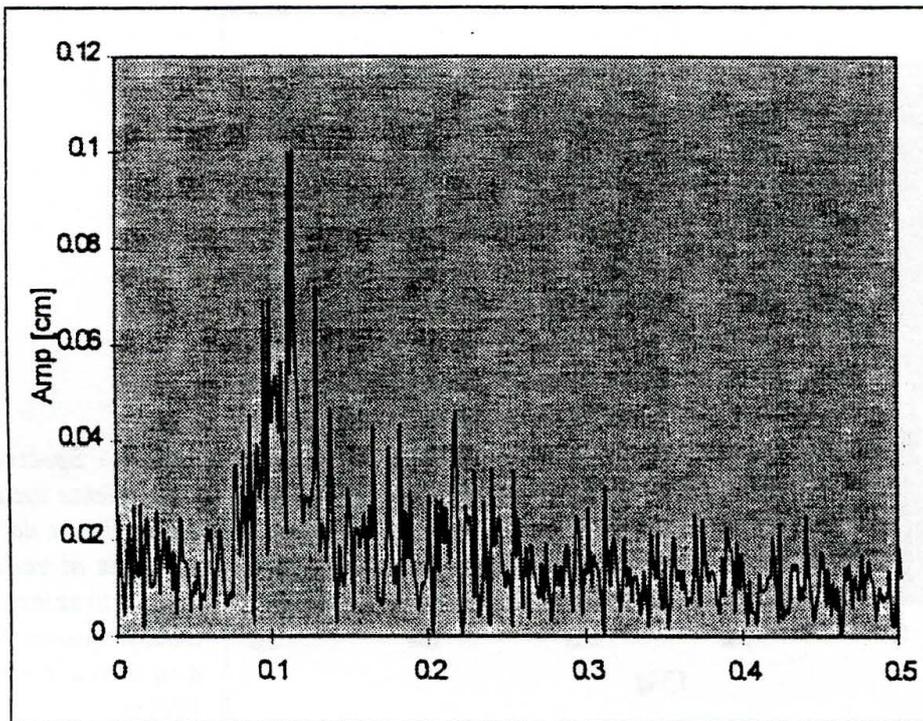


Fig. 11 - Spettro di ampiezze della serie rilevata dalla sonda di valle (configurazione: 2G2; frequenza di acquisizione: 50 Hz)

1G2 (non riportati per brevità) è possibile evincere le stesse conclusioni precedentemente riportate.

Si può pertanto concludere che le oscillazioni avvengono con una certa regolarità temporale. Inoltre, si ritiene che esse siano responsabili delle maggiori fluttuazioni del pelo libero a valle del risalto idraulico.

È importante rimarcare, dunque, non solo la possibilità che le alternanze cicliche dei tipi di risalti possano instaurarsi anche quando il fondo del canale

sia fisso, ma anche una quasi periodicità del fenomeno. In effetti l'analisi nel dominio delle frequenze ha messo in evidenza l'esistenza di una scala temporale ben definita del fenomeno analizzato.

5.2. Oscillazioni tra risalto ad onda e risalto di tipo A

In figura 16 si riporta lo spettro delle ampiezze della sonda di monte per la configurazione 7G2 di tabella 1. Dalla figura si nota che, anche in questo caso, le

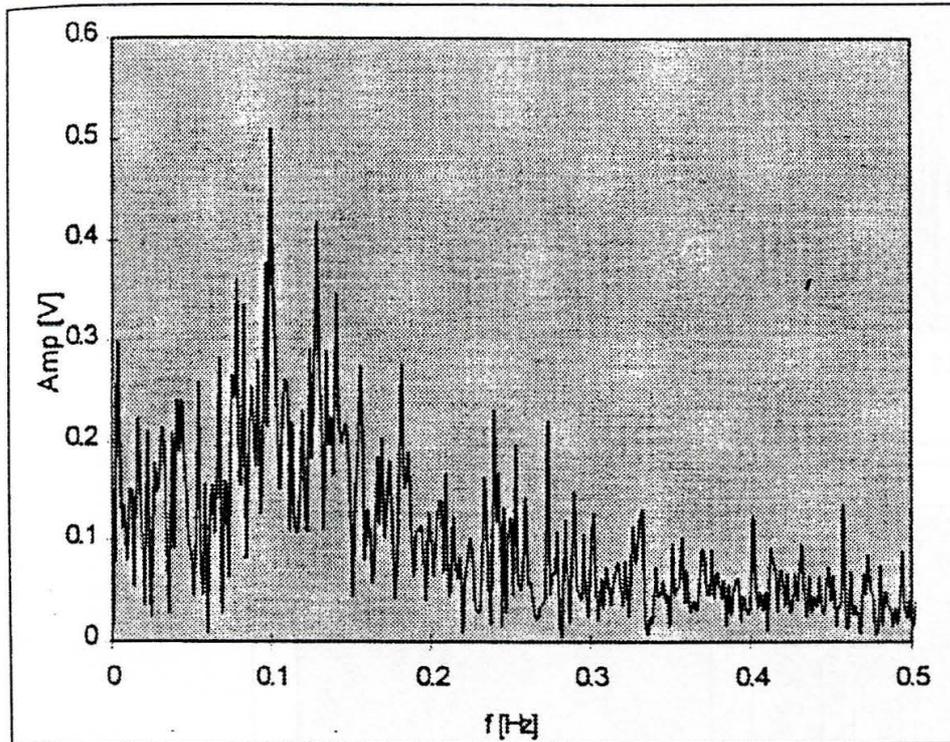


Fig. 12 - Spettro di ampiezze della serie rilevata dalla sonda di monte (configurazione: 3G2; frequenza di acquisizione: 50 Hz)

