



ASSOCIAZIONE ITALIANA
VELOCIMETRIA LASER



DIPARTIMENTO DI MECCANICA
UNIVERSITÀ DI ANCONA

**ATTI DEL
IV CONVEGNO NAZIONALE
A.I.V.E.L.A.**

Ancona, 26-27 settembre 1996

Facoltà di Ingegneria
Università degli Studi di Ancona

SPETTRI DI POTENZA DELLE COMPONENTI DI VELOCITA' DI UN GETTO INTERAGENTE CON UN CAMPO DI MOTO ONDOSI

Michele Mossa

Dipartimento di Ingegneria delle Acque, Politecnico di Bari
Via E. Orabona, 4 - 70125 Bari; e-mail: mossa@poliba.it

SOMMARIO

Nel presente lavoro si riportano i risultati di un'indagine sperimentale condotta presso il Dipartimento di Ingegneria delle Acque del Politecnico di Bari volta all'analisi degli spettri di potenza delle componenti orizzontali e verticali di velocità di un getto immerso in un campo di liquido in quiete e del medesimo getto interagente con un campo di moto ondoso.

Si presenta un'analisi delle immagini dei getti, resa possibile attraverso l'uso di un tracciante, e un confronto degli spettri di potenza delle componenti orizzontali e verticali di velocità, evidenziando le differenze esistenti.

L'impianto sperimentale è costituito da un canale per moto ondoso largo 100 cm, alto 120 cm e lungo circa 45 m. Nell'indagine si sono analizzati getti di quantità di moto sommersi ad asse verticale effluenti da un orifizio tronco-conico. Per il rilievo delle velocità si è utilizzato un sistema LDA, costituito da una sorgente laser Ar-Ion Coherent Innova serie 70 di potenza 5 W, raffreddata ad acqua, con fibre ottiche, in modalità backscattering, bidimensionale a quattro raggi, con lunghezze d'onda di 488.0 e 514.5 nm. Il processore di segnale è un 58N40 FVA Enhanced della Dantec, comprensivo di una scheda per la seconda dimensione.

1. INTRODUZIONE

Diversi autori (Ger, 1979; Chin, 1987) dimostrarono sperimentalmente che la presenza di un campo di moto ondoso consente di migliorare la diluizione del soluto trasportato da un getto. Chyan e Hwung (1993) osservarono che, pur essendo vasta la letteratura a riguardo dei getti per quanto concerne i processi di intrusione (*entrainment*), l'interazione con le correnti, etc., è ancora scarsa la conoscenza dell'azione del moto ondoso sulla diffusione, auspicando sperimentazioni su modelli fisici.

Nel presente lavoro si riportano alcuni risultati di una ricerca sperimentale condotta nel laboratorio del Dipartimento di Ingegneria delle Acque del Politecnico di Bari, nell'ambito del corso di Dottorato di Ricerca in Ingegneria Idraulica per l'Ambiente e il Territorio, con sede amministrativa l'Università della Calabria e sedi consorziate il Politecnico di Bari, l'Università della Basilicata e l'Università di Salerno.

In particolare si presentano delle immagini di alcuni getti di quantità di moto immessi in un campo di liquido in quiete e dei medesimi getti interagenti con un campo di moto ondoso progressivo. Tali immagini, ottenute attraverso l'uso di un tracciante, consentono di dare un'interpretazione qualitativa dei fenomeni macroscopici del campo idrodinamico realizzato. Si presentano, inoltre, gli spettri di potenza delle componenti 'longitudinali e trasversali di velocità rilevate mediante un sistema LDA.

L'obiettivo è quello di evidenziare, nell'ambito dei getti interagenti con un campo di moto ondoso, l'esistenza di regioni a diverso comportamento idrodinamico.

2. IMPIANTO SPERIMENTALE E CONFIGURAZIONI ANALIZZATE

L'impianto sperimentale è stato diffusamente descritto in precedenti lavori (*Lamberti et al., 1988; Damiani e Mossa, 1996; Mossa, 1996a; Mossa, 1996b*). Esso è costituito da un canale per moto ondoso con le pareti di cristallo e fondo di plexiglass, sostenute da una serie di telai in ferro posti ad una distanza reciproca di circa 44 cm. Il canale è largo 100 cm, alto 120 cm e lungo circa 45 m. Nel canale sono individuate 100 sezioni poste ad una distanza di circa 44 cm una dall'altra. Le sezioni sono numerate a partire dalla berma di riva fino al generatore del moto ondoso. Il fondo del canale è orizzontale dalla sezione 100, ove si genera l'onda, fino alla sezione 72, dove inizia un profilo di spiaggia realizzato con sabbia a granulometria abbastanza uniforme con $d_{50}=0.18$ mm. Il moto ondoso è realizzato mediante una ventola piana posta ad una estremità del canale azionata mediante un cinematismo in grado di imprimere un movimento di rototraslazione; gli spostamenti del cinematismo, e quindi della ventola, sono ottenuti con un circuito oleodinamico comandato da un segnale elettrico.

L'indagine sperimentale è stata effettuata analizzando getti di quantità di moto sommersi ad asse verticale effluenti da una luce posta a 16.7 cm dal fondo del canale. L'impianto di generazione del getto è stato descritto in un precedente lavoro (*Mossa, 1996b*). Nelle sue linee essenziale, esso consta di un ugello di forma tronco-conica con diametro all'uscita $D=2.1$ mm, posto su un tratto orizzontale del fondo, ad una distanza di 11 m dal generatore del moto ondoso.

Il sistema LDA (*Mossa, 1996a*), nelle sue linee essenziali, è costituito da una sorgente laser Ar-Ion Coherent Innova serie 70 di potenza 5 W, raffreddata ad acqua. Esso è del tipo a fibre ottiche, in modalità backscattering, bidimensionale a quattro raggi, con lunghezze d'onda di 488.0 nm e 514.5 nm. Il processore è un 58N40 FVA Enhanced della Dantec, comprensivo di una scheda per la seconda dimensione. L'acquisizione dei dati è realizzata con il software Floware della Dantec Measurement Technology. Il sistema di acquisizione è in grado, attraverso una scheda di conversione A/D della Keithley Metrabyte modello DAS 50/4, di acquisire, contemporaneamente alle due

componenti di velocità, le uscite analogiche provenienti da quattro trasduttori. L'intero sistema è assistito da un calcolatore di processo.

Le misurazioni di velocità sono state effettuate per un getto immerso in un campo di liquido in quiete e per il medesimo getto interagente con un campo di moto ondoso progressivo. Per tali configurazioni la profondità dell'acqua in canale era $h=80$ cm, la portata di efflusso $Q_e=80$ l/h, la velocità di efflusso $U_e=6.42$ m/s e il numero di Reynolds della sezione di efflusso $Re=13482$. Per quanto concerne il moto ondoso, sono stati riprodotti in canale treni di onde regolari caratterizzati, per ciascuna configurazione, da frequenze, rispettivamente, di 0.5 Hz, 0.7 Hz e 1.0 Hz. In *tab. 1* si riportano, relativamente alle configurazioni con presenza di moto ondoso per le quali sono stati effettuati i rilievi di velocità, l'altezza d'onda (H), la lunghezza d'onda (L), il periodo (T) e i parametri H/L e h/L .

Tabella 1.

Serie	H [cm]	L [m]	T [s]	H/L	h/L
1	4.20	5.10	2.00	0.0082	0.1569
2	4.40	3.05	1.43	0.014	0.2623
3	4.13	1.56	1.00	0.027	0.5128

3. DESCRIZIONE QUALITATIVA DEI GETTI CON VISUALIZZAZIONE DEL FLUSSO

Alcune prove consistevano nella visualizzazione dei getti facendo uso di Rodamina B.

Le analisi sono state condotte sia per i getti precedentemente descritti, per i quali sono stati effettuati i rilievi di velocità, che per altri getti aventi le stesse caratteristiche dei precedenti, ma portate diverse.

3.1. Caso dei getti immessi in un campo di liquido in quiete

Per quanto riguarda i getti immessi in un campo di liquido in quiete, si riporta in *fig. 1*, un'immagine istantanea di un getto con portata di 80 l/h.

Nel seguito si farà riferimento al caso di un getto immerso verticalmente dal basso in un campo di liquido in quiete con densità uniforme. In tali condizioni, il tipo di campo di moto che si stabilisce in corrispondenza del pelo libero del fluido ambiente dipende dalla densità del fluido del getto.

In particolare, se il getto è caratterizzato da una densità maggiore del fluido ambiente, si crea una regione di ricaduta del flusso del tipo riportato in *fig. 2* (tratta da *Abraham, 1967*), caratterizzata da un coefficiente di intrusione (*entrainment*) negativo.

Nel caso in cui il fluido del getto abbia una densità minore del fluido ambiente, una possibile schematizzazione del campo di moto che si genera è riportata in *fig. 3* (tratta da *Wood et al., 1993*).

Nel caso analizzato in questo lavoro, in cui la densità del getto è

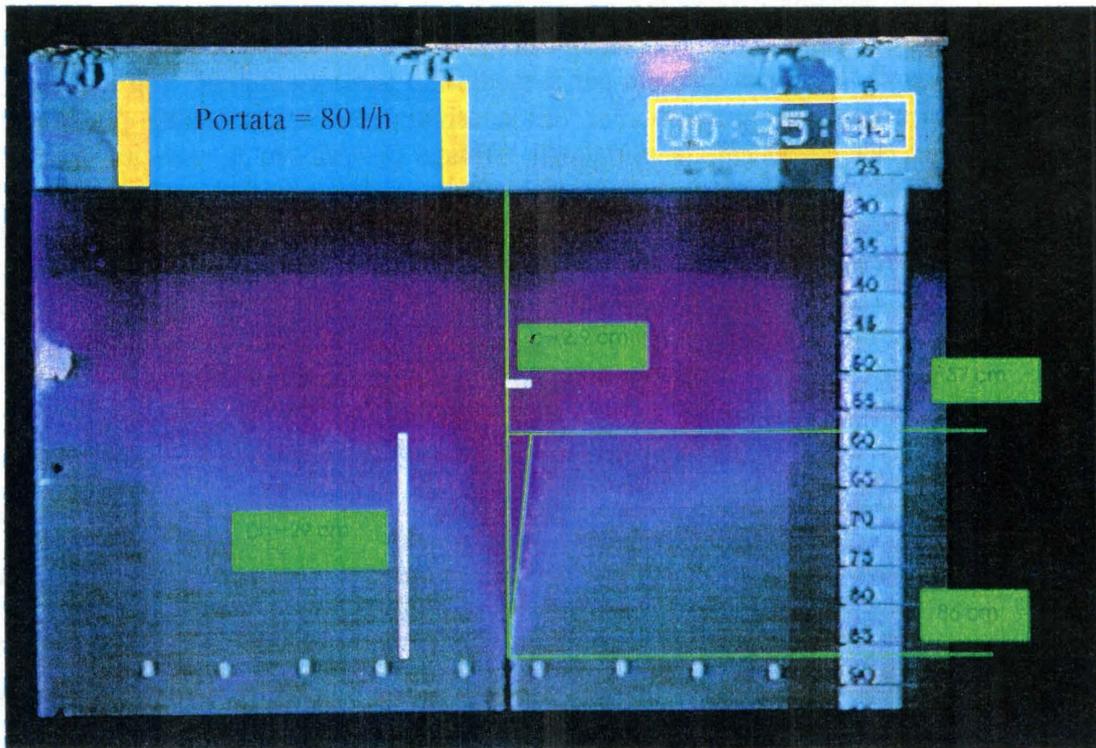


Fig. 1. Getto immesso in acqua ferma con portata di 80 l/h.

sostanzialmente analoga a quella del fluido ambiente, la situazione è intermedia rispetto ai due casi rappresentati nelle figg. 2 e 3.

Nell'immagine di fig. 1 si è riportato l'andamento della scala della lunghezze b , definita come la distanza dall'asse del getto in cui la velocità longitudinale media u , ricavata dai rilievi sperimentali, è $1/e$ volte quella in asse (u_m). Se si tien conto degli effetti dell'intermittenza e dello spessore della linea con cui si è tracciato l'andamento di b , si può senz'altro concludere che la curva, luogo geometrico dei punti rappresentanti la distanza dall'asse del

getto in cui la velocità è uguale a $1/e$ volte quella in asse (nel seguito indicata come curva B), è certamente contenuta nella regione del campo di moto del getto. E' evidente che tale informazione è puramente qualitativa in quanto non è possibile affermare che la curva B disegnata congiunga i punti a velocità uguale a u_m/e , sia perchè l'immagine è riferita ad un istante (e non alla media relativa ad un opportuno intervallo di tempo), sia perchè non è possibile ricavare dalla stessa

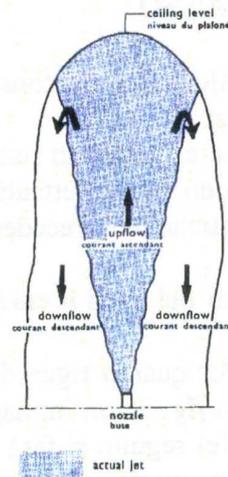


Fig. 2. Tipico campo di moto di un getto con densità maggiore di quella del fluido ambiente. Da Abraham (1967).

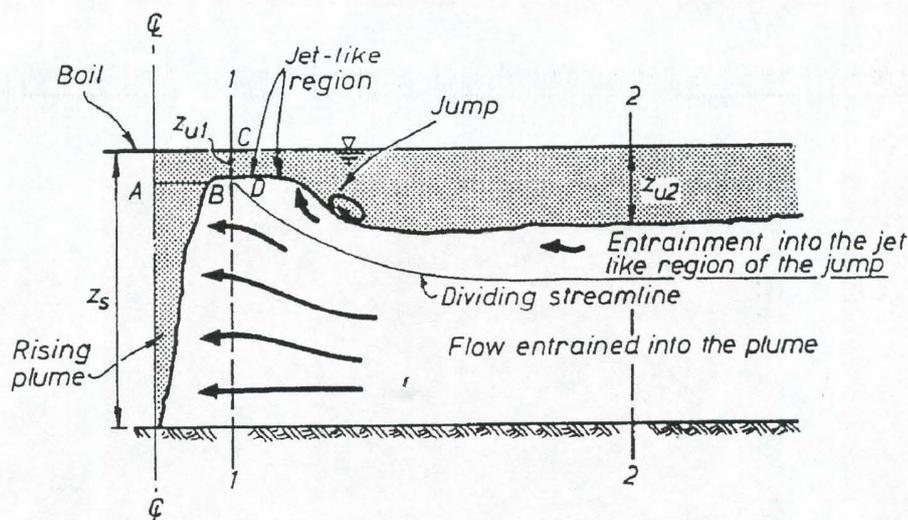


Fig. 3. Tipico campo di moto di un getto con densità minore del fluido ambiente. Da Wood et al. (1993).

immagine, con le apparecchiature attualmente disponibili, delle informazioni quantitative sul campo di velocità.

