

16. DESCRIZIONE QUALITATIVA DEI GETTI CON VISUALIZZAZIONE DEL FLUSSO.

Come è stato già messo in evidenza nel cap. 14, alcune prove consistevano nella visualizzazione dei getti facendo uso di Rodamina B.

Le analisi riguardano sia i getti in acqua ferma sia i getti con presenza di moto ondoso.

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

Per quanto attiene i getti immessi in un campo di liquido in quiete, si riporta in fig. 16.1.1, un'immagine istantanea di un getto con portata di 80 l/h fuoriuscente da un orifizio di diametro 2.1 mm.

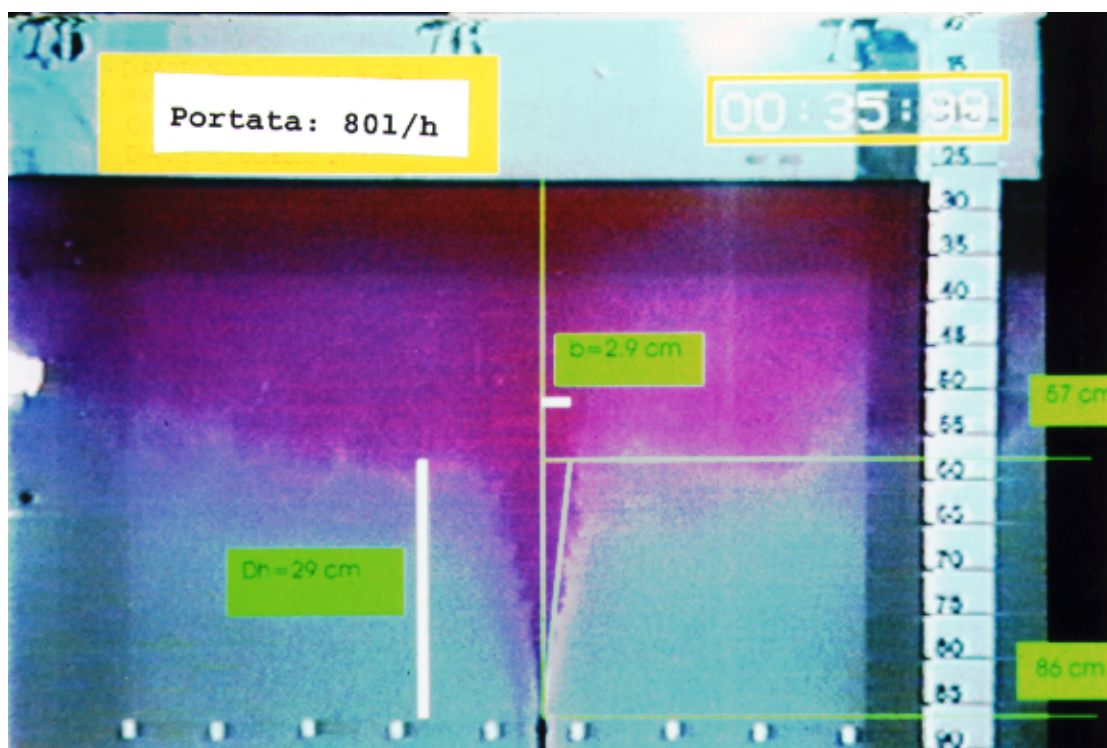


Fig. 16.1.1. Getto immesso in acqua ferma con portata di 80 l/h; diametro dell'ugello D02, 1 mm.

Nel seguito si farà riferimento al caso di un getto immesso 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 un regione di flusso di ricaduta del tipo riportato in fig. 16.1.2, caratterizzata da un coefficiente di intrusione 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. 16.1.3.

Nel caso analizzato per questa ricerca, in cui la densità del getto è sostanzialmente analoga a quella del fluido ambiente, la situazione è intermedia rispetto ai due casi rappresentati nelle figg. 16.1.2-3.

Nell'immagine di fig. 16.1.1 si è riportato l'andamento della scala della lunghezze b , definita con la prima delle (5.4.1). 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 perché l'immagine è riferita ad un istante (e non alla media relativa ad un opportuno intervallo di tempo), sia perché non è possibile ricavare dalla stessa immagine, con le apparecchiature attualmente disponibili,

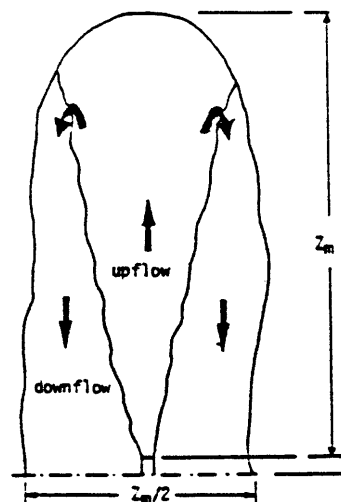


Fig. 16.1.2. Tipico campo di moto di un getto con densità maggiore del fluido ambiente.