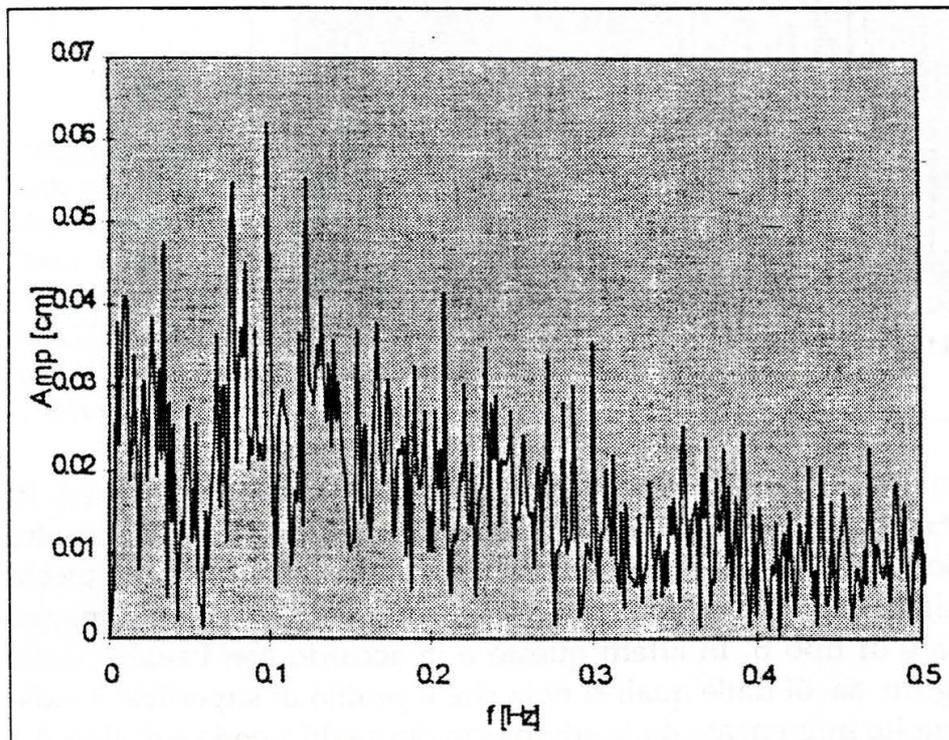


Fig. 13 - Spettro di ampiezze della serie storica rilevata dalla sonda di valle (configurazione: 3G2; frequenza di acquisizione: 50 Hz)

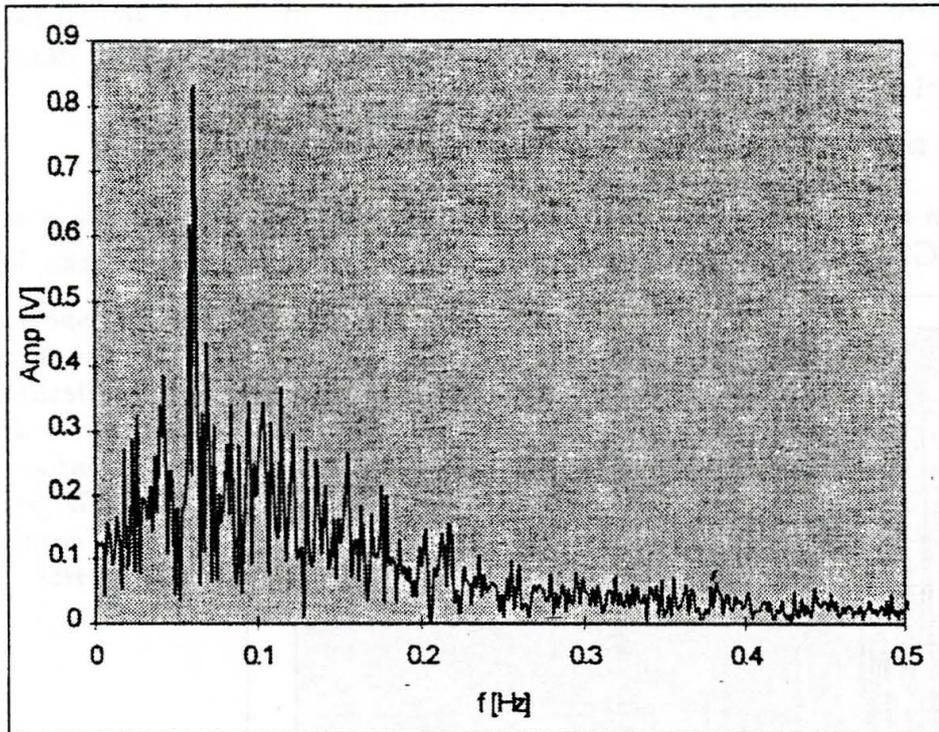


Fig. 14 - Spettro di ampiezze della serie storica rilevata dalla sonda di monte (configurazione: 4G2; frequenza di acquisizione: 50 Hz)

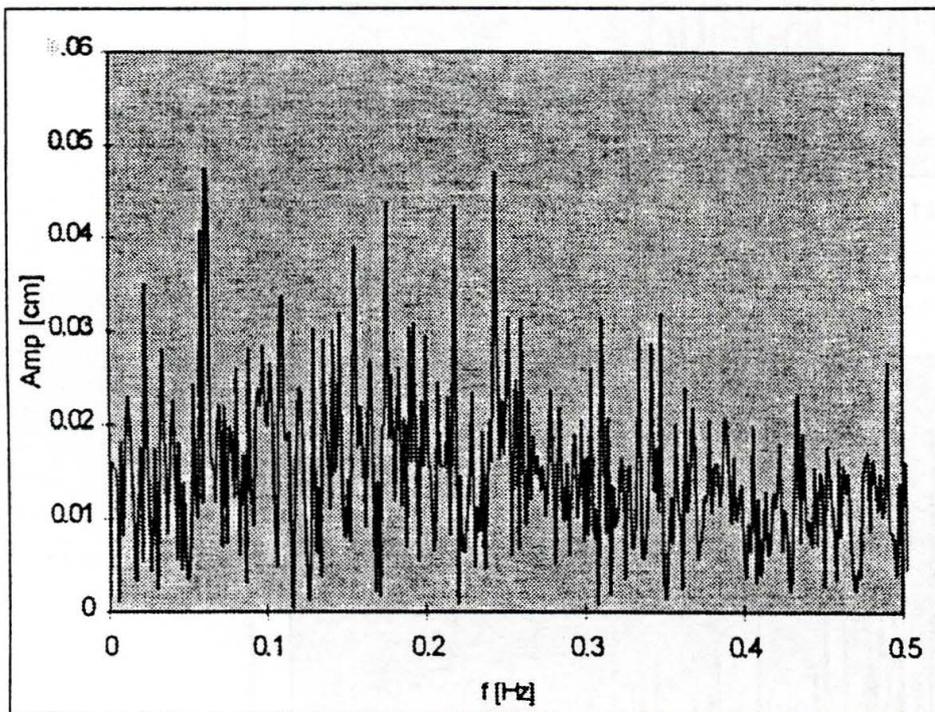


Fig. 15 - Spettro di ampiezze della serie storica rilevata dalla sonda di valle (configurazione: 4G2; frequenza di acquisizione: 50 Hz)

alternanze tra i due tipi di risalti sono caratterizzate da una quasi periodicità. In figura 17 si riporta lo spettro del profilo di superficie rilevato a valle del risalto per la configurazione 7G2. Come si evince dalla figura non si sono rilevati picchi particolarmente significativi come nel caso delle configurazioni con alternanze tra risalti ad onda e di tipo B. In effetti questo è in accordo con l'analisi delle immagini delle figure 6a-6f dalle quali si nota che il profilo di superficie a valle del roller non è molto influenzato dalle alternanze dei risalti a onda e di tipo A.