Tuttavia, il risultato ha una certa valenza, in quanto consente di affermare che la curva *B* è interna alla regione del getto.

3.2. Caso dei getti immessi in un campo di liquido in moto ondoso

Per quanto riguarda il caso di un getto effluente in un fluido ambiente in moto ondoso, si può far riferimento alle figg. 4-8. In particolare la fig. 4 rappresenta un getto con portata all'orifizio di 80 l/h, in un campo di liquido in quiete, dopo 25.00 s dall'immissione. Le figg. 5-8 rappresentano lo stesso getto, a partire dallo stesso istante, immesso in un campo di liquido in moto ondoso con periodo T uguale a 2 s e altezza H uguale a circa 4 cm. Le quattro immagini sono relative a istanti di tempo intervallati di 0.5 s, ossia un quarto di periodo del moto ondoso. E' possibile notare le flessioni a cui il getto è sottoposto a seconda degli istanti di tempo considerati e della distanza z dall'ugello.

Analogamente la fig. 9 rappresenta un getto con portata all'orifizio di 20 l/h, immesso in un campo di liquido in quiete. Le figg. 10-13 rappresentano lo stesso getto immesso in un campo di liquido in moto ondoso con caratteristiche innanzi dette.

Le immagini riportate consentono di effettuare un confronto fra i getti immessi in un campo di liquido in quiete e gli stessi getti immessi in un campo di liquido in moto ondoso. Tale comparazione mette in evidenza l'effetto dovuto alla presenza del campo di moto ondoso. Infatti dall'analisi di ciascuna immagine istantanea, relativa al caso dei getti interagenti con le onde, si osserva un allargamento delle sezioni trasversali più marcato rispetto al caso dello stesso getto immesso in acqua ferma. Questa considerazione è particolarmente interessante, poichè consente di affermare che il processo di intrusione (*entrainment*) che si realizza nel caso di un getto interagente con le onde è certamente maggiore rispetto al caso di un getto in acqua ferma e che questa conclusione non è legata ad una procedura euleriana di analisi. A tal riguardo,

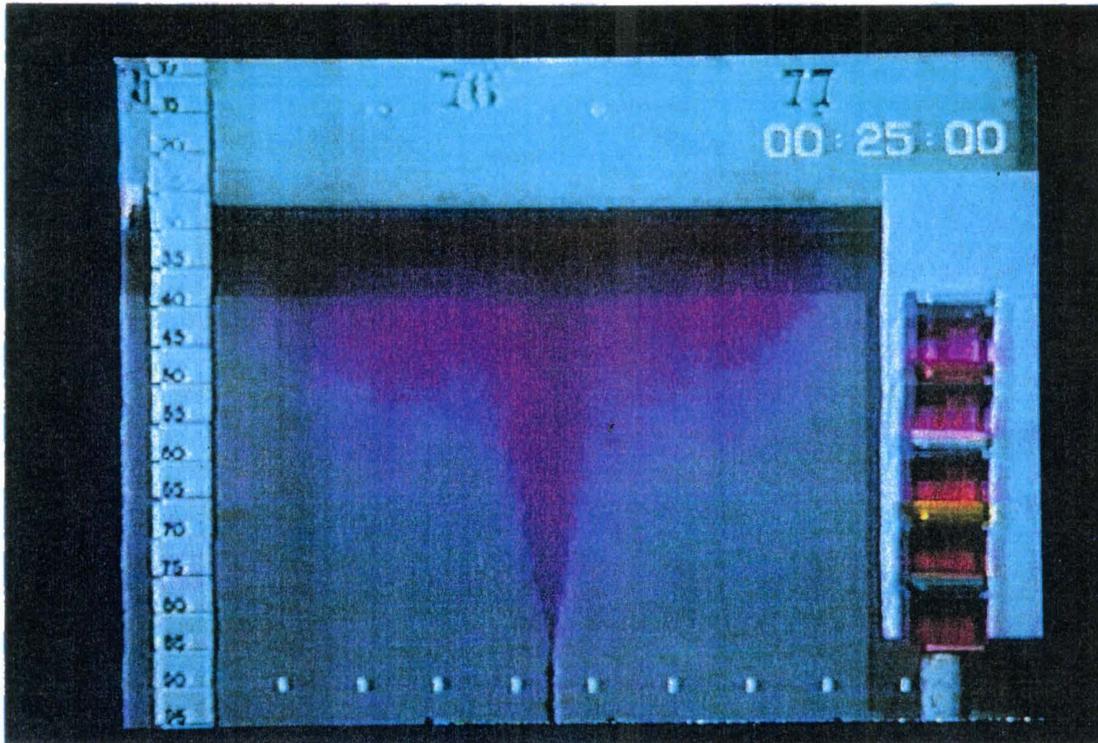


Fig. 4. Getto immesso in un campo di liquido in quiete con portata di 80 l/h.

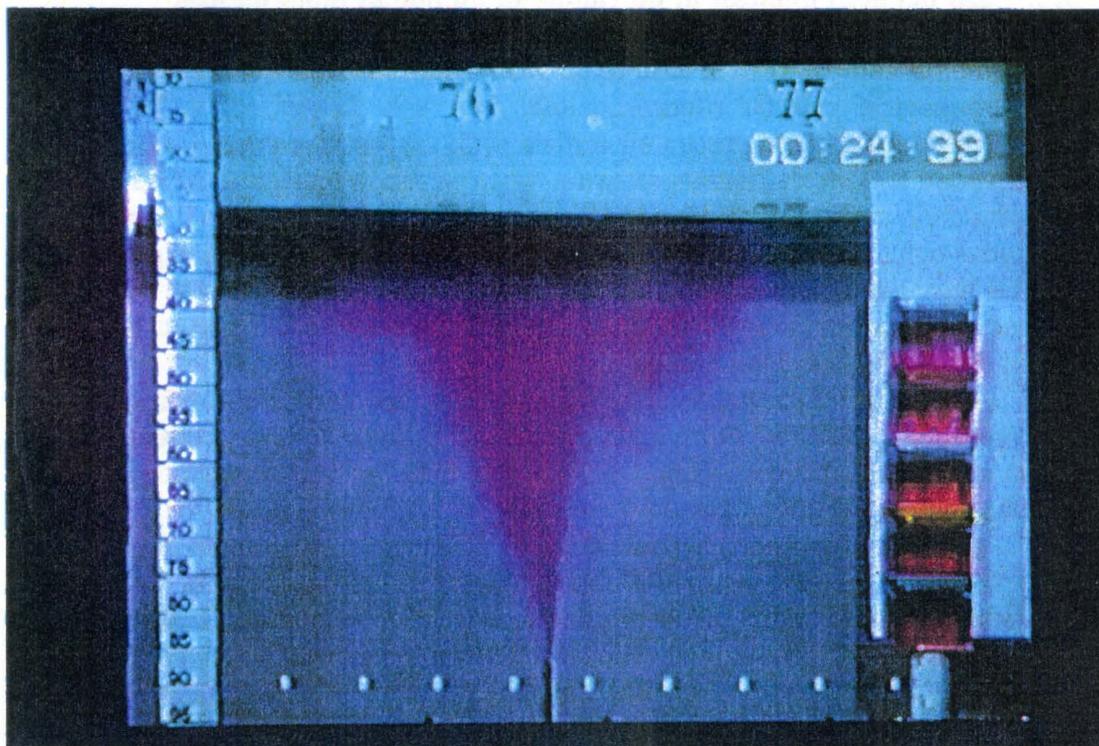


Fig. 5. Getto immesso in un campo di liquido in moto ondoso con portata di 80 l/h: $t=24.99$ s.

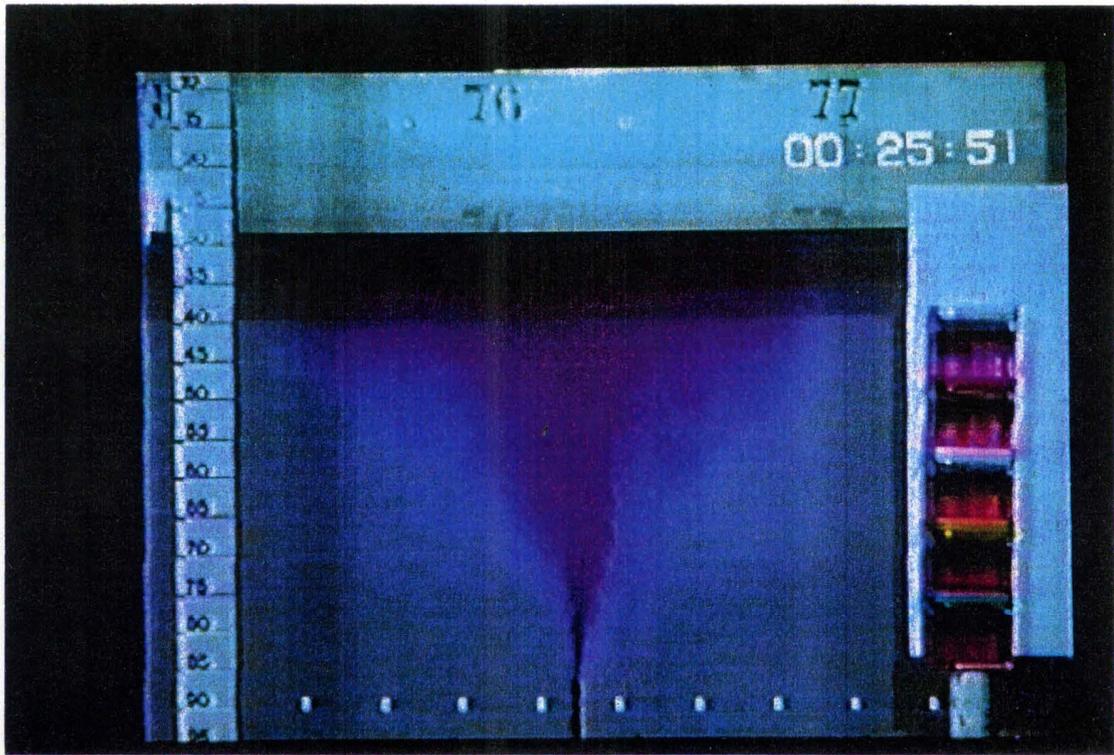


Fig. 6. Getto immesso in un campo di liquido in moto ondoso con portata di 80 l/h; $t=25.51$ s.

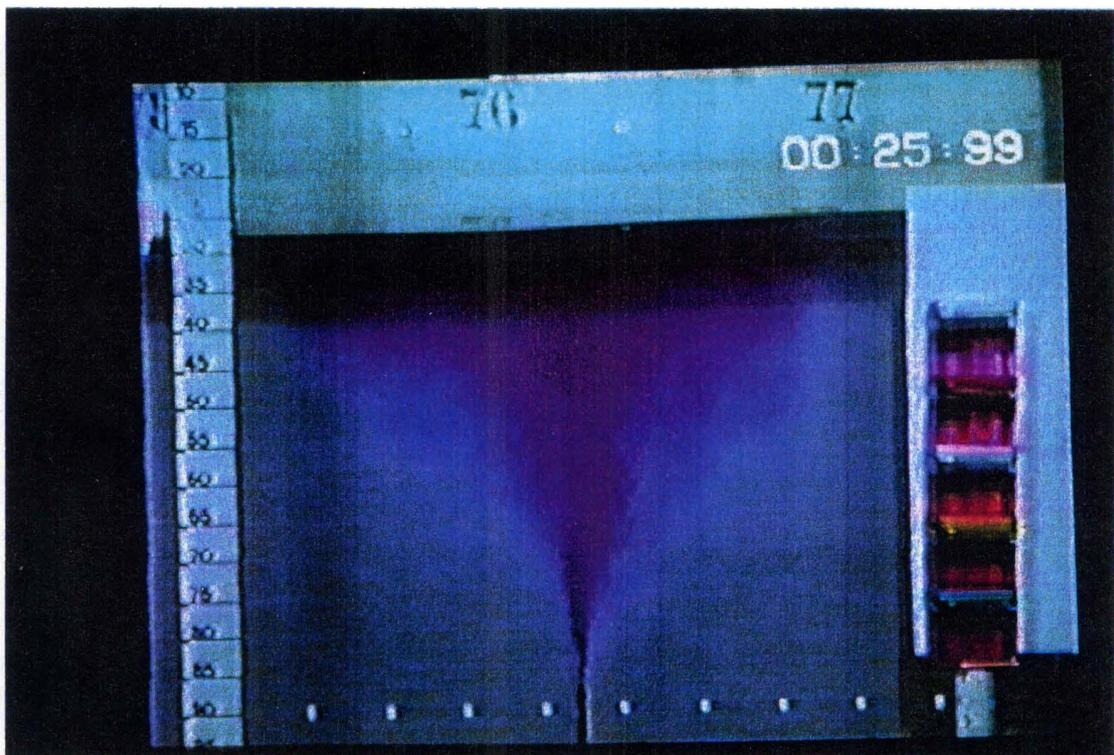


Fig. 7. Getto immesso in un campo di liquido in moto ondoso con portata di 80 l/h; $t=25.99$ s.

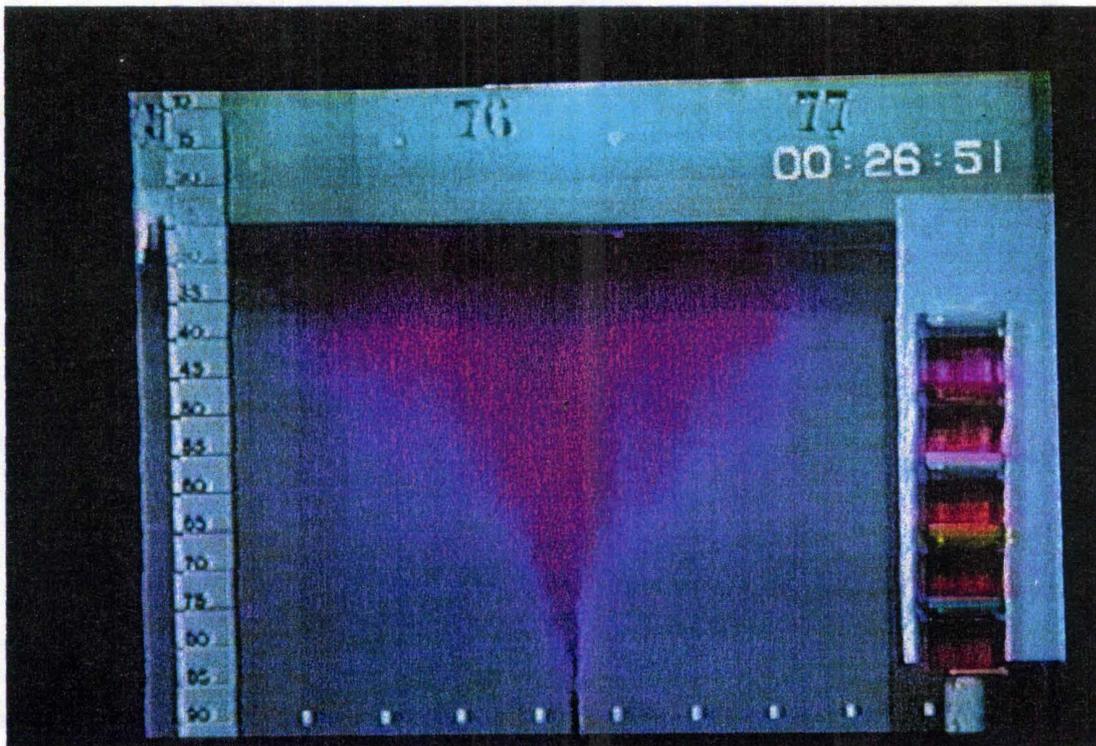


Fig. 8. Getto immesso in un campo di liquido in moto ondoso con portata di 80 l/h; $t=26.51$ s.

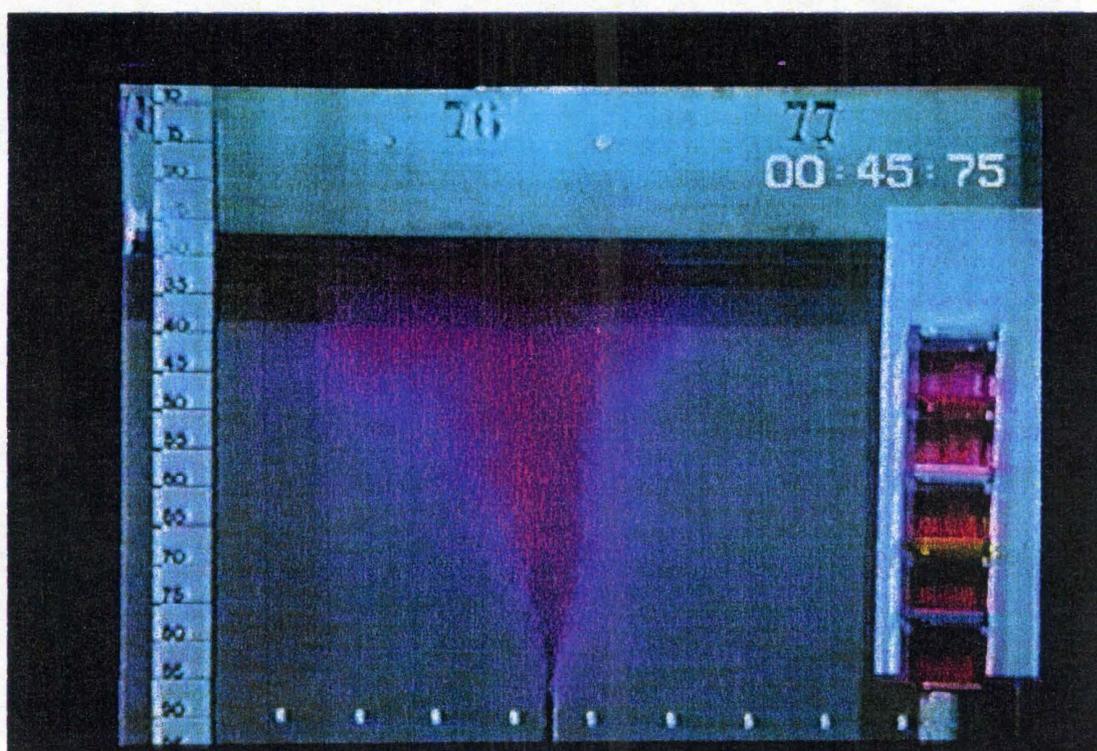


Fig. 9. Getto immesso in un campo di liquido in quiete con portata di 20 l/h.

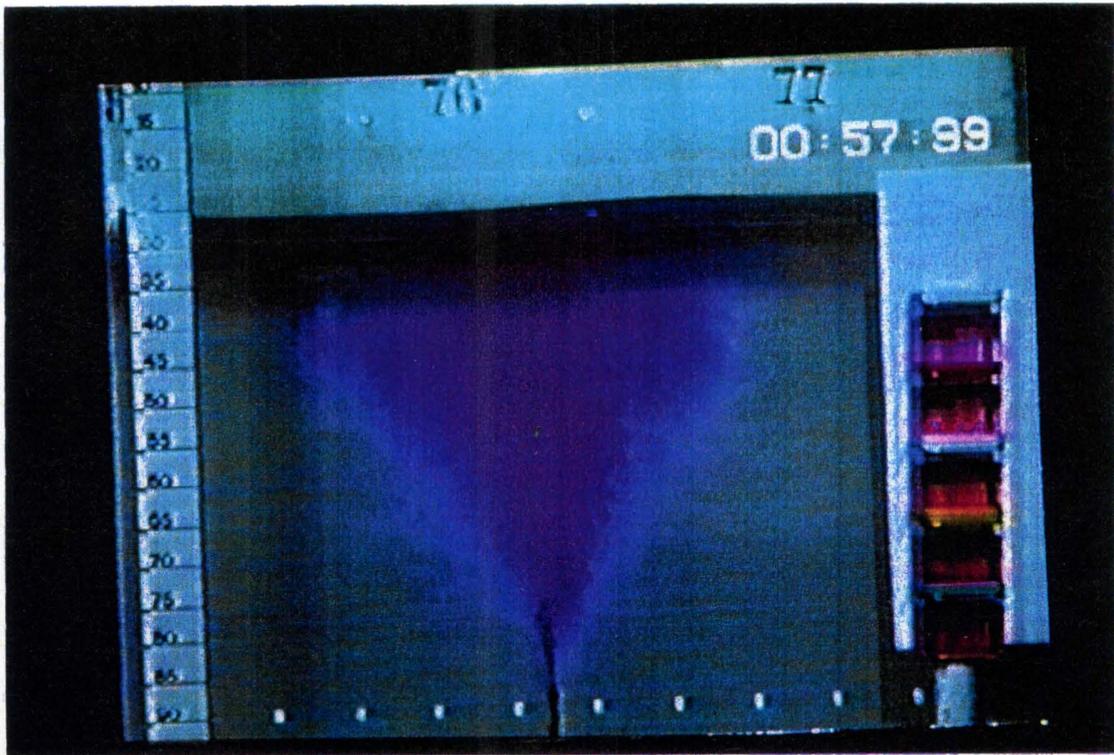


Fig. 10. Getto immesso in un campo di liquido in moto ondoso con portata di 20 l/h; $t=57.99$ s.

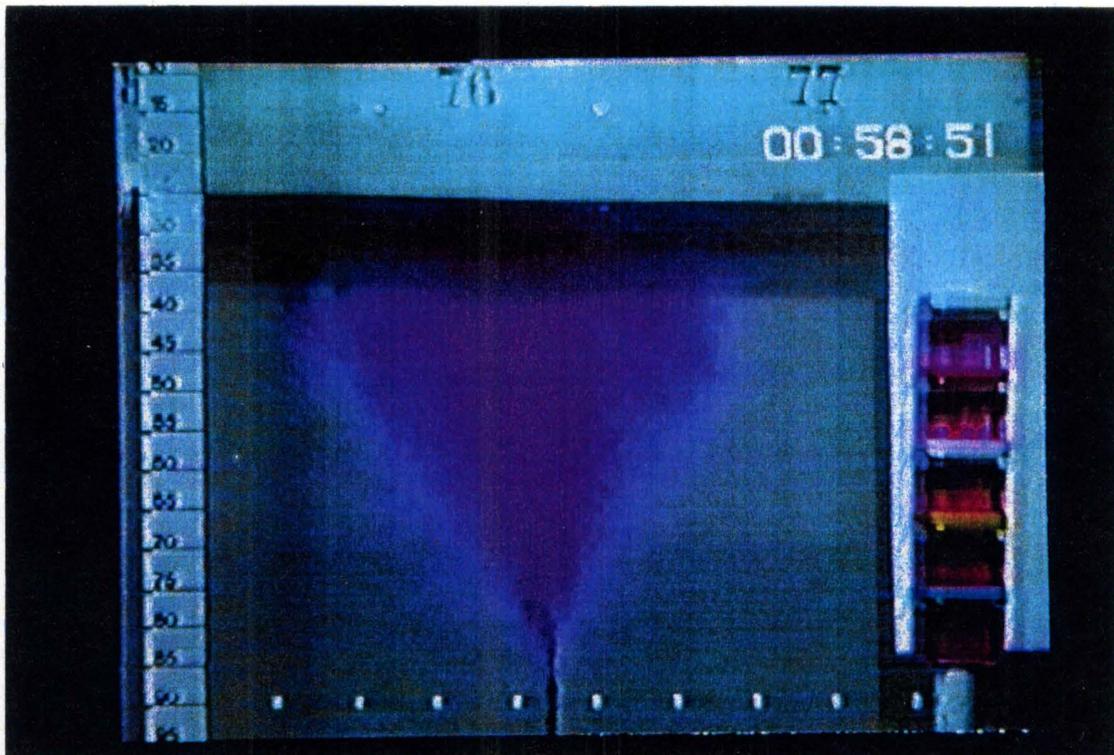


Fig. 11. Getto immesso in un campo di liquido in moto ondoso con portata di 20 l/h; $t=58.51$ s.

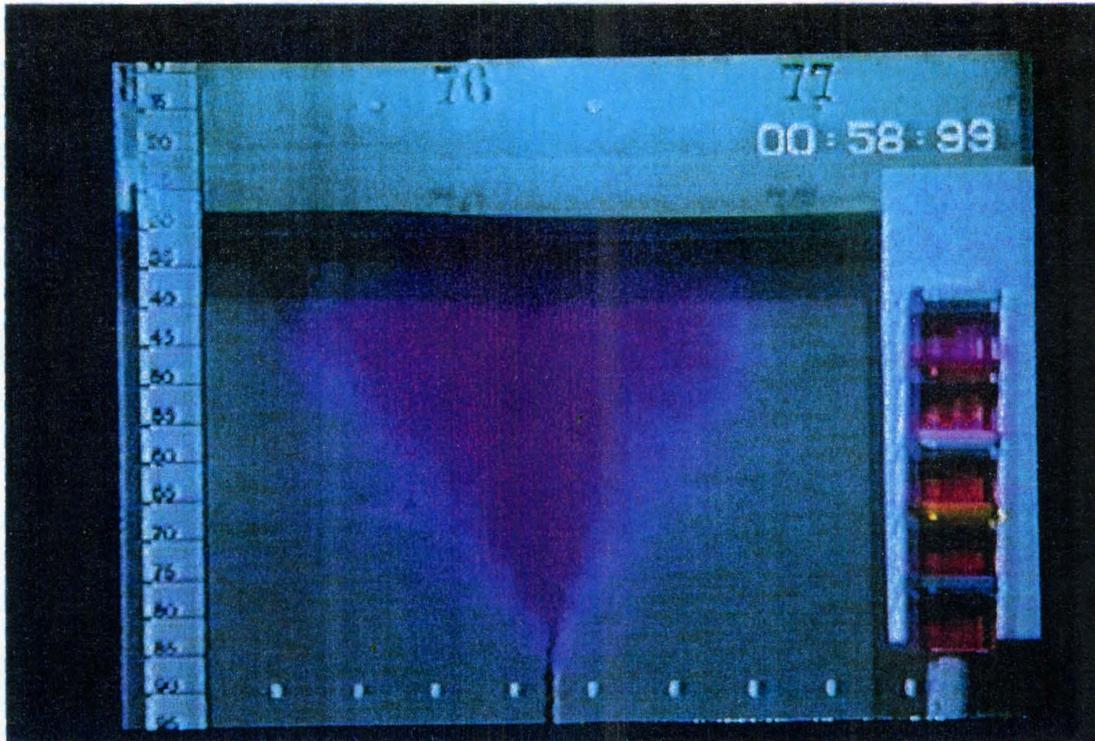


Fig. 12. Getto immesso in un campo di liquido in moto ondoso con portata di 20 l/h; $t=58.99$ s.

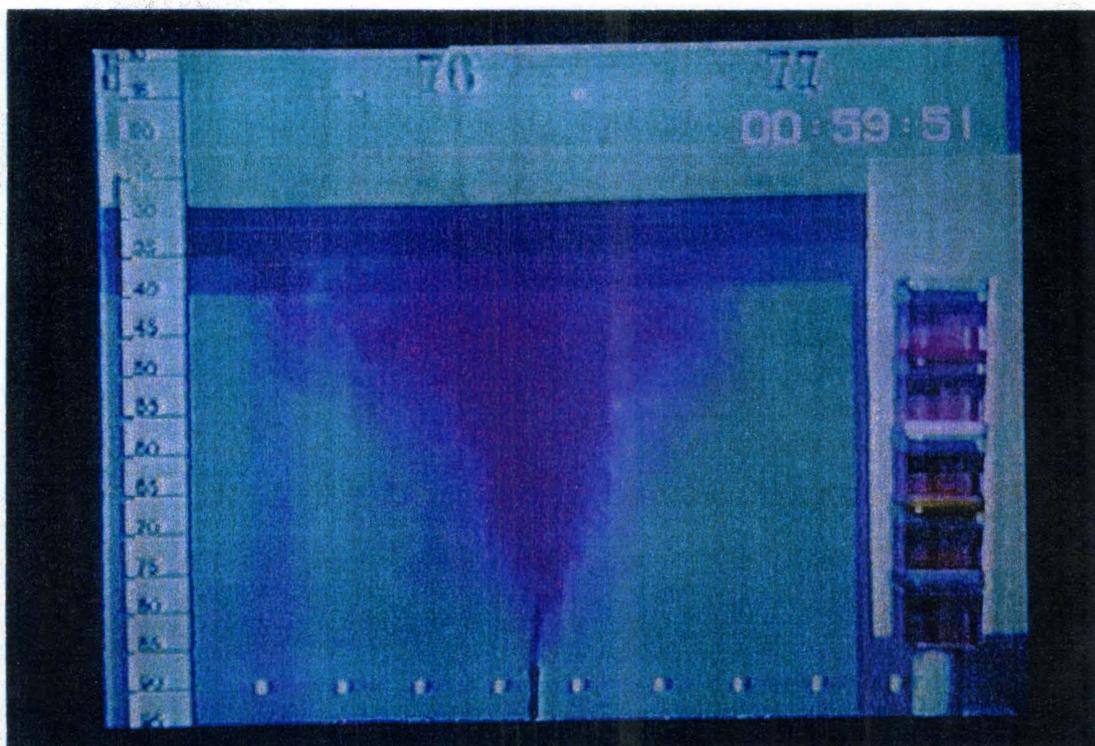


Fig. 13. Getto immesso in un campo di liquido in moto ondoso con portata di 20 l/h; $t=59.51$ s.

si osserva che il comportamento oscillatorio di un getto interagente con un campo di moto ondoso non è comparabile con quello di una piuma. In quest'ultimo caso, le analisi euleriane del campo di moto inducono a ritenere che il coefficiente di intrusione sia $5/3$ di quello di un getto (Wood et al., 1993). Secondo Pedersen (1986), tale conclusione è errata. Un'analisi lagrangiana delle piume, secondo lo stesso autore, metterebbe in evidenza la loro tendenza ad oscillare anche in presenza di ambiente esterno in quiete e, quindi, a dar luogo a delle erronee interpretazioni comparative rispetto al caso di un getto di quantità di moto.