5.3. Oscillazioni del piede del risalto di tipo A

L'analisi delle immagini delle figure 7a÷7h ha messo in evidenza l'esistenza di fenomeni alternativi anche per le configurazioni caratterizzate da una tipologia stabile di risalto. In questo caso i fenomeni alternativi macroscopicamente visibili, sia pure con l'ausilio di una videocamera, consistevano nelle fluttuazioni del piede del risalto. In figura 18 si riporta una serie storica delle posizioni del

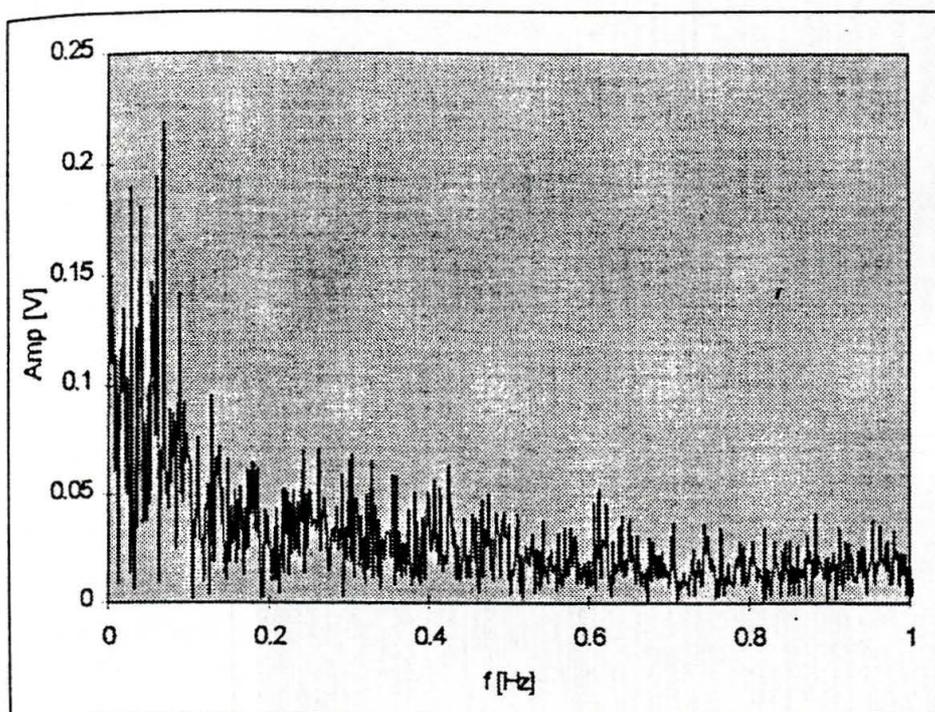


Fig. 16 - Spettro di ampiezze della serie storica rilevata dalla sonda di monte (configurazione: 7G2; frequenza di acquisizione: 50 Hz)

piede del risalto 19G1 di tabella 1, valutate a partire dalla paratoia di monte. La serie è stata rilevata mediante un'analisi rallentata delle immagini del risalto con l'uso di un videoregistratore. Il sistema PAL utilizzato ha consentito di analizzare le immagini con un intervallo temporale minimo di 0.04 s. Dall'analisi qualitativa della serie storica di figura 18 è possibile notare l'esistenza di un periodo medio di oscillazione del piede.

Le conclusioni riportate in questo paragrafo sono in accordo con i lavori di Long et al. (1991) e di Habib et al. (1994a-b-c), che condussero ricerche analoghe per i risalti in canali a sezione rettangolare a fondo piano.

Pertanto, anche per le configurazioni che presentano un unico tipo di risalto è possibile parlare di fenomeni alternativi, anche se difficilmente visibili senza l'ausilio di una videocamera.

Come già detto, nel caso della configurazione analizzata nel presente paragrafo, i fenomeni alternativi consistono nelle fluttuazioni del piede del risalto. In particolare, anche per la configurazione 19G1 è possibile rilevare delle strutture a grande scala, le cui caratteristiche (formazione, evoluzione e coalescenza) si ripetono sincronicamente con le oscillazioni del piede. Si ritiene che tali fenomeni siano particolarmente significativi per le caratteristiche della turbolenza nella zona del roller e in quella immediatamente a valle del risalto.

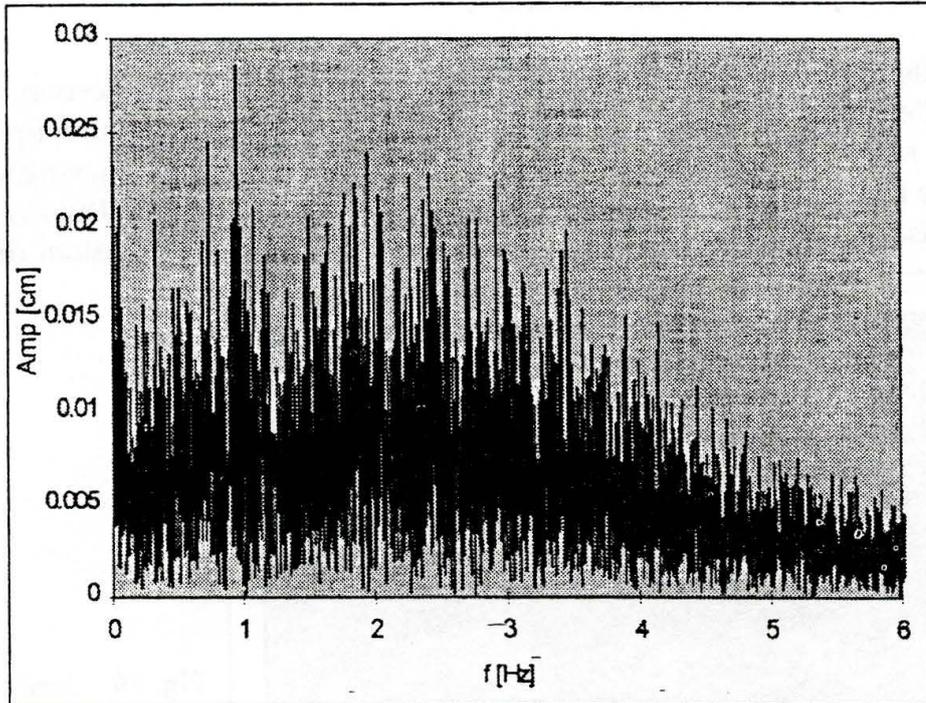


Fig. 17 - Spettro di ampiezze della serie storica rilevata dalla sonda di valle (configurazione: 7G2; frequenza di acquisizione: 50 Hz)

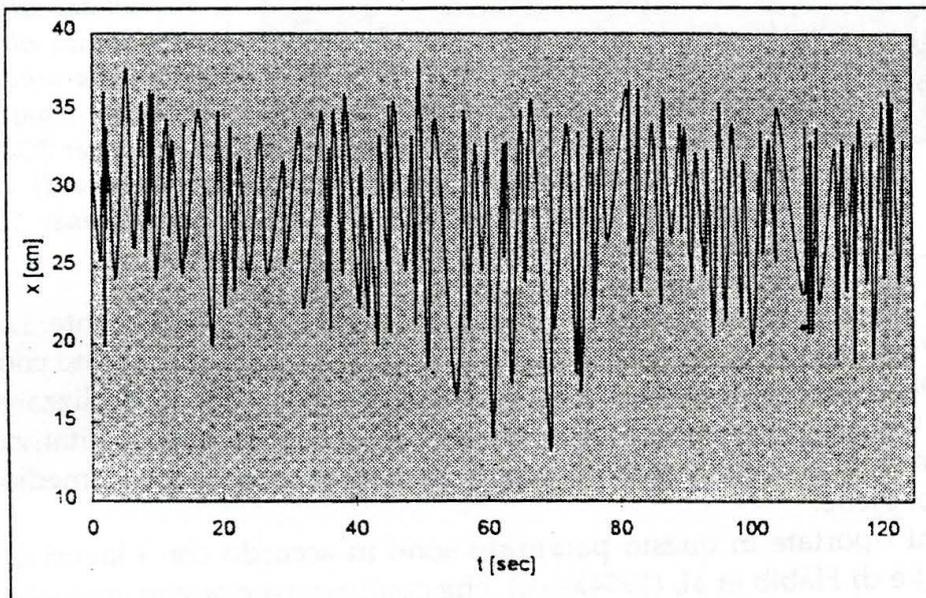


Fig. 18 - Serie storica delle fluttuazioni del piede del risalto 19G1

6. Discussione dei risultati

Dall'analisi precedentemente condotta, è possibile ipotizzare una causa comune per tutti i fenomeni alternativi di cui si è discusso, riconoscendone l'esistenza nelle diverse configurazioni analizzate. In altri termini è possibile ipotizzare che i fenomeni alternativi analizzati in precedenza (le oscillazioni dei tipi di risalti idraulici o le oscillazioni del piede degli stessi) siano l'effetto macroscopico di un comune scenario.

Nebbia (1942) diede una possibile spiegazione dei fenomeni alternativi (intesi come oscillazioni dei tipi di risalti) riferiti al caso di un fondo fisso modellato alla stregua del fondo sabbioso in condizioni di equilibrio di escava-

zione. L'analisi di Nebbia (1942) parte da un presupposto di base: stabilito che la quantità di moto a valle del risalto dipenda dalle condizioni di valle e quella di monte dalle condizioni idrodinamiche della sezione di efflusso nel canale, si ritiene che esistano delle situazioni per le quali l'azione di trascinamento, posta ad equilibrio delle due quantità di moto, possa essere realizzata da una o più configurazioni di risalto, alcune per le quali essa è univocamente stabilita da una sola configurazione ed altre che non consentono alcuna configurazione. In quest'ultima ipotesi l'autore ritiene che il moto non possa più essere stazionario e che per l'equazione dell'equilibrio dinamico nasca l'esigenza di aggiungere dei termini che rappresentino le inerzie locali e il flusso di quantità di moto attraverso la superficie libera del tronco di corrente analizzato. L'analisi dell'autore porta a concludere che i termini aggiuntivi siano una funzione del tempo. Partendo dal presupposto che per le configurazioni con alternanza di tipi di risalti non possa instaurarsi una vena stazionaria, i termini dipendenti dal tempo non possono tendere verso valori finiti (condizione questa per la stazionarietà), né possono crescere o diminuire indefinitamente. La conclusione a cui si perviene, pertanto, è che questi termini debbano oscillare intorno ad un valore finito. Per quanto le valutazioni dell'autore siano accettabili qualitativamente, esse non sembrano chiarire la ragione di una variabilità temporale caratterizzata da una quasi periodicità. In altri termini rimane aperto il quesito circa la ragione intima di una variabilità caratterizzata da una scala temporale che assume i connotati di un periodo, come le indagini condotte nell'ambito di questo studio hanno messo in evidenza. Inoltre, si deve osservare che le analisi di Nebbia darebbero ragione dei fenomeni alternativi descritti nei par. 5.1 e 5.2 ma non del fenomeno di oscillazione del piede di un risalto idraulico, che si è descritto nel par. 5.3, pure esso caratterizzato da un periodo medio. Tra l'altro lo stesso autore, a cui va riconosciuto il merito di aver impostato il problema, ritiene che quella indicata sia un'interpretazione a carattere puramente qualitativo, osservando che le equazioni proposte "lasciano indeterminato il problema" e che "l'argomento richiede ancora il contributo di molte indagini teoriche e di ricerche sperimentali".

Si ritiene che i fenomeni alternativi evidenziati in questo lavoro possano essere analizzati alla luce delle seguenti considerazioni. Un risalto idraulico è costituito da una miscela di acqua ed aria. Pertanto le caratteristiche del campo di moto sono legate alla concentrazione di aria presente istantaneamente nell'ambito del risalto e alle sue evoluzioni temporali. Rajaratnam (1962) osservava che la concentrazione massima di aria in un risalto idraulico dipende dal numero di Froude della corrente di monte. Studi sull'argomento sono stati condotti da molti autori (Wood, 1991; Chanson, 1996; Mossa e Tolve, 1996). In particolare, appare interessante il lavoro di Longuet-Higgins (1973) sui modelli di separazione dei flussi a superficie libera. Non si intende in questa occasione entrare nello specifico di quel lavoro, ma pare interessante mettere in evidenza che dallo stesso è possibile rilevare come la pendenza della superficie libera del roller sia funzione della concentrazione di aria esistente in ogni istante di tempo. Long et al. (1991) e Habib et al. (1994a-b-c) hanno messo in evidenza che

le fluttuazioni del piede di un risalto idraulico sono connesse con una trasformazione ciclica delle strutture vorticosi che ora appaiono in numero elevato (quando il piede è nella sua massima posizione di monte) ora in numero ridotto (quando il piede è nella sua massima posizione di valle), a riprova di un processo di coalescenza dei vortici stessi. Le due posizioni estreme precedentemente ricordate sono anche accompagnate da due diverse pendenze del profilo di superficie del roller che nel caso in cui esso è nella massima posizione di monte, è particolarmente dolce e, viceversa, appare notevole nel caso di massima posizione di valle. Si osserva che delle pendenze più elevate del profilo di superficie del roller comporterebbero, secondo la teoria di Longuet-Higgins (1973), una maggiore concentrazione di aria nel roller. I risultati del modello proposto da Longuet-Higgins (1973) possono essere confrontati con le conclusioni di alcune indagini sperimentali. In particolare, Long et al. (1991) e Habib et al. (1994a-b-c) misero in evidenza che, quando il piede di un risalto è nella sua massima posizione di valle, è visibile un grosso vortice. È presumibile, allora, che quest'ultimo, formatosi dalla fusione di altri di dimensioni minori, abbia una maggiore concentrazione di aria; inoltre il profilo di superficie, nel caso in analisi, appare particolarmente acclive. Viceversa, quando il piede del risalto è nella sua massima posizione di monte, sono visibili più vortici e il profilo di superficie presenta una pendenza più dolce.