Pedersen (1986) osserva che un'analisi lagrangiana delle piume metterebbe in evidenza l'uguaglianza del loro coefficiente di intrusione rispetto a quello dei getti.

Le immagini delle figg. 5-8 e 10-13 mostrano un comportamento oscillatorio del getto immerso in un campo di moto ondoso. Tuttavia, la singola immagine istantanea relativa ai getti interagenti con le onde evidenzia un allargamento maggiore rispetto al caso dello stesso getto in acqua ferma. Erronea, pertanto, sarebbe, l'interpretazione secondo cui la presenza di un campo di moto ondoso darebbe luogo esclusivamente ad un'oscillazione del getto senza modificarne le caratteristiche idrodinamiche (allargamento, coefficiente di intrusione, portata, etc.), così come avverrebbe per le piume.

E' evidente, tuttavia, che le analisi che si possono condurre con un sistema LDA sono tipicamente euleriane; ed esse non avrebbero consentito a priori di poter eliminare eventuali dubbi circa una sorta di analogia tra le oscillazioni a cui è soggetto un getto interagente con un campo di moto ondoso e le oscillazioni tipiche di una piuma immersa in un campo di fluido in quiete. In realtà si deve osservare che, mentre le oscillazioni tipiche di una piuma vivono di vita propria e non presuppongono l'intervento dell'ambiente esterno, nel caso dei getti immessi in un campo di liquido in moto ondoso, le oscillazioni sono il risultato di una interazione che, di fatto, non si limita solo ad esse. Infatti, un getto non è un corpo rigido né, tanto meno, impermeabile. Dunque, esso risente della presenza e delle variazioni delle velocità del campo di moto esterno, non solo in termini di oscillazioni. Questa considerazione mette in evidenza la sostanziale differenza tra le oscillazioni proprie di una piuma e le oscillazioni indotte da un campo di moto ondoso su un getto.

Le immagini delle figg. 5-8 e 10-13 hanno consentito di confermare le ipotesi avanzate da Chyan e Hwung (1993), secondo cui, nell'ambito dei getti interagenti con un campo di moto ondoso, è possibile distinguere tre diverse regioni, che, a partire dall'ugello, possono essere così definite:

- 1) regione di flessione del getto;
- 2) regione di transizione;
- 3) regione di getto sviluppato.

Nella regione di flessione, il getto è dominato dalla sua quantità di moto. In questa regione, le immagini hanno messo in evidenza una periodica oscillazione del getto, che conserva la sua identità, in virtù della rigidità che lo caratterizza. Le periodiche flessioni a cui il getto è sottoposto sono chiaramente dovute all'impatto della massa liquida esterna in moto con componenti di velocità oscillanti nel tempo. Tra l'altro, si osserva che, in vicinanza dell'ugello, la dimensione della sezione trasversale del getto analizzato era relativamente piccola, rispetto alla lunghezza dell'onda con cui interagiva. In tali situazioni è possibile

affermare che non si ha una grossa variazione delle componenti di velocità orizzontale del moto ondoso lungo una sezione trasversale del getto stesso e che, dunque, tutti i punti di tale sezione, sono assoggettati, in un definito istante, ad uno stesso spostamento imposto dalla presenza del campo di moto esterno. In altri termini, è possibile pensare che tutti i punti di una sezione trasversale del getto, vicina all'ugello, si muovono simultaneamente in direzione orizzontale con verso oscillante in funzione del periodo del moto ondoso. Tale considerazione è confermata dai rilievi sperimentali dei profili longitudinali di velocità (Mossa, 1996a). L'analisi di tali diagrammi ha evidenziato, per la *regione di flessione* dei getti interagenti con un campo di moto ondoso, un appiattimento dei profili di velocità e una sostanziale uguaglianza dei valori di allargamento delle sezioni trasversali rispetto ai medesimi getti immessi in un campo di liquido in quiete. Alla luce di tali considerazioni, dunque, è possibile affermare che, in vicinanza dell'ugello, il getto si comporta come un corpo rigido sottoposto a piccole oscillazioni impresse dal fluido ambiente.

Nella *regione di getto sviluppato*, il fluido ambiente è assoggettato a un meccanismo di *attrazione* del getto, in virtù della presenza del moto ondoso, e successivo *intrappolamento*, per effetto della flessione periodica (fenomeno di *wave tractive mechanism*, secondo Chyan e Hwung, 1993). Il risultato di questa azione combinata, di flessione del getto e di presenza del moto ondoso, tipica della *regione di getto sviluppato*, è quello di consentire ad un volume non trascurabile del fluido ambiente di riversarsi nella zona centrale del getto, dando luogo ad un maggior allargamento, rispetto al caso di immissione in acqua ferma. Tale meccanismo di intrusione (*entrainment*) si affianca a quello classico, proprio di un getto immesso in un campo di liquido in quiete. E' dunque logico attendersi un miglioramento del processo di diffusione del getto e di diluizione del soluto immesso, nel caso di presenza di moto ondoso. Inoltre, il confronto tra le immagini delle figg. 4-8 e 9-13 mette in evidenza che il maggiore allargamento di un getto immesso in un campo di liquido in moto ondoso rispetto al caso del medesimo getto immesso in un campo di liquido in quiete è tanto più grande quanto minore è la portata effluente, nell'ipotesi di uguaglianza degli altri parametri. In altri termini, un getto caratterizzato da una quantità di moto più piccola risente maggiormente degli effetti di un campo di moto ondoso.

Si ritiene che il fenomeno descritto da Chyan e Hwung (1993) possa essere interpretato alla luce delle seguenti considerazioni. Nella *regione di getto sviluppato*, le sezioni trasversali di un getto sono più grandi rispetto alla *regione di flessione*. Si fissi l'attenzione su una sezione trasversale media del getto e su un elemento cilindrico nel suo intorno. Si osserva che, fissato un certo istante di tempo, le componenti orizzontali di velocità del moto ondoso variano lungo la sezione trasversale precedentemente definita. Si supponga, ora, di suddividere l'elemento cilindrico, nell'intorno della sezione trasversale, con piani ortogonali alla direzione di propagazione del moto ondoso e, dunque, paralleli all'asse medio del getto, in modo da ottenere delle porzioni di flusso sufficientemente piccole affinché, in ciascuna di esse, si possa ritenere costante, in prima approssimazione, la componente orizzontale di velocità del moto ondoso. Si può ipotizzare che il moto del getto interagente con le onde sia il risultato di una sovrapposizione, nella stessa porzione, del campo di moto del getto e del campo di moto ondoso. Alla luce delle considerazioni svolte, si può affermare che ciascuna delle porzioni, in

cui l'elemento cilindrico del getto è stato suddiviso, andrà a interagire con il campo di moto ondoso, caratterizzato, in un prefissato istante e in ciascuna porzione, da un valore costante di velocità.

Ora, tale valore di velocità sarà diverso da porzione a porzione, a differenza di quanto accade per la *regione di flessione*, in cui, si ribadisce, ogni punto della sezione trasversale del getto, essendo piccola, risentirà dello stesso valore della componente orizzontale di velocità del moto ondoso. Queste considerazioni mettono in evidenza che, nella *regione di getto sviluppato*, ogni punto di una fissata sezione trasversale del getto stesso non è sottoposto ad una analoga oscillazione.

Si osserva, inoltre, che nella *regione di getto sviluppato*, il getto stesso perde quella che in precedenza è stata definita *rigidezza* ed è maggiormente soggetto ai meccanismi di intrusione propri della presenza del moto ondoso.

Si ritiene, in accordo con le considerazioni espone in precedenza, che le interazioni di un getto con un campo di moto ondoso del tipo analizzato siano essenzialmente legate alle componenti orizzontali del fluido ambiente. Tale conclusione è avallata dalle seguenti considerazioni:

1) Le componenti orizzontali di velocità di un campo di moto ondoso in acque intermedie (tipo quelle della ricerca che è stata fin qui svolta) presentano delle ampiezze di oscillazione maggiori rispetto alle corrispondenti componenti verticali.

2) Lo studio di *Calabrese e Di Natale (1994)* sull'interazione di un getto con un campo di moto ondoso stazionario ha evidenziato che, quando l'asse del getto stesso è ubicato in una sezione antinodale (caratterizzata, come è noto, dalle sole componenti verticali di velocità dell'onda), i valori della scala delle lunghezze trasversali b non subiscono delle apprezzabili variazioni rispetto al caso di immissione in acqua ferma. Allorchè l'asse del getto è ubicato in una sezione nodale (caratterizzata, come è noto dalle sole componenti orizzontali di velocità dell'onda), i profili di velocità media locale nelle sezioni trasversali risultano molto appiattiti, con una forte riduzione del gradiente in prossimità dell'asse. Inoltre, la scala delle lunghezze trasversali b aumenta considerevolmente rispetto alla sezione antinodale.

3) *Chyan e Hwung (1993)*, commentando il lavoro di *Ger (1979)*, che si riferisce al caso di un getto immesso orizzontalmente in un campo di moto ondoso, osservano che l'aumento della diluizione è legato alla interazione del getto stesso con le componenti orizzontali di velocità delle onde, in analogia con i getti composti (*Rajaratnam, 1976*).

Le considerazioni precedenti possono anche render conto della ragione per cui *Chin (1988)* abbia introdotto, per il caso dei getti interagenti con un campo di moto ondoso, un coefficiente di intrusione forzato che "rappresenta la percentuale del flusso laterale che si *introduce* dall'ambiente esterno nel getto". *Chin (1988)* osserva che il processo di intrusione forzato avviene solo su un lato del getto. Tale regione di interesse è evidentemente funzione del tempo, ossia varierà nel tempo secondo le oscillazioni impresse dal moto ondoso.

Chyan e Hwung (1993) osservano, tra l'altro, che un'ulteriore caratteristica dei getti interagenti con un campo di moto ondoso è rappresentata dalla formazione di scie vorticose sottovento rispetto alla componente orizzontale di velocità del fluido ambiente. In effetti, quando la componente orizzontale di

velocità raggiunge il suo massimo valore, le sezioni trasversali del getto assumono la classica *forma di rene* (o a *ferro di cavallo*), tipica dei getti immessi in un campo di liquido con corrente trasversale al loro asse. I vortici, che si formano per il fenomeno precedentemente descritto, cambiano periodicamente posizione in funzione del verso della componente orizzontale di velocità del moto ondoso. Secondo Chyan e Hwung, la vorticità legata a questo fenomeno è un'ulteriore causa di incremento del processo di intrusione. E' evidente che il fenomeno della formazione dei vortici è legato al campo di moto ondoso analizzato. In particolare, se la frequenza di distacco dei vortici è minore della frequenza del moto ondoso, il processo di formazione delle scie vorticose non può completamente svilupparsi. Tuttavia, le esperienze condotte nell'ambito di questa ricerca non hanno consentito di mettere in evidenza l'esistenza di questi vortici, il cui effetto, secondo *Chyan e Hwung (1993)*, potrebbe essere secondario rispetto al processo da essi definito di *wave tractive mechanism*.

4. SPETTRI DI POTENZA

4.1. Caso dei getti immessi in un campo di liquido in quiete

Nelle *figg. 14-17* si riportano gli spettri di potenza (in scale lineari e logaritmiche) relativi alle serie storiche delle componenti verticali e orizzontali di velocità rilevate nel punto a distanza $x=2.5 \text{ mm}$ dall'asse del getto (sezione trasversale a distanza $z=60 \text{ mm}$ dall'ugello). Dalle curve in scala logaritmica, precedentemente richiamate, e dalle altre non riportate per brevità, è possibile osservare il classico andamento con pendenza uguale a $-5/3$. Tali diagrammi verranno nel seguito confrontati con quelli ottenuti per il caso dei getti interagenti con un campo di moto ondoso.

4.2. Caso dei getti immessi in un campo di liquido in moto ondoso

Dagli spettri di potenza delle componenti verticali e orizzontali di velocità delle sezioni a distanza 5 mm e 10 mm dall'ugello (non riportati per brevità) si sono dedotte le seguenti conclusioni. Per i punti di misura posti sull'asse medio del getto o poco discosti da esso lo spettro non presenta dei picchi a frequenze particolari. Viceversa, allontanandosi dall'asse medio, gli spettri sono caratterizzati da un picco dominante a frequenza uguale a quella del moto ondoso, ossia 0.5 Hz , 0.7 Hz o 1.0 Hz , a seconda delle configurazioni.

Per quanto riguarda i punti appartenenti alle sezioni analizzate a distanza maggiore di 10 mm dall'ugello, invece, gli spettri di potenza presentano generalmente un picco principale a frequenza uguale a quella del moto ondoso anche per i punti di misura prossimi all'asse medio del getto, come si nota dalle *figg. 19-23*. In *fig. 18*, invece, è presente un picco a frequenza doppia rispetto a quella del campo di moto esterno. La figura si riferisce alle componenti verticali di velocità della configurazione 1 di *tab. 1* per il punto a distanza $z=110 \text{ mm}$ dall'ugello e posto sull'asse medio del getto. La spiegazione di tale comportamento può essere la seguente. Il vettore velocità nel punto precedentemente indicato può essere rappresentato in prima approssimazione come un pendolo oscillante con periodo uguale a quello del moto ondoso (2 s nel caso

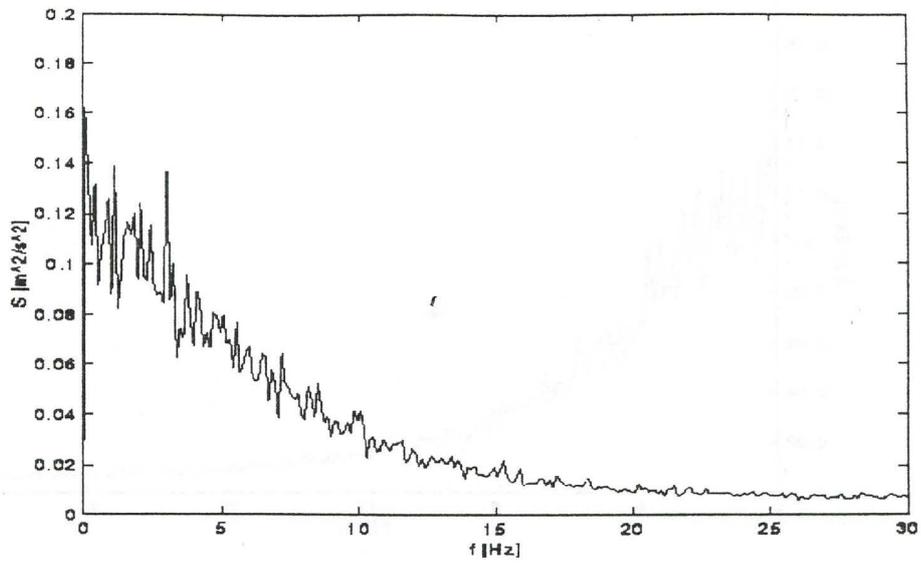


Fig. 14. Spettro di potenza delle componenti verticali di velocità per il punto di misura a distanza $x=2.5$ mm dall'asse del getto ($z=60$ mm).