Si può concludere, pertanto, che le caratteristiche del profilo di superficie sono in stretta relazione con la concentrazione di aria presente in un risalto idraulico, in accordo sia con le rilevanzze sperimentali (Long et al., 1991; Habib et al., 1994a-b-c; Mossa e Tolve, 1996) che con taluni modelli presenti in letteratura (Longuet-Higgins, 1973; Hoyt e Sellin, 1989).

Pertanto, è possibile ipotizzare che i fenomeni alternativi tipici dei risalti idraulici siano legati alla presenza di aria e alla sua concentrazione variabile nel tempo. È evidente che la concentrazione di aria presente nell'ambito di un risalto idraulico è a sua volta connessa con le strutture vorticosi che costituiscono il roller. I vortici presenti in esso seguono delle evoluzioni che sono state messe in evidenza da alcuni autori. In particolare, Long et al. (1991) analizzarono le strutture a larga scala attraverso l'uso di una videocamera ad alta velocità. L'analisi rallentata delle immagini ha consentito di rilevare come i vortici presenti all'interno di un risalto idraulico non fossero in numero costante nel tempo, poiché essi tendono a fondersi l'un con l'altro a formare vortici di dimensione maggiore. Un processo analogo è quello osservato per gli strati di mescolamento da Winant e Browand (1974). Non appena il vortice di dimensioni maggiori si formava, esso tendeva a spostarsi verso valle con conseguente analogo spostamento del piede del risalto. La conclusione di Long et al. (1991), dunque, era che il piede del risalto fluttua in funzione delle formazioni dei vortici e del loro processo di coalescenza. Tali considerazioni avallano le ipotesi formulate in precedenza circa una relazione tra i vortici e la concentrazione di aria e, dunque, il profilo di superficie del roller (Longuet-Higgins, 1973; Hoyt e Sellin, 1989).

Per quanto riguarda la quasi periodicità dei fenomeni alternativi, è possibile

inquadrate lo scenario nell'ambito dell'analisi delle strutture coerenti della turbolenza. È noto infatti che in un flusso turbolento è possibile rilevare delle strutture che presentano una regolarità di apparizione e di comportamento che parrebbe a prima vista in forte contrasto con le classiche teorie della turbolenza secondo le quali essa è costituita da strutture del tutto disordinate e random.

Hugh Dryden nell'analizzare molti lavori sulla turbolenza asserì: "È necessario separare i processi random da quelli non random. Non è ancora completamente chiaro quali siano gli elementi random nella turbolenza" (Roshko, 1976). Roshko completò l'affermazione osservando che "non sono chiari neanche quali siano gli elementi non random", sebbene alcuni di questi siano stati riconosciuti e descritti. Generalmente si assume che la turbolenza sia caratterizzata da uno scenario di completo disordine. In realtà le esperienze condotte da un numero sempre maggiore di autori ha messo in evidenza l'esistenza di un moto organizzato sovrapposto alla turbolenza intesa come moto disordinato. In altri termini appare ormai inconfutabile che i flussi turbolenti contengano strutture o eddies la cui descrizione è più deterministica di quanto ci si possa attendere, possedendo caratteristiche ben identificabili che persistono nel tempo provocando eventi di indubbia importanza. L'analisi di Roshko (1976), condotta sugli strati di mescolamento, permise all'autore di osservare l'esistenza di strutture organizzate, le cui scale aumentano con la distanza dalla zona di generazione. In effetti è da attendersi, dalla proprietà generale di similitudine dei flussi, che le scale medie siano proporzionali alla distanza dall'origine. A tal riguardo si richiamano le immagini delle figure 7a÷7h, dalle quali è evidente l'esistenza di strutture vorticosi che costituiscono una sorta di treccia molto simile a quella rilevata da Roshko per gli strati di mescolamento. Roshko estese le conclusioni ricavate dall'analisi degli strati di mescolamento al caso di altri flussi. L'autore osserva che, sebbene le strutture organizzate non siano così ben evidenti negli altri flussi, è indubbia la loro esistenza. In particolare si faccia riferimento alle scie e agli strati limiti turbolenti. Anche per questi flussi le rilevazioni sperimentali hanno evidenziato un moto organizzato e periodico sovrapposto ad uno scenario turbolento caratterizzato da disordine e casualità. A tal riguardo Roshko (1976) si riferisce anche alle strutture organizzate visibili in prossimità del core a potenziale di un getto e alle oscillazioni visibili in un flusso turbolento su una cavità. Quest'ultima osservazione sembra di particolare interesse per il caso dei risalti idraulici. Studi di particolare interesse sulle caratteristiche della turbolenza in un risalto idraulico furono condotti da Yeh e Mok (1990) usando una tecnica LIF (Laser-Induced Fluorescent technique).

Ad avallare le considerazioni precedentemente riportate, si ritiene particolarmente significativo lo studio di Hoyt e Sellin (1989). Nell'ambito di quel lavoro gli autori misero in evidenza che un risalto idraulico con un numero di Froude di monte sufficientemente elevato dà luogo ad una zona superficiale con bollicine d'aria che muovono scivolando verso il flusso di monte. Si è già detto che per gli strati di mescolamento l'attuale approccio della ricerca è indirizzato all'analisi delle strutture a larga scala, che per la prima volta furono osservate nelle belle foto di Brown e Roshko (1974). Si è visto che gli strati di

mescolamento tra elio e azoto, caratterizzati da valori di densità secondo un rapporto uguale a 7 circa, producono strutture coerenti, che sono all'origine della maggior parte dell'azione di mescolamento.

Lo scopo della memoria di Hoyt e Sellin (1989) è quello di mostrare che un risalto idraulico può anche essere interpretato come uno strato di mescolamento tra acqua ed aria (con rapporto di densità uguale a 800 circa), con proprie strutture coerenti di cui è nota una certa periodicità nelle caratteristiche idrodinamiche. Gli autori condussero i propri studi in un canale di lunghezza 4 m e larghezza 105 mm su tre risalti idraulici caratterizzati da numeri di Froude di monte uguali, rispettivamente, a 2.5, 3 e 3.5. Al fine di una migliore visualizzazione e controllo delle strutture coerenti, gli autori introdussero nell'acqua un certo quantitativo di polimeri, verificando che le altezze iniziali e finali del risalto non risentissero troppo della loro presenza. Gli autori riportano i tipici andamenti delle strutture coerenti al variare del numero di Froude, da cui appare evidente il processo di crescita, rotazione e intersezione delle strutture vorticose. Le strutture possono essere meglio apprezzate confrontandole con quelle degli strati di mescolamento di aeriformi, dove esse sono più evidenti. Sebbene le foto relative ai gas mostrino un maggior numero di dettagli, l'assomiglianza tra questi strati di mescolamento e il risalto idraulico sembra notevole. Gli autori, pertanto, suggeriscono di considerare il risalto idraulico come un esempio limite di strato di mescolamento tra un fluido più pesante e più veloce (l'acqua appunto) ed uno più leggero e più lento (l'aria). I risultati riportati nel presente lavoro avallano le ipotesi avanzate da Hoyt e Sellin (1989). Il concetto esposto è nuovo e, come ritengono gli stessi autori, più razionale dei modelli presentati in precedenza.

Il concetto di strato di mescolamento, d'altra parte, offre un tipo di modello particolarmente utile. Il modello si basa sugli studi sull'intrusione negli strati di taglio (shear layers) fra i quali si ricorda quello di Dimotakis (1986). Lo sviluppo iniziale dello strato di mescolamento o di taglio è legato alla formazione di vortici caratterizzati da una definita scala di frequenza. Tali vortici presentano una larghezza limitata e sono seguiti da una serie di altri vortici adiacenti caratterizzati dalla stessa frequenza, anche se da fase diversa. Essi, poi, tendono ad intrecciarsi tra loro. La dinamica precedentemente descritta sembra adattarsi molto bene alle immagini delle figure 7a-7h. Hoyt e Sellin (1989), inoltre, osservano che l'analogia di un risalto idraulico con uno strato di mescolamento offre una buona stima del volume di aria introdottasi nel risalto. È da rimarcare, dunque, che, in accordo con quanto proposto in precedenza, anche Hoyt e Sellin pongono una certa attenzione alla valutazione del processo di intrusione dell'aria (air entrainment).

Altra similitudine tra flussi di strati di mescolamento e i risalti idraulici è la seguente: negli strati di mescolamento la dinamica dipende dalle condizioni iniziali che possono essere di flusso laminare o turbolento; in un risalto idraulico, come è stato rilevato sperimentalmente (Leutheusser e Kartha, 1972; Leutheusser e Alemu, 1979), alcune grandezze caratteristiche dipendono dalle condizioni di sviluppo della corrente a monte.

7. Conclusioni

Nel presente lavoro si riporta un'analisi dei fenomeni alternativi tipici di un risalto idraulico. In letteratura pochi autori fanno menzione di tali fenomeni, pur essendo stati osservati con una certa regolarità in diverse condizioni sperimentali.

Le conclusioni che attualmente si possono ricavare sono le seguenti:

- Le alternanze dei tipi di risalti idraulici osservati nel caso di fondo non piano non dipendono dal fatto che questo sia in materiale fisso o erodibile. Esse si presentano comunque quando le condizioni idrodinamiche tipiche della configurazione analizzata sono a cavallo tra due o più configurazioni stabili.
- Le fluttuazioni del piede di un risalto idraulico in un canale rettilineo di sezione rettangolare con fondo fisso, analizzate nell'ambito di altri studi, possono essere considerate come facenti parte di una classe di fenomeni a cui appartengono le oscillazioni dei tipi di risalti idraulici.
- I fenomeni alternativi sono accompagnati da configurazioni, pure esse variabili, del profilo di superficie di un risalto idraulico che è funzione della concentrazione di aria presente nel roller. Si ritiene pertanto che i fenomeni alternativi debbano essere analizzati considerando il flusso di un risalto nella sua reale configurazione di miscela aria-acqua dalla quale non è possibile prescindere. In altri termini i fenomeni di intrusione di aria (air entrainment) e rilascio della stessa (air detrainment) sono fondamentali per l'analisi del risalto idraulico e delle strutture vorticosi che lo costituiscono. Le normali fluttuazioni di concentrazioni di aria presente nel roller sono responsabili delle diverse configurazioni del profilo di superficie del risalto con conseguenti spostamenti del piede dello stesso e finanche, nel caso di configurazioni di fondo non piane, di alternanze di tipi.
- I fenomeni alternativi analizzati presentano una certa regolarità di apparizione. È cioè possibile definire un'appropriata scala temporale sia per le oscillazioni dei tipi di risalti che per le fluttuazioni dei piedi dei risalti su fondo piano o profilato. Le diverse oscillazioni in parola sono responsabili delle variazioni di alcune caratteristiche del campo di moto, come il profilo di superficie del pelo libero nella zona di valle del risalto, delle componenti di velocità e della turbolenza nella medesima zona (Habib et al., 1994a-b-c).
- Analizzando un singolo ciclo dei fenomeni alternativi è stato sempre possibile evidenziare la loro correlazione con le strutture vorticosi del roller di un risalto. Tali strutture erano presenti in numero e forma dipendente dal particolare istante del ciclo analizzato.
- La regolarità delle alternanze analizzate nell'ambito di questo studio si presenta come uno scenario ordinato sovrapposto ad uno sfondo rappresentato dalla turbolenza intesa nel senso classico come moto disordinato e random.
- L'analisi condotta sulle strutture vorticosi presenti nei risalti idraulici (Hoyt e Sellin, 1989; Long et al., 1991; Habib et al., 1994a-b-c; Mossa e Tolve, 1996) ha permesso di evidenziare che per essi si possono applicare le conclusioni

che alcuni autori hanno proposto per gli strati di mescolamento. Gli studi in menzione hanno evidenziato come in tali flussi sia possibile individuare una periodicità di formazione, intrecciatura e coalescenza dei vortici. In tutti questi fenomeni appariva fondamentale l'analisi dei processi di mescolamento (mixing) e di intrusione (entrainment). Inoltre, era sempre possibile definire una scala temporale che rappresentasse la periodicità dei fenomeni di formazione, evoluzione e coalescenza dei vortici.

L'analisi dei campi di moto attraverso le moderne tecniche di visualizzazione incoraggia a proseguire gli studi condotti finora, indirizzandoli all'analisi delle strutture coerenti della turbolenza. È auspicabile un ulteriore approfondimento dello studio avviato, al fine di verificare l'esistenza di uno scenario ordinato proprio di queste strutture anche per quelle configurazioni di risalto che non presentano dei fenomeni alternativi macroscopicamente visibili, ma per i quali, alla luce delle analogie esistenti con altri flussi, è possibile, per quanto complicato, carpire l'esistenza di strutture ordinate caratterizzate da una ben definita scala temporale di apparizione ed evoluzione.