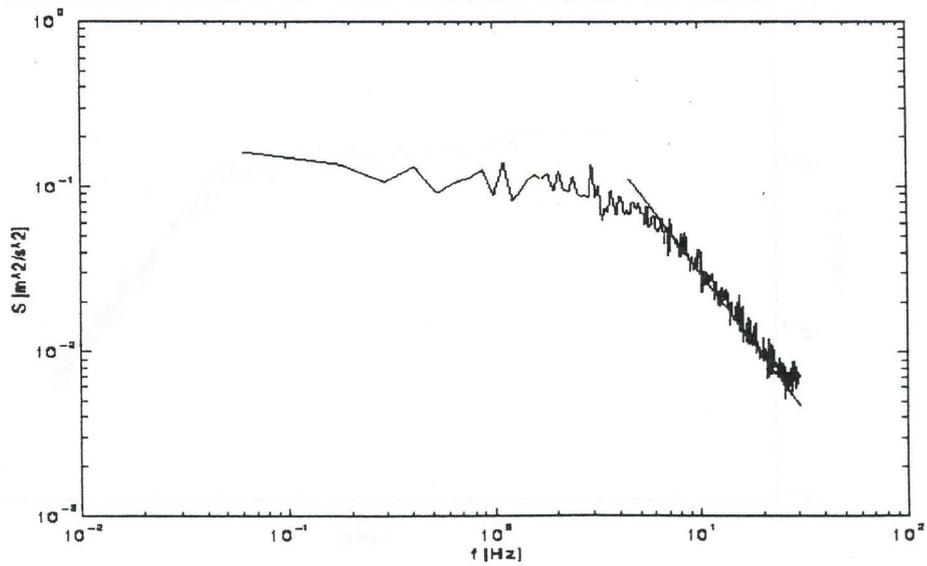


Fig. 15. Spettro di potenza delle velocità verticali del punto di misura a distanza $x=2.5$ mm dall'asse del getto ($z=60$ mm) in scale logaritmiche.

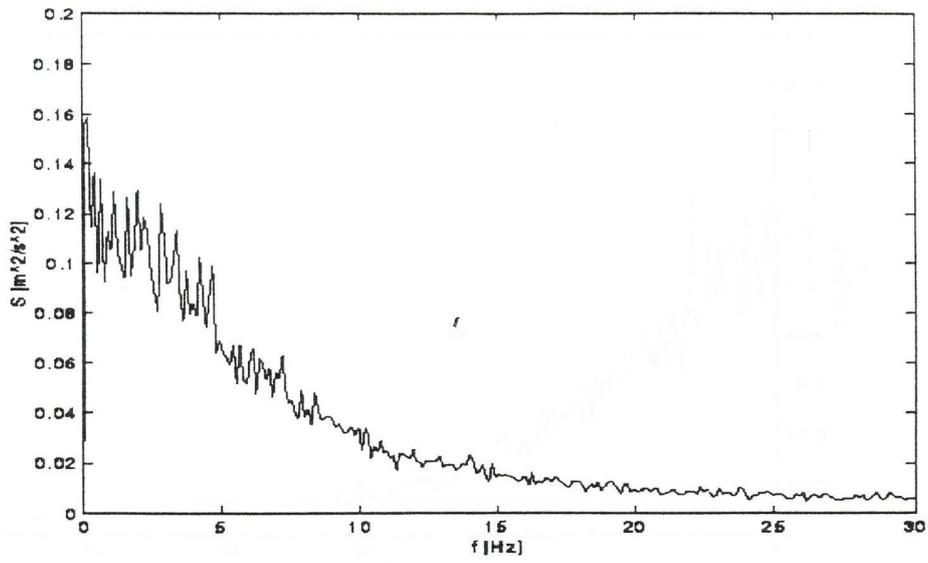


Fig. 16. Spettro di potenza delle componenti orizzontali di velocità del punto di misura a distanza $x=2.5$ mm dall'asse del getto ($z=60$ mm).

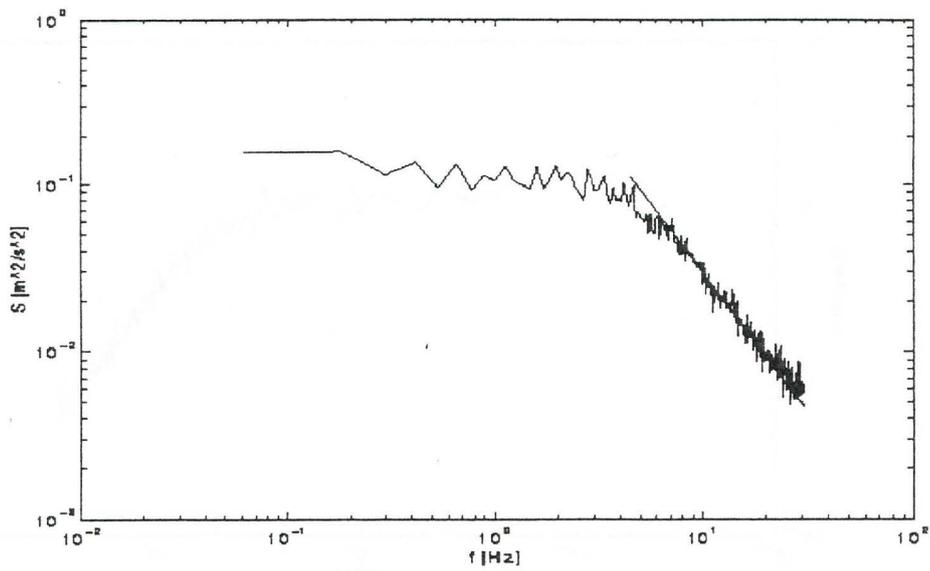


Fig. 17. Spettro di potenza delle velocità orizzontali del punto di misura a distanza $x=2.5$ mm dall'asse del getto ($z=60$ mm) in scale logaritmiche.

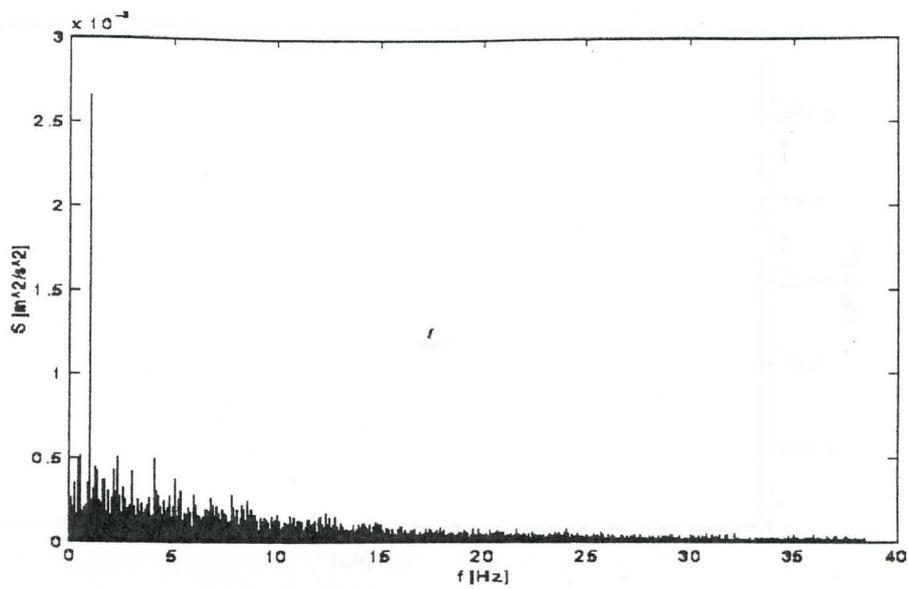


Fig. 18. Spettro di potenza delle componenti verticali di velocità per il punto di misura posto sull'asse medio del getto (conf. 1 di tab.1; $z=110\text{mm}$).

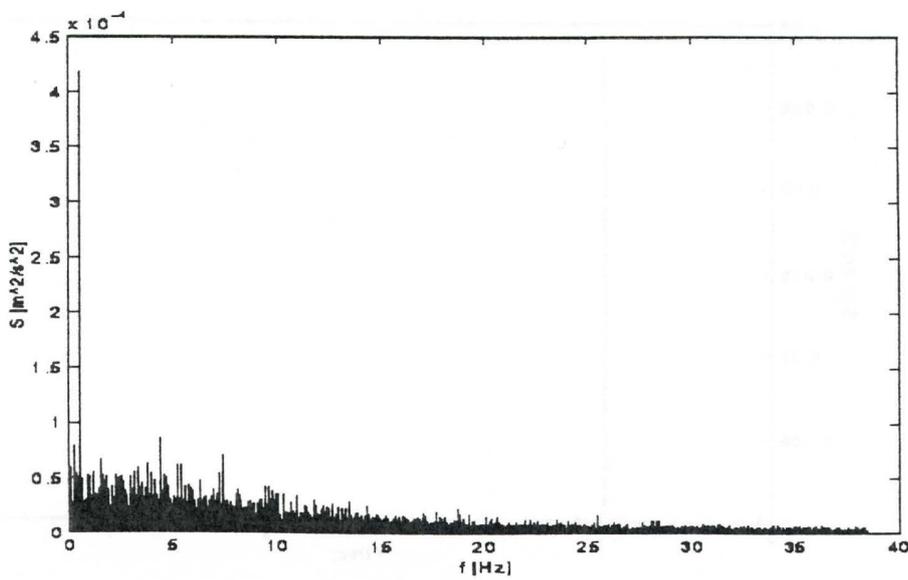


Fig. 19. Spettro di potenza delle componenti orizzontali di velocità per il punto di misura posto sull'asse medio del getto (conf. 1 di tab.1; $z=110\text{mm}$).

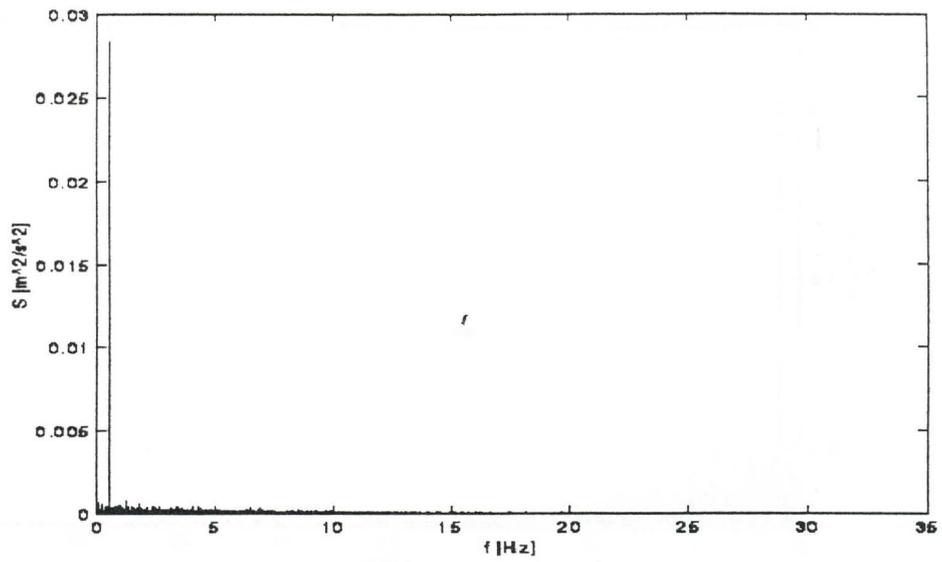


Fig. 20. Spettro di potenza delle componenti verticali di velocità per il punto di misura a distanza $x=7.0$ mm dall'asse medio del getto (conf. 1 di tab.1; $z=110\text{mm}$).

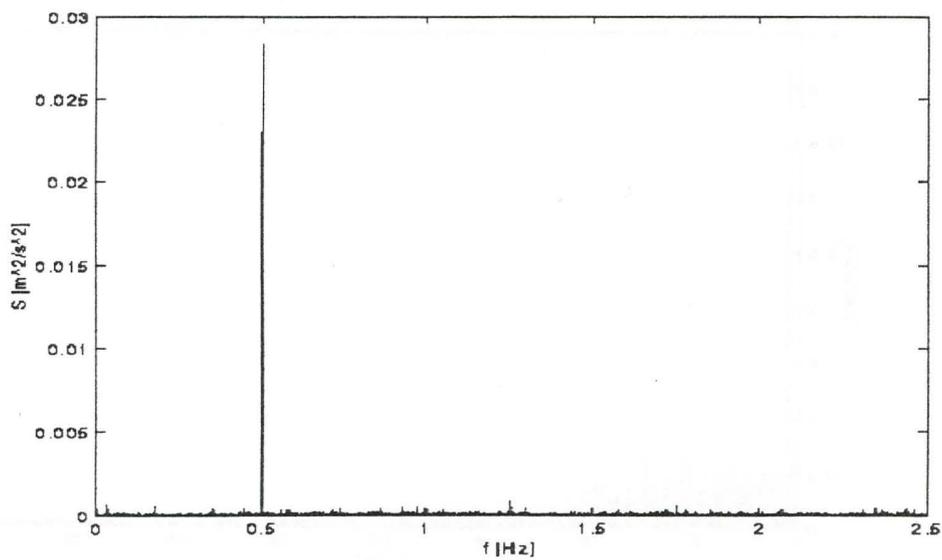


Fig. 21. Ingrandimento dello spettro di potenza di fig. 20.

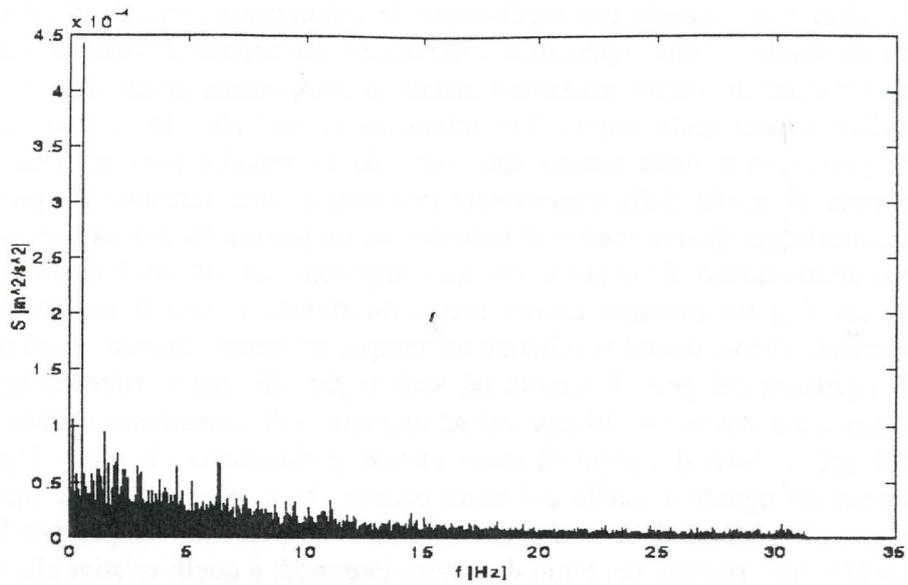


Fig. 22. Spettro di potenza delle componenti orizzontali di velocità per il punto di misura a distanza $x=7.0$ mm dall'asse medio del getto (conf. 1 di tab.1; $z=110$ mm).

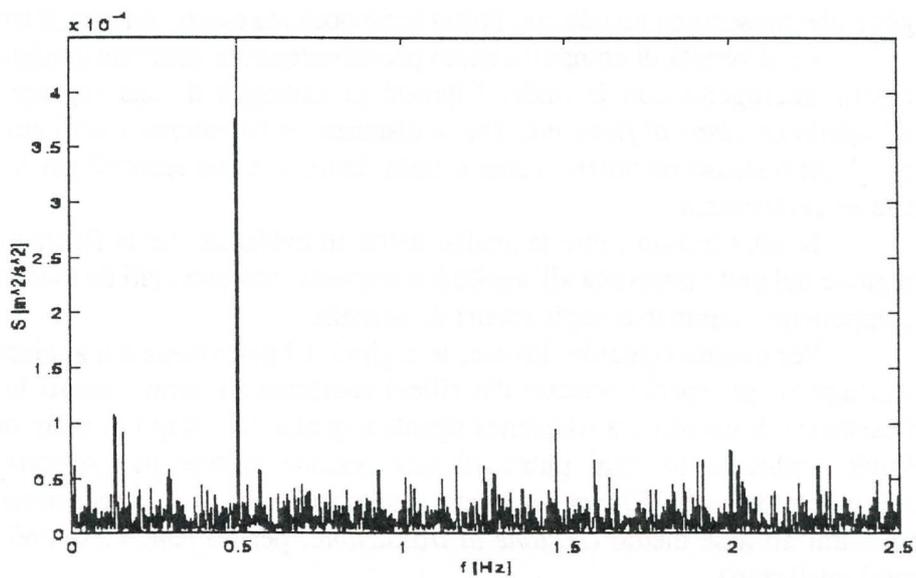


Fig. 23. Ingrandimento dello spettro di potenza di fig. 22.

analizzato). In particolare, la componente orizzontale di velocità oscilla nell'arco di un periodo del moto ondoso da valori positivi a valori negativi con un andamento sinusoidale simile a quello del campo di moto ondoso, conservandone la frequenza. Durante tale oscillazione, la componente verticale di velocità passa da un valore minimo (quando la componente orizzontale di velocità è massima o minima) ad un valore massimo (quando la componente orizzontale di velocità è nulla), conservando sempre l'orientamento verso l'alto. In tal caso la funzione rappresentativa della componente verticale di velocità presenta una frequenza doppia di quella della componente orizzontale: una funzione di questo tipo è caratterizzata da uno spettro di potenze con un picco a frequenza doppia di quella del moto ondoso. E' evidente che un comportamento siffatto è tipico di un punto in cui il getto presenta ancora una certa rigidezza, con il vettore di velocità verticale avente modulo oscillante nel tempo, ma verso costante. In effetti quando la rigidezza del getto è minore (si veda la *fig. 20*, che si riferisce sempre alla sezione a distanza $z=110\text{ mm}$, ma ad un punto sufficientemente distante dall'asse del getto, dove il campo di moto ondoso è dominante) il picco è presente a frequenza uguale a quella del moto ondoso. Nelle *figg. 24-33* si riportano gli spettri di potenza delle componenti verticali di velocità, sempre per la sezione $z=110\text{ mm}$, rilevate nei punti di misura intermedi a quelli relativi alle *figg. 18 e 20*. Da esse è possibile osservare che, procedendo dall'asse medio del getto verso la regione esterna, il picco a frequenza 1 Hz tende a ridursi, mentre quello a frequenza 0.5 Hz tende ad aumentare. Le *figg. 34 e 35* riportano gli spettri di potenza delle componenti verticali di velocità relative alla sezione a distanza $z=110\text{ mm}$ dall'ugello (conf. 1 di *tab. 1*), in un opportuno intorno delle frequenze 0.5 Hz e 1.0 Hz , rispettivamente; i diagrammi tridimensionali consentono di avere una visione globale del fenomeno analizzato in precedenza al variare della distanza x del punto di misura dall'asse medio del getto. Le sezioni trasversali del getto che presentano un tale comportamento possono essere definite *di transizione*.

Le diversità di comportamento precedentemente descritte confermano, per i getti interagenti con le onde, l'ipotesi di esistenza di una regione prossima all'ugello (*regione di flessione*, fino a distanza $z=10\text{ mm}$ per i getti analizzati) in cui il getto stesso mantiene, come è stato detto, una sua *identità* per la *rigidezza* che lo caratterizza.

In altri termini, questa analisi mette in evidenza che le flessioni, a cui la regione del getto prossima all'ugello è sottoposta, non sono tali da evidenziare una componente dominante negli spettri di potenza.

Per quanto riguarda, invece, le regioni del getto poste a maggiore distanza dall'ugello, gli spettri ottenuti dai rilievi sperimentali hanno messo in evidenza l'esistenza di un picco a frequenza uguale a quella del campo di moto ondoso del fluido ambiente in ogni punto di una sezione trasversale (*regione di getto sviluppato*, per $z \geq 160\text{ mm}$ per i getti analizzati) o con la sola eccezione dei punti prossimi all'asse medio (*regione di transizione*, per $10\text{ mm} < z < 160\text{ mm}$ per i getti analizzati).

Questa considerazione è in accordo con quanto detto nel par. 3.2, poichè si ricorda che, per le *regioni di transizione e di getto sviluppato*, la rigidezza del getto è inferiore rispetto alla *regione di flessione*. Quindi è logico attendersi che ogni punto di una sezione trasversale risenta del fenomeno di oscillazione, sia pure con entità diversa. Infatti le potenze relative alla componente dominante (si

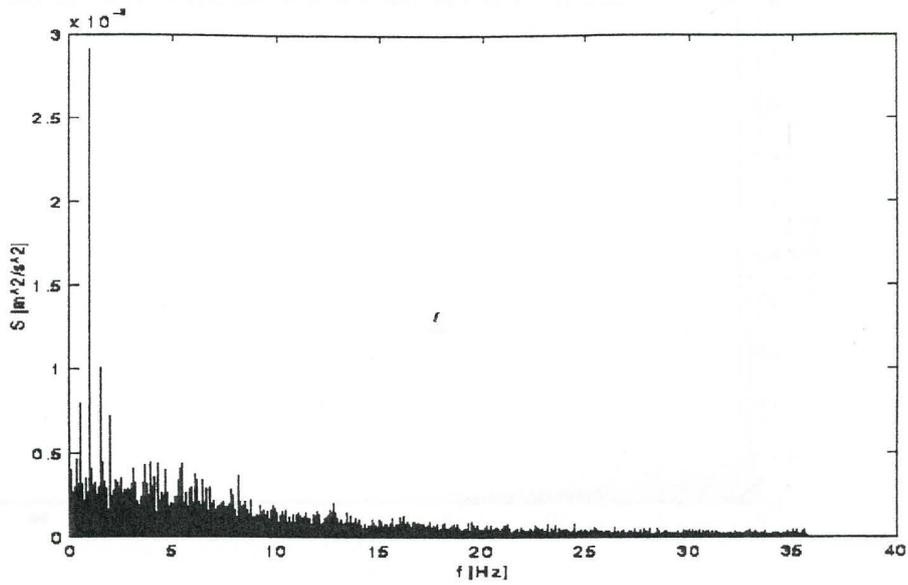


Fig. 24. Spettro di potenza delle componenti verticali di velocità per il punto di misura a distanza $x=0.5$ mm dall'asse medio del getto (conf. 1 di tab.1; $z=110$ mm).

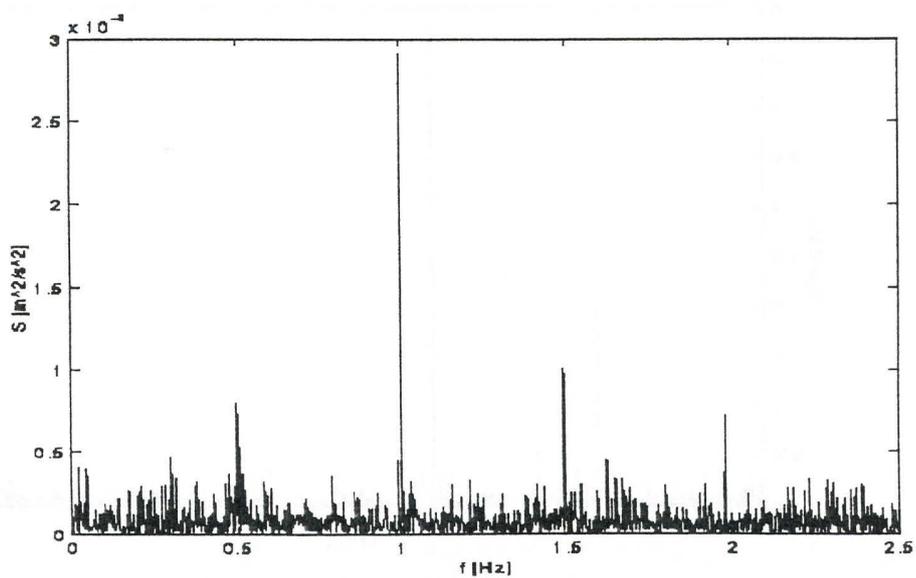


Fig. 25. Ingrandimento della fig. 24.

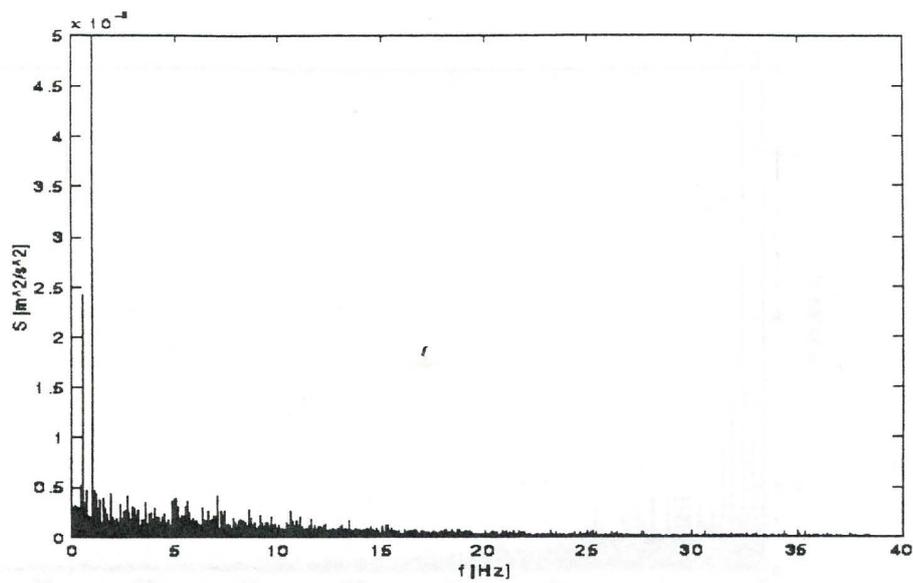


Fig. 26. Spettro di potenza delle componenti verticali di velocità per il punto di misura a distanza $x=1.0$ mm dall'asse medio del getto (conf. 1 di tab.1; $z=110$ mm).

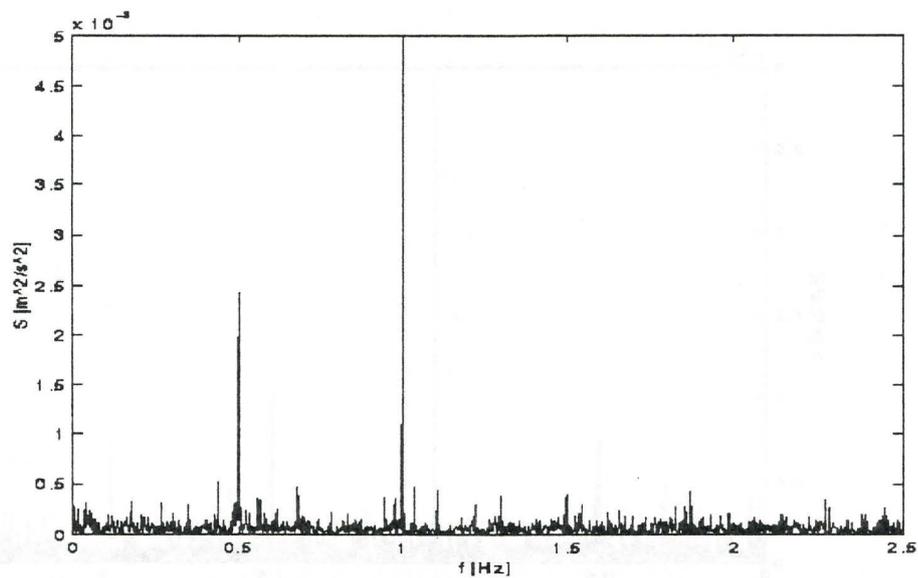


Fig. 27. Ingrandimento della fig. 26.

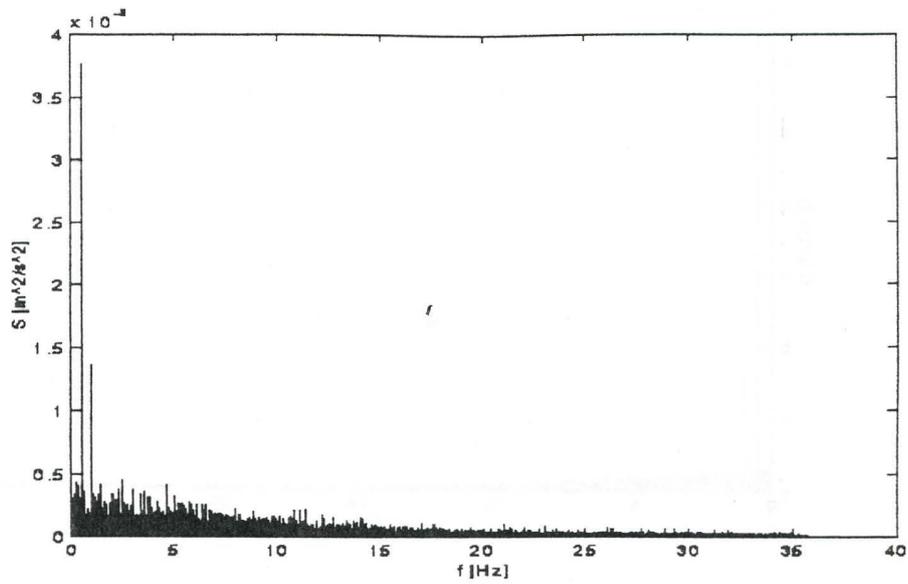


Fig. 28. Spettro di potenza delle componenti verticali di velocità per il punto di misura a distanza $x=2.0$ mm dall'asse medio del getto (conf. 1 di tab.1; $z=110$ mm).