Bibliografia

- [1] Abdel Ghafar A., Mossa M., Petrillo A. (1995), Scour from flow downstream of a sluice gate after a horizontal apron, Sixth International Symposium on River Sedimentation, New Delhi, pp. 1069-1088.
- [2] Bakhmeteff B. A., Matzke A. E. (1936), The hydraulic jump in terms of dynamic similarity, Transaction, ASCE, vol. 101, paper no. 1935, pp. 630-680.
- [3] Brown G., Roshko A. (1971), The effect of density difference on the turbulent mixing layer, Proc., AGARD Specialist Meeting on Turbulent Shear Flows, Advisory Group for Aeronautical Research and Development, London, England.
- [4] Brown G. L., Roshko A. (1974), On density effects and large structure in turbulent mixing layers, Journal of Fluid Mechanics, vol. 64, pp. 775-816.
- [5] Chanson H. (1996), Air bubble entrainment in free-surface turbulent shear flows, Academic Press, San Diego, California.
- [6] Chow V. T. (1959), Open channel hydraulics, McGraw-Hill, Singapore.
- [7] Citrini D. (1939), Il salto di Bidone, L'Energia Elettrica, giugno e luglio.
- [8] Dimotakis P. E., (1986), Two-dimensional shear-layer entrainment, AIAA Journal, vol. 24, no. 11.
- [9] Di Santo A., Petrillo A., Piccinni A. F. (1990), Sulla stabilità delle protezioni del fondo dei bacini di dissipazione a risalto: indagine sperimentale preliminare, Giornale del Genio Civile, fasc. 4°-5°-6°.
- [10] Di Santo A., Petrillo A., Piccinni A. F. (1995), Experimental studies on the stability of lining slabs in hydraulic jump stilling basins, Excerpta, Vol. 9, G.N.I., CUEN.
- [11] Engelund F. (1981), A simple theory of weak hydraulic jumps, Prog. Rep. 54, August, Inst. Hydrodyn. and Hydralic Engrg., Tech. Univ. Denmark, pp. 29-32.
- [12] Farhoudi J., Narayanan R. (1989), Force on slab beneath hydraulic jump, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, vol. 117, no. 1.
- [13] Fassò C. A. (1970), Relazione generale sul tema "Dissipazioni di energia", XII Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche, Istituto di Idraulica-Facoltà di Ingegneria, Università di Bari, 23-25 ottobre, pp. 55-69.

- [14] Fiorotto V., Rinaldo A. (1988), Sul dimensionamento delle protezioni di fondo dei bacini di dissipazione: nuovi risultati teorici e sperimentali, *Giornale del Genio Civile*, fascicolo 7-8-9.
- [15] Fiorotto V. (1991), Analisi sperimentale delle azioni dinamiche su lastre piane al fondo di un risalto idraulico, *Giornale del Genio Civile*, no. 1-2-3, pp. 13-26.
- [16] Fiorotto V., Rinaldo A. (1992), Turbulent pressure fluctuations under hydraulic jump, *Journal of Hydraulic Research, IAHR*, vol. 30, no. 4.
- [17] Gardiner S. R. M., Hay D. (1982), Dynamic force measurement on stilling basin floor and sidewalls, *International Conference on the Hydraulic Modelling of Civil Engineering Structures, BHRA Fluid Engineering, Coventry, England, Paper C4*.
- [18] Gioia G., Petrillo A., Vitale A. (1976), Influenza dello stato cinematico nella sezione iniziale del risalto idraulico sul profilo della vena liquida e sulla lunghezza del risalto, *Università di Ancona, Facoltà di Ingegneria - Istituto di Idraulica*.
- [19] Gioia G., Petrillo A., Vitale A. (1979a), Indagine sperimentale sulle sollecitazioni al fondo del risalto idraulico, *Idrotecnica*, no. 5.
- [20] Gioia G., Petrillo A., Vitale A. (1979b), Agitazione turbolenta nella sezione iniziale del risalto idraulico, *Idrotecnica*, no. 6.
- [21] Habib E., Mōssa M., Petrillo A. (1994a), Scour downstream of hydraulic jump, *Proceedings of the International Symposium East-West, North-South Encounter on the State-of-the-art in River Engineering Methods and Design Philosophies, 16-20 May 1994, St. Petersburg, Russia, vol. I, pp. 357-370*.
- [22] Habib E., Mossa M., Petrillo A. (1994b), Scour downstream of hydraulic jump, *Modelling, Testing & Monitoring for Hydro Powerplants Conference, The International Journal on Hydropower & Dams, Budapest, Hungary, July 1994, pp. 591-602*.
- [23] Habib E., Mossa M., Petrillo A. (1994c), Indagine sperimentale sull'escavazione in un canale a fondo mobile posto a valle di un risalto idraulico, *XXIV Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche, Napoli, 20-22 Settembre, vol. II, pp. T4 25-36*.
- [24] Hager W. H., Hutter K. (1983), Approximate treatment of the plane hydraulic jump with separation zone above the flow zone, *Journal of Hydraulic Research, IAHR*, vol. 21, no. 3.
- [25] Hager W. H. (1985), B-jumps at abrupt channel drops, *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, vol. 111, no. 5, pp. 861-866.
- [26] Hager W. H., Sinniger R. (1985), Flow characteristics of the hydraulic jump in a stilling basin with an abrupt bottom rise, *Journal of Hydraulic Research, IAHR*, vol. 23, no. 2.
- [27] Hager W. H., Bretz N. V. (1986), Hydraulic jumps at positive and negative steps, *Journal of Hydraulic Research, IAHR*, vol. 24, no. 4, pp. 237-252.
- [28] Hager W. H., Bremen R. (1989), Classical hydraulic jump: sequent depths, *Journal of Hydraulic Research, IAHR*, vol. 27, no. 5.
- [29] Hager W. H., Bremen R., Kawagoshi N. (1990), Classic hydraulic jump: length of roller, *Journal of Hydraulic Research, IAHR*, vol. 28, no. 5.
- [30] Hornung H. G., Willert C., Turner S. (1995), The flow field downstream of a hydraulic jump, *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 287.
- [31] Hoyt J. W., Sellin R. H. J. (1989), Hydraulic jump as "mixing layer", *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, vol. 115, no. 12, 1607-1614.
- [32] Humphrey J. A. C., Li S. (1981), Tilting, stretching, pairing and collapse of vortex structures in confined counter-current flow, *Journal of Fluids Engineering, ASME*, vol. 103.
- [33] Leutheusser H. J., Kartha V. C. (1972), Effects of inflow condition on hydraulic jump, *Journal of the Hydraulics Division, ASCE*, vol. 98, no. HY8.