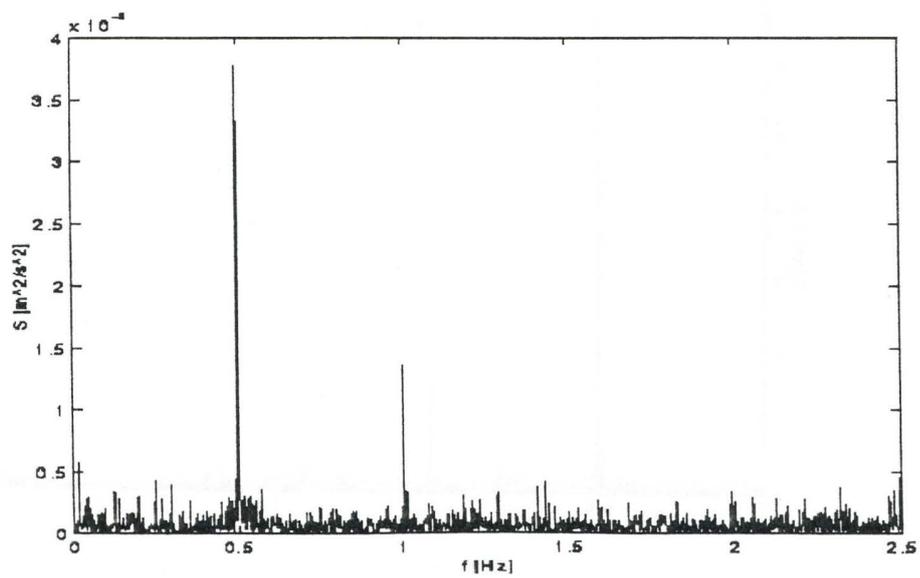


Fig. 29. Ingrandimento della fig. 28.

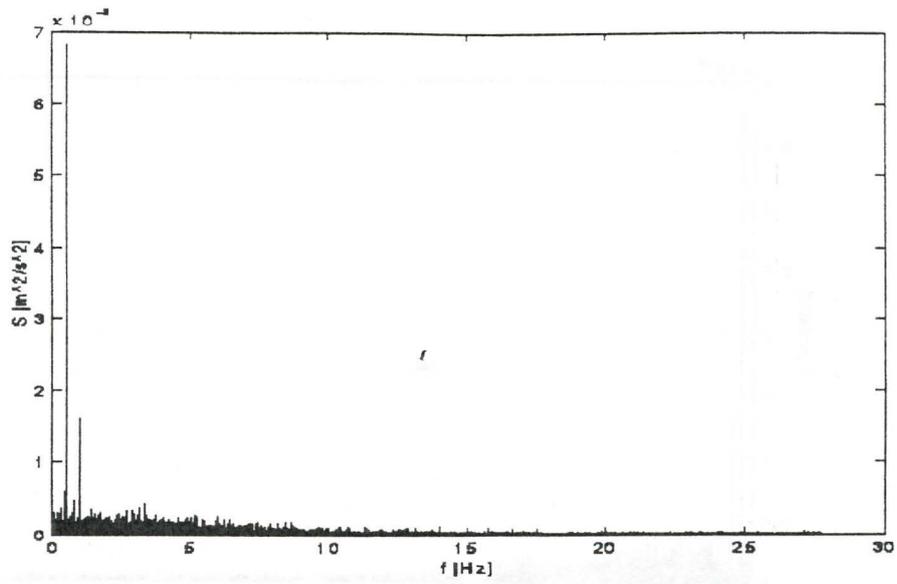


Fig. 30. Spettro di potenza delle componenti verticali di velocità per il punto di misura a distanza $x=3.0$ mm dall'asse medio del getto (conf. 1 di tab.1; $z=110$ mm).

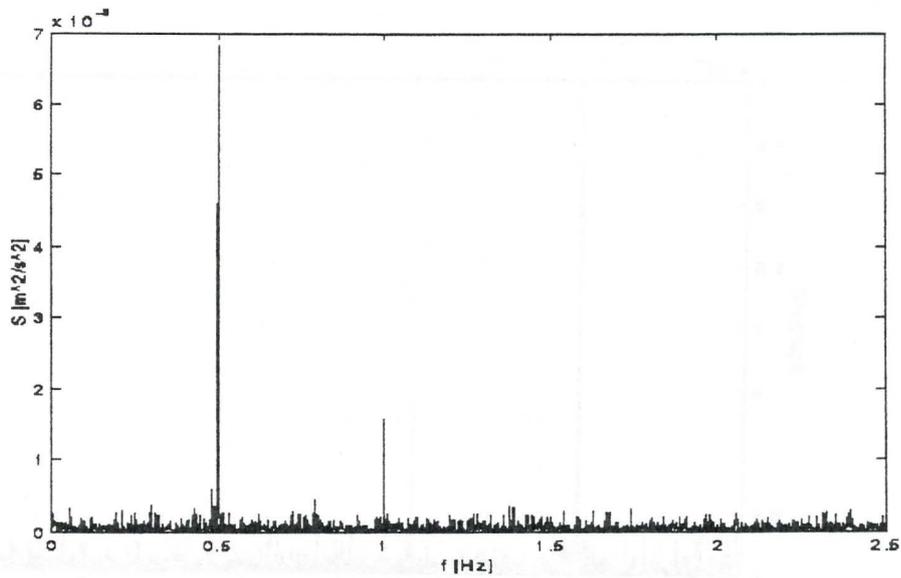


Fig. 31. Ingrandimento della fig. 30.

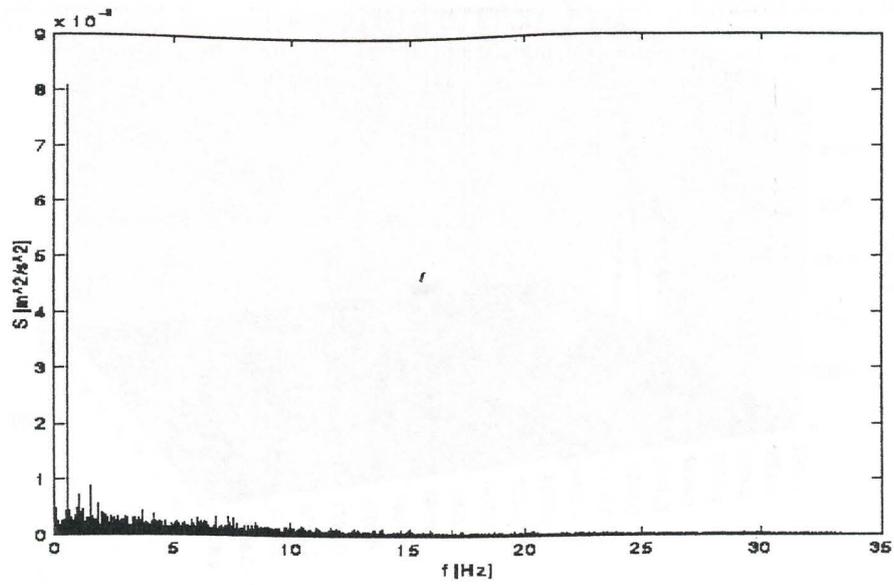


Fig. 32. Spettro di potenza delle componenti verticali di velocità per il punto di misura a distanza $x=4.0$ mm dall'asse medio del getto (conf. 1 di tab.1; $z=110$ mm).

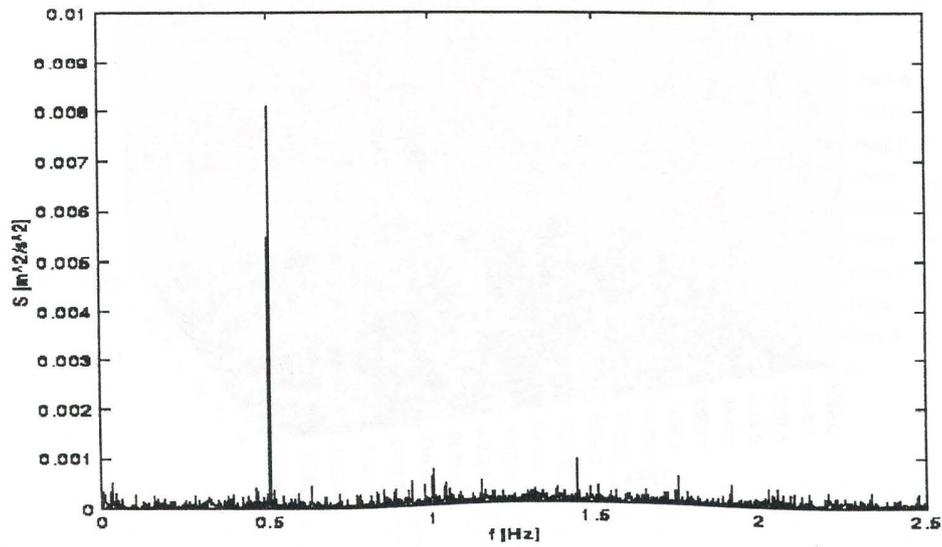


Fig. 33. Ingrandimento della fig. 32.

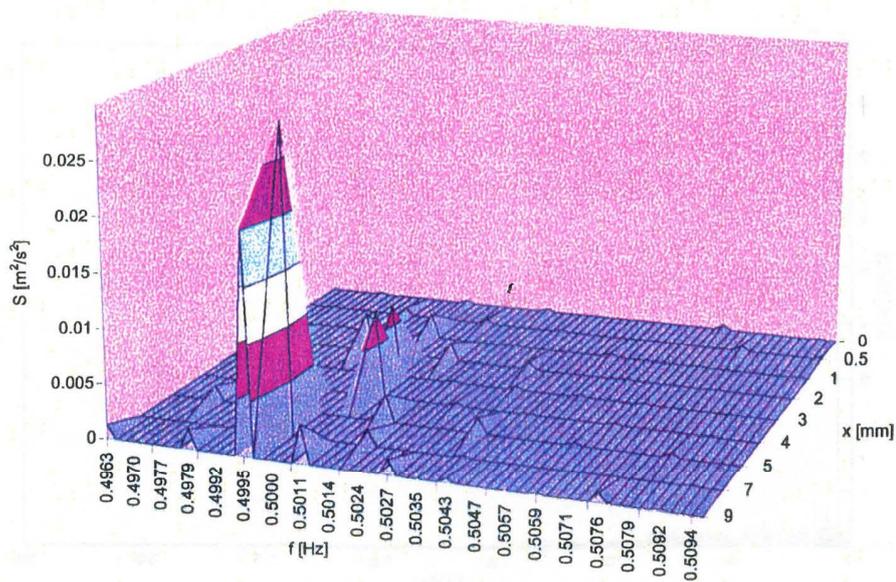


Fig. 34. Spettri di potenza delle componenti verticali di velocità, in un intorno della frequenza 0.5 Hz, al variare della distanza x dall'asse medio (conf. 1 di tab. 1; $z=110$ mm).

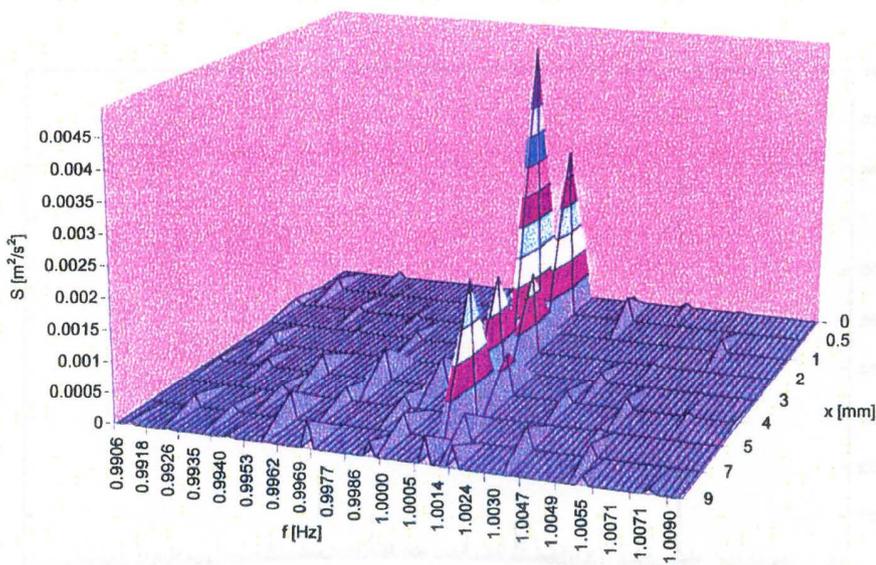


Fig. 35. Spettri di potenza delle componenti verticali di velocità, in un intorno della frequenza 1.0 Hz, al variare della distanza x dall'asse medio (conf. 1 di tab. 1; $z=110$ mm).

vedano le figg. 18-23) sono diverse a seconda del punto di misura preso in considerazione.

Pur nella complessità del fenomeno, che richiederebbe indubbiamente ulteriori analisi, gli studi fin qui condotti (Koole e Swan, 1994; Calabrese, 1995; Mossa, 1996a) avallano l'esistenza di uno scambio energetico tra il campo di moto del getto e quello delle onde.

5. ANALOGIA CON IL CASO DEI GETTI ECCITATI CON MEZZI MECCANICI VIBRANTI

Alcuni autori (Crow e Champagne, 1971; Hasan e Hussain, 1982; Hussain e Zaman, 1991) eccitarono i getti da loro analizzati con sistemi meccanici vibranti o con dispositivi che favorissero la formazione di strutture idrodinamiche coerenti a frequenze predeterminate. Tali ricercatori hanno rilevato che i disturbi indotti nel campo di velocità dei getti, tendono ad essere amplificati in misura maggiore o minore in funzione del numero di Strouhal $St_D = fD/U_e$, essendo f la frequenza del disturbo, D il diametro di uscita del getto e U_e la velocità di immissione dello stesso nell'ambiente esterno. Hasan e Hussain (1982) misero in evidenza una dipendenza del fenomeno anche dal numero di Reynolds e dalle condizioni di efflusso del getto.

Tutti i ricercatori che hanno indagato sui getti eccitati artificialmente concordano nell'affermare che esistono delle frequenze preferite di eccitazione. In tal caso i disturbi provocati danno luogo a significativi cambiamenti del comportamento dei getti.

In particolare, sia per i getti eccitati artificialmente che per quelli interagenti con le onde, sono evidenti, rispetto ai medesimi getti non eccitati e immessi in un campo di fluido in quiete, le seguenti caratteristiche:

- 1) diminuzione della velocità media in asse;
- 2) maggiore allargamento della sezione trasversale;
- 3) incremento dell'intensità di turbolenza.

In particolare Hasan e Hussain (1982) e Pulci Doria e Taglialatela (1989) osservarono che l'eccitazione di un getto provoca un aumento della portata rispetto al caso dello stesso getto non eccitato. In fig. 36 (tratta da Hasan e Hussain, 1982) si confrontano i valori di portata Q , adimensionalizzati con la

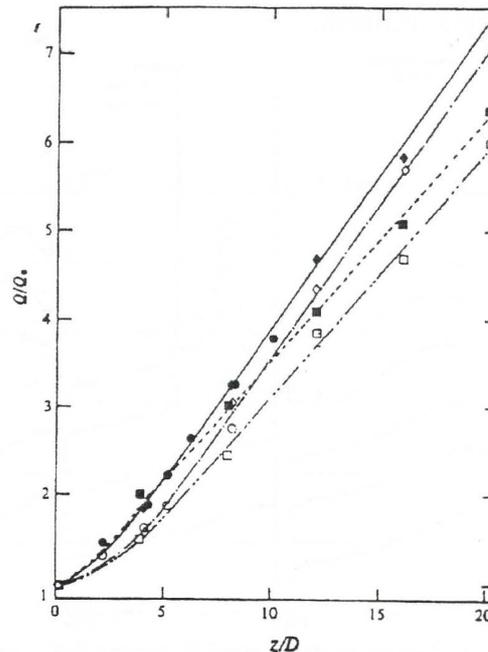


Fig. 36. Andamento della portata in funzione della distanza dall'ugello. Casi: \diamond $D=2.54$ cm; \square $D=7.62$ cm; \circ (Crow e Champagne, 1971). Da Hasan e Hussain (1982).

portata di efflusso Q_e , calcolati in alcune sezioni trasversali di getti non eccitati (simboli bianchi) e dei medesimi getti eccitati (simboli neri). Gli autori, che riportano anche i risultati di *Crow e Champagne (1971)*, ritengono che l'eccitazione dei getti analizzati, provochi un aumento di portata, definito, tuttavia, "non notevole".

Per quanto riguarda l'evoluzione degli spettri di potenza delle componenti longitudinali di velocità dei getti eccitati, Hasan e Hussain osservano la presenza di un picco dominante a frequenza analoga a quella di eccitazione. Inoltre gli autori mettono in evidenza una dipendenza degli spettri dal numero di Strouhal. A tal riguardo si veda la *fig. 37*, in cui con L_p si indica la lunghezza del tubo da cui il getto effluiva.

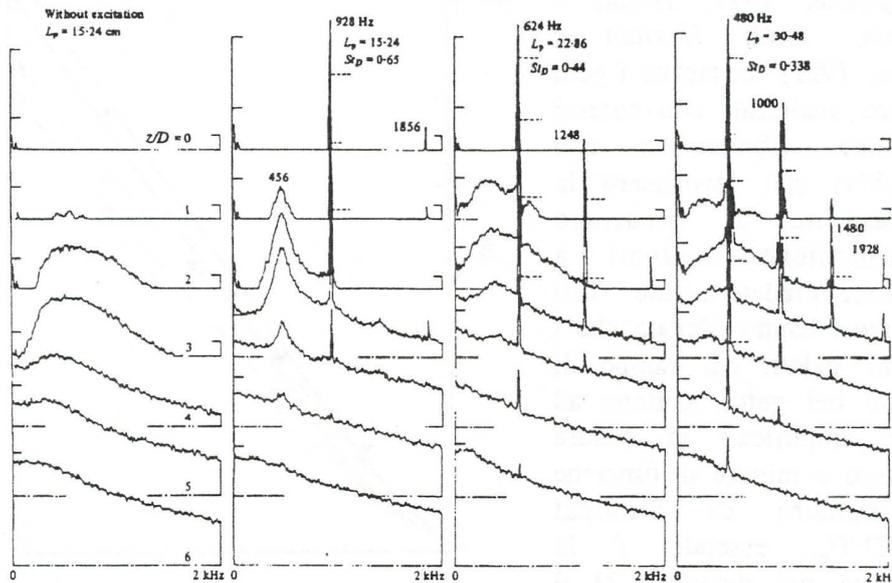


Fig. 37. Evoluzione degli spettri di potenza delle componenti longitudinali di velocità. Da Hasan e Hussain (1982).

Si osserva, dunque, che l'eccitazione meccanica dei getti, provoca, almeno in termini macroscopici, una variazione del campo idrodinamico simile, per alcuni aspetti, a quello messo in evidenza nell'ambito di questo lavoro. In entrambi i casi è possibile parlare di un *sistema forzante esterno (forcing jets)*.

6. CONCLUSIONI

Nel presente lavoro si riportano alcuni risultati di una ricerca svolta nell'ambito del corso di Dottorato di Ricerca in Ingegneria Idraulica per l'Ambiente e il Territorio (VIII ciclo del consorzio tra l'Università della Calabria, il Politecnico di Bari, l'Università di Potenza e l'Università di Salerno) avente per tema l'analisi dell'interazione dei getti con un campo di moto ondoso.

Per uno studio qualitativo dei getti si è utilizzata una tecnica di visualizzazione dei flussi, facendo uso di Rodamina B. Questo ha consentito di evidenziare tre distinte regioni di diffusione di un getto interagente con le onde: *regione di flessione, regione di transizione e regione di getto sviluppato*. Nella *regione di flessione* si è osservato che il getto è dominato dalla sua quantità di moto. In questa zona le immagini hanno mostrato che, in presenza di un campo

di moto ondoso, si ha una periodica oscillazione del getto, il quale conserva una sua *identità*, per la *rigidezza* che lo caratterizza. Nella *regione di getto sviluppato*, il fluido ambiente è assoggettato ad un meccanismo di *attrazione* del getto, in virtù della presenza del moto ondoso e successivo *intrappolamento*, per effetto della flessione periodica (fenomeno di *wave tractive mechanism*, secondo Chyan e Hwung, 1993). Il risultato combinato di questa azione di flessione del getto e di presenza del moto ondoso è quello di consentire ad una massa non trascurabile del fluido ambiente di riversarsi nella zona centrale del getto, dando luogo ad un maggior allargamento delle sezioni trasversali, rispetto al caso di immissione in acqua ferma. Si osserva che nella *regione di getto sviluppato*, il getto stesso perde parte della sua *rigidezza* ed è maggiormente soggetto ai meccanismi di intrusione propri della presenza del moto ondoso.

L'analisi spettrale delle componenti longitudinali e trasversali di velocità dei getti interagenti con un campo di moto ondoso ha avallato queste considerazioni. Infatti, relativamente alle sezioni prossime all'ugello, si osserva che, per i punti di misura posti sull'asse medio del getto o poco discosti da esso, gli spettri di potenza non presentano dei picchi a frequenze particolari. Viceversa, allontanandosi dall'asse medio, gli spettri sono caratterizzati da un picco dominante a frequenza uguale a quella del moto ondoso.

Per quanto riguarda le sezioni trasversali a maggiore distanza dall'ugello, invece, gli spettri di potenza presentano un picco principale a frequenza uguale a quella del moto ondoso in ogni punto di una sezione trasversale (*regione di getto sviluppato*) o con la sola eccezione dei punti prossimi all'asse medio (*regione di transizione*).

Si è rilevata, inoltre, un'analogia in alcuni comportamenti macroscopici tra i getti interagenti con un campo di moto ondoso e quelli eccitati artificialmente con mezzi meccanici.

In entrambi i casi, infatti, i *disturbi* provocati danno luogo a significativi cambiamenti del comportamento dei getti (*forced jets*). In particolare sia per i getti eccitati artificialmente che per quelli interagenti con le onde sono evidenti le seguenti caratteristiche peculiari, rispetto ai medesimi getti non eccitati e immessi in un ambiente esterno in quiete:

- 1) diminuzione della velocità media in asse;
- 2) maggiore allargamento della sezione trasversale;
- 3) incremento dell'intensità di turbolenza.

La complessità del campo idrodinamico analizzato, come affermato da Chyan e Hwung (1993), richiede, tuttavia, un ulteriore approfondimento delle tematiche trattate, osservando tra l'altro che la loro conoscenza è particolarmente interessante ai fini di un miglioramento del processo di diffusione dei getti e di diluizione del soluto da essi trasportato.

BIBLIOGRAFIA

- Abraham G. (1963), *Jet diffusion in stagnant ambient fluid*, Delft Hydraulics Publication No. 29, Delft, The Netherlands.
- Abraham G. (1967), *Jets with negative buoyancy in homogeneous fluid*, IAHR, Jour. of Hydr. Res., Vol. 5, no. 4.
- Benfratello G. (1988), *Scarichi sottomarini; aspetti idraulici: fenomeni di diffusione*, A.I.I. Sez. Campana; Convegno sul tema: Immissione di acque reflue in mare, maggio.

- Calabrese M., Di Natale M. (1994), *Diffusione di un getto liquido sommerso in presenza di un moto ondoso stazionario*, XXIV Conv. di Idr. e Costr. Idrauliche, Napoli, settembre 20-22.
- Calabrese M. (1995), *Modificazioni degli spettri di potenza di un getto turbolento indotti da un moto ondoso progressivo*, XII Congresso Nazionale AIMETA, Napoli, 3-6 ottobre.
- Chin D.A. (1987), *Influence of surface waves on outfall dilution*, ASCE, Jour. of Hydr. Eng., Vol. 113, No. 8, August.
- Chin D.A. (1988), *Model of buoyant-jet-surface-wave interaction*, ASCE, Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, vol. 114, No. 3, May.
- Chyan J.M., Hwung H.H. (1993), *On the interaction of a turbulent jet with waves*, IAHR, Jour. of Hydr. Res., Vol. 31, no. 6.
- Citrini D. (1946), *Ricerca sperimentale sulla diffusione di una vena liquida effluente in un campo di liquido in quiete (prime serie di prove)*, L'Energia Elettrica, agosto.
- Citrini D. (1946), *Diffusione di una vena fluida effluente in campo di fluido in quiete (premessa ad una ricerca sperimentale)*, L'Energia Elettrica, vol. XXIII, aprile.
- Crow S.C., Champagne F.H. (1971), *Orderly structure in jet turbulence*, J. Fluid Mech., vol. 48, part 3.
- Damiani L., Mossa M. (1996), *Indagine sul campo di moto di un'onda regolare*, Giornate di Studio in Ricordo di Mario Ippolito, Napoli, 16-17 maggio.
- Davydov L. (1989), *The role of surface waves in the transport of pollutants*, XII Congr. IAHR, Ottawa, Canada, August 21-25.
- Di Natale M. (1990), *Diluizione nella fase di risalita di un getto sottomarino in presenza di moto ondoso*, XXII Conv. Idraulica e Costr. Idrauliche, Cosenza, 4-7 ottobre.
- Di Silvio G. (1970), *Indagine sperimentale sulle condizioni di similitudine di grossi getti liquidi liberamente effluenti*, L'Energia Elettrica, n.5.
- Fan L.N., Brooks N.H. (1969), *Numerical solutions of turbulent buoyant jet problems*, report No. KH-R-18, W.M. Keck Lab. of Hydr. and Water Resour., California Institute of Technology, Pasadena, USA.
- Fisher H.B., List E.J., Koh R.C.Y., Imberger J., Brooks N.H. (1979), *Mixing in inland and coastal waters*, Academic Press.
- Koole R., Swan C. (1994), *Measurements of a 2-D non-buoyant jet in a wave environment*, Coastal Engineering 24.
- Ger A.M. (1979), *Wave effects on submerged buoyant jets*, Proc. 18th Congress Int. Ass. Hydr. Res..
- Hasan M.A.Z., Hussain A.K.M.F. (1982), *The self-excited axisymmetric jet*, J. Fluid Mech., vol. 115.
- Hussain K.M.F., Reynolds W.C. (1970), *The mechanics of an organized wave in turbulent shear flow*, J. of Fluid Mech., Vol. 41, part 2.
- Hussain A.K.M.F., Zaman K.B.M.Q. (1981), *The 'preferred mode' of the axisymmetric jet*, J. Fluid Mech., vol. 110.
- Lamberti A., Petrillo A., Ranieri M. (1988), *Sulla generazione ed il rilievo di onde casuali in canaletta bidimensionale*, Idrotecnica, n. 1, gennaio-febbraio.
- Mossa M. (1996a), *Diffusione di un getto in un campo di liquido in quiete o in moto ondoso*, Tesi di Dottorato di Ricerca in Ingegneria Idraulica per l'Ambiente e il Territorio (VIII ciclo), consorzio: Università della Calabria, Politecnico di Bari, Università della Basilicata, Università di Salerno.
- Mossa M. (1996b), *Campo di moto generato da un getto in presenza di moto ondoso*, XXV Convegno Nazionale di Idraulica e Costruzioni Idrauliche, Torino, 16-18 settembre.
- Papanicolaou P.N., List E.J. (1988), *Investigation of round vertical turbulent buoyant jets*, J. Fluid Mech., Vol. 195.
- Pedersen F.B. (1986), *Environmental hydraulics: stratified flows - lecture notes on coastal and estuarine studies*, Springer Verlag, Berlino, Germania.
- Petrillo A. (1988), *Diffusione di getti d'acqua circolari turbolenti in aria*, L'Energia Elettrica,

n.5, Vol. LXV.

- Pulci Doria G., Tagliatela L. (1989), *Strutture coerenti nella diffusione di getti: ugelli e luci a spigolo vivo*, Associazione Idrotecnica Italiana - Sez. Campana, Convegno sul tema "Immissione di acque reflue in mare", Ischia, 10-12 maggio.
- Rajaratnam N. (1976), *Turbulent jets*, Elsevier Scientific Publishing Company.
- Shuto N., Ti L.H. (1974), *Wave effects on buoyant plumes*, proc. 14th Coastal Eng. Conf.
- Winiarski L.D., Frick W.E. (1978), *Methods of improving plume models*, Presented at Conf. on Cooling Tower Environ., Univ. of Maryland, College Park, Md.
- Wood I.R., Bell R.G., Wilkinson D.L. (1993), *Ocean disposal of wastewater*, Advanced Series on Ocean Engineering, vol. 8, World Scientific.
- Wynansky I., Fiedler H. (1969), *Some measurements in the self-preserving jet*, J. Fluid Mech., Vol. 38.