- [34] Leutheusser H. J., Alemu S. (1979), Flow separation under hydraulic jump, *Journal of Hydraulic Research, IAHR*, vol. 17, no. 3.
- [35] Long D., Steffler P. M., Rajaratnam N. (1990), LDA study of flow structure in submerged hydraulic jump, *Journal of Hydraulic Research, IAHR*, vol. 28, no. 4.
- [36] Long D., Rajaratnam N., Steffler P. M., Smy P. R. (1991), Structure of flow in hydraulic jumps, *Journal of Hydraulic Research, IAHR*, vol. 29, no. 2, pp. 207-218.
- [37] Longuet-Higgins M. S. (1973), A model of flow separation at a free surface, *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 57, parte 1, pp. 129-148.
- [38] Longuet-Higgins M. S. (1992), Capillary rollers and bores, *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 240, pp. 659-679.
- [39] Lopardo R. A., De Lio J. C., Vernet G. F. (1982), Physical modelling on cavitation tendency for macroturbulence of hydraulic jump, *International Conference on the Hydraulic Modelling of Civil Engineering Structures, BHRA Fluid Engineering, Coventry, England, Paper C3*.
- [40] Lopardo R. A., Henning R. E. (1985), Experimental advances on pressure fluctuations beneath hydraulic jump, *XXI Congresso IAHR, Melbourne*, vol. 3, sessione 15.
- [41] McCorquodale J. A., Khalifa A. (1983), Internal flow in hydraulic jumps, *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, vol. 109, no. 5.
- [42] McCorquodale J. A., Mohamed M. S. (1994), Hydraulic jumps on adverse slopes, *Journal of Hydraulic Research, IAHR*, vol. 32, no. 1.
- [43] Mohamed M. S., McCorquodale J. A. (1992), Short-term local scour, *Journal of Hydraulic Research, IAHR*, vol. 30, no. 5, pp. 685-699.
- [44] Moore W. L., Morgan C. W. (1959), Hydraulic jump at an abrupt drop, *Trans. ASCE*, vol. 124, paper no. 2991, pp. 507-524.
- [45] Mossa M., Tolve U. (1996), Flow visualization in bubbly two-phase hydraulic jump, *FED-Vol. 239, Proceedings of the ASME, Fluid Engineering Summer Meeting, Book No. H01075*, pp. 31-38.
- [46] Narayanan R. (1975), Wall jet analogy to hydraulic jump, *J. of Hydr. Div., ASCE*, 101(3), 347.
- [47] Narayanan R. (1978), Pressure fluctuations beneath submerged jump, *Journal of the Hydraulics Division, ASCE*, vol. 104, no. HY9.
- [48] Narayanan R. (1980), Cavitation induced by turbulence in stilling basin, *Journal of the Hydraulics Division, Proc. ASCE*, vol. 106, no. HY4, pp. 616-619.
- [49] Narayanan R., Schizas L. S. (1980), Force fluctuations on sill of hydraulic jump, *Journal of the Hydraulics Division, ASCE*, vol. 106, no. HY4.
- [50] Narayanan R. (1984), The role of pressure fluctuations in hydraulic modelling, *IAHR Symposium on Scale Effects in Modelling Hydraulic Structure, Esslingen am Neckar Germany, September*.
- [51] Nebbia G. (1940a), Sui dissipatori a salto di Bidone - Basi teoriche, *L'Energia Elettrica*, fascicolo III - vol. XVII.
- [52] Nebbia G. (1940b), Sui dissipatori a salto di Bidone - Ricerca sperimentale, *L'Energia Elettrica*, fascicolo VI - vol. XVII, pp. 327-355.
- [53] Nebbia G. (1941), Sui dissipatori a salto di Bidone - Norme di proporzionamento, *L'Energia Elettrica*, fascicolo VII - vol. XVIII.
- [54] Nebbia G. (1942), Su taluni fenomeni alternativi in correnti libere, *L'Energia Elettrica*, fascicolo I - vol. XIX, pp. 1-10.
- [55] Nosedo G. (1964), Un fenomeno di instabilità del risalto lungo una corrente veloce in espansione, *L'Energia Elettrica*, no. 4, pp. 249-254.
- [56] Ohtsu I., Yasuda Y. (1991), Transition from supercritical to subcritical flow at an

- abrupt drop, *Journal of Hydraulic Research, IAHR*, vol. 29, no. 3, pp. 309-328.
- [57] Ortiz J. P. (1982), Macroturbulencia de escoamento a jusante de estruturas de dissipação por ressalto; estudo teórico - experimental, *Boletim Técnico, DAEE, Sao Paulo*, vol. 5, no. 3, pp. 237-472, Governo do Estado de Sao Paulo, Secretaria de Obras e do Meio Ambiente, Departamento de Aguas e Energia Elétrica.
- [58] Peregrine D. H., Svendsen I.A. (1978), Spilling breakers, bores and hydraulic jumps, *Proc. 16th Coastal Engineering Conference*, chap. 30, pp. 540-550.
- [59] Rajaratnam N. (1962), An experimental study of the air entrainment characteristic of hydraulic jump, *J. Inst. Engr. India*, 42, 247-273.
- [60] Rajaratnam N. (1965), The hydraulic jump as a wall jet, *Journal of the Hydraulics Division, ASCE*, vol. 91, paper 4482, no. HY5, pp. 107-132.
- [61] Rajaratnam N., Ortiz N. V. (1977), Hydraulic jumps and waves at abrupt drops, *Journal of the Hydraulics Division, ASCE*, vol. 103, no. HY4, pp. 381-394.
- [62] Rajaratnam N., Subramanyan S. (1985), Plane turbulent buoyant surface jets and jumps, *Journal of Hydraulic Research, IAHR*, vol. 23, no. 2.
- [63] Rebaudengo Landò L., Seminara G. (1970), Analisi del comportamento di alcuni tipi di dissipatori, *XII Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche, Bari*.
- [64] Resch F. J., Leutheusser H. J. (1971), Mesures de turbulence dans le ressaut hydraulique, *La Houille Blanche*, no. 1, pp. 17-31.
- [65] Resch F. J., Leutheusser H. J. (1972), Le ressaut hydraulique: mesures de turbulence dans la region diphasique, *La Houille Blanche*, no. 4, pp. 279-293.
- [66] Resch F. J., Leutheusser H. J., Alemu S. (1974), Bubbly two-phase flow in hydraulic jump, *Journal of the Hydraulics Division, ASCE*, vol. 100, paper 10297, no. HY1, pp. 137-149.
- [67] Rinaldo A. (1985), Un criterio per il dimensionamento delle protezioni di fondo in bacini di smorzamento, *Giornale del Genio Civile*, fascicolo 4 - 5 - 6.
- [68] Roshko A. (1976), Structure of turbulent shear flows: a new look, *AIAA Journal*, vol. 14, no. 10, pp. 1349-1357.
- [69] Rouse H., Siao T. T., Nagaratnam S. (1958), Turbulence characteristics of the hydraulic jump, *Journal of the Hydraulics Division, ASCE*, vol. 84, paper 1528, no. HY1, pp. 1-30.
- [70] Sharp J. J. (1974), Observations on hydraulic jumps at rounded step, *Journal of the Hydraulics Division, ASCE*, vol. 100, no. HY6.
- [71] Toso J. W., Bowers C. E. (1988), Extreme pressures in hydraulic jump stilling basins, *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, vol. 114, no. 8.
- [72] Wilson E. H., Turner A. A. (1972), Boundary layer effects on hydraulic jump location, *Journal of the Hydraulics Division, ASCE*, vol. 98, no. HY7.
- [73] Winant C. D., Browand F. K. (1974), Vortex-pairing: the mechanism of turbulent mixing layer growth at moderate Reynolds number, *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 63, pt. 2, pp. 237-255.
- [74] Wood I. R. (Editor) (1991), Air entrainment in free-surface flows, *IAHR, Hydraulic Structures Design Manual*, no. 4, *Hydraulic Design Considerations*, Balkema Publ., Rotterdam, The Netherlands.
- [75] Wu S., Rajaratnam N. (1995), Free jumps, submerged jumps and wall jets, *Journal of Hydraulic Research, IAHR*, vol. 33, no. 2.
- [76] Yeh HH, Mok K. (1990), On turbulence in bores, *Phys. Fluids A* 2 (5), May, 821-828.