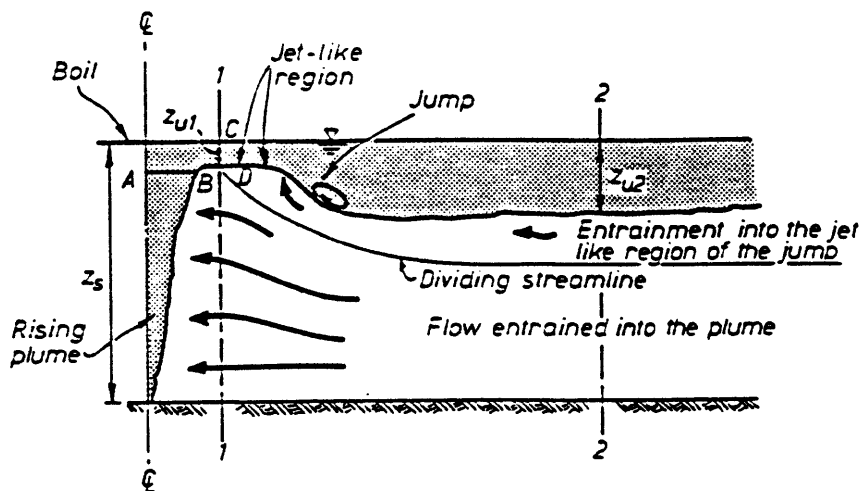


Fig. 16.1.3. Tipico campo di moto di un getto con densità minore del fluido ambiente.

delle informazioni quantitative sul campo di velocità.

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

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

Per quanto attiene il caso di un getto effluente in un fluido ambiente in moto ondoso, si può far riferimento alle figg. 16.2.1-5. In particolare la fig. 16.2.1 rappresenta un getto con portata all'orifizio di 80 l/h, immesso in un campo di liquido in quiete, dopo 25.00 sec dall'apertura della valvola. Le figg. 16.2.2-5 rappresentano lo stesso getto, a partire dallo stesso istante, immesso in un capo di liquido in moto ondoso con periodo uguale a 2 s e altezza uguale a 4 cm. La profondità dell'acqua in canale era di 80 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 profondità z .

Analogamente la fig. 16.2.6 rappresenta un getto con portata all'orifizio di 20 l/h, immesso in un campo di liquido in quiete. Le figg. 16.2.7-10 rappresentano lo stesso getto, a partire dallo stesso istante, immesso in un capo 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 benefico dovuto alla presenza del campo di moto ondoso. Infatti l'analisi di ciascuna immagine istantanea, relativa al caso dei getti interagenti con le onde, mette in evidenza un allargamento delle sezioni trasversali più marcato rispetto al caso dello stesso getto immesso in acqua ferma. Questa considerazione è particolarmente interessante, poiché consente di affermare che il processo di intrusione 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, si osserva che il comportamento oscillante di un getto interagente con un campo di moto ondoso non è comparabile con quello di una piuma. Si ricorda (si veda il cap. 6) che, nel caso delle piume, le analisi euleriane del campo di moto inducono a ritenere che il coefficiente di intrusione sia $5/3$ di quello di un getto. Secondo

Pedersen (1986), tale conclusione è errata. Un'analisi lagrangiana delle piume, secondo lo

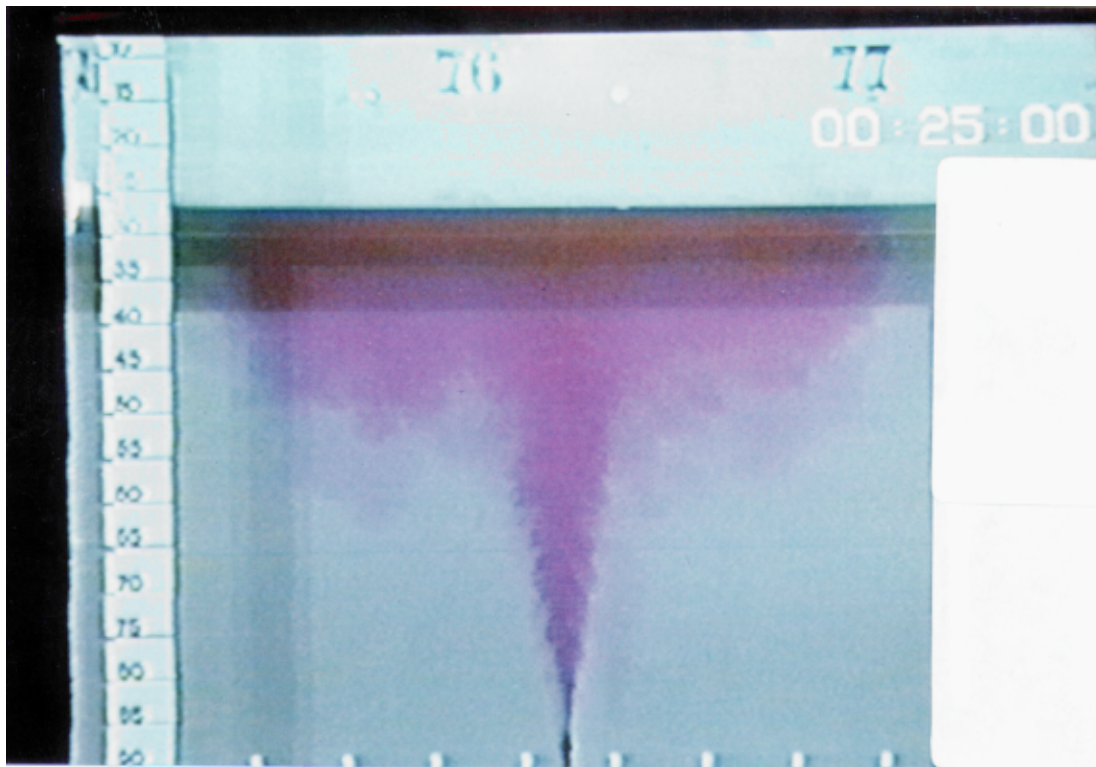


Fig. 16.2.1. *Getto immesso in un campo di liquido in quiete con portata di 80l/h.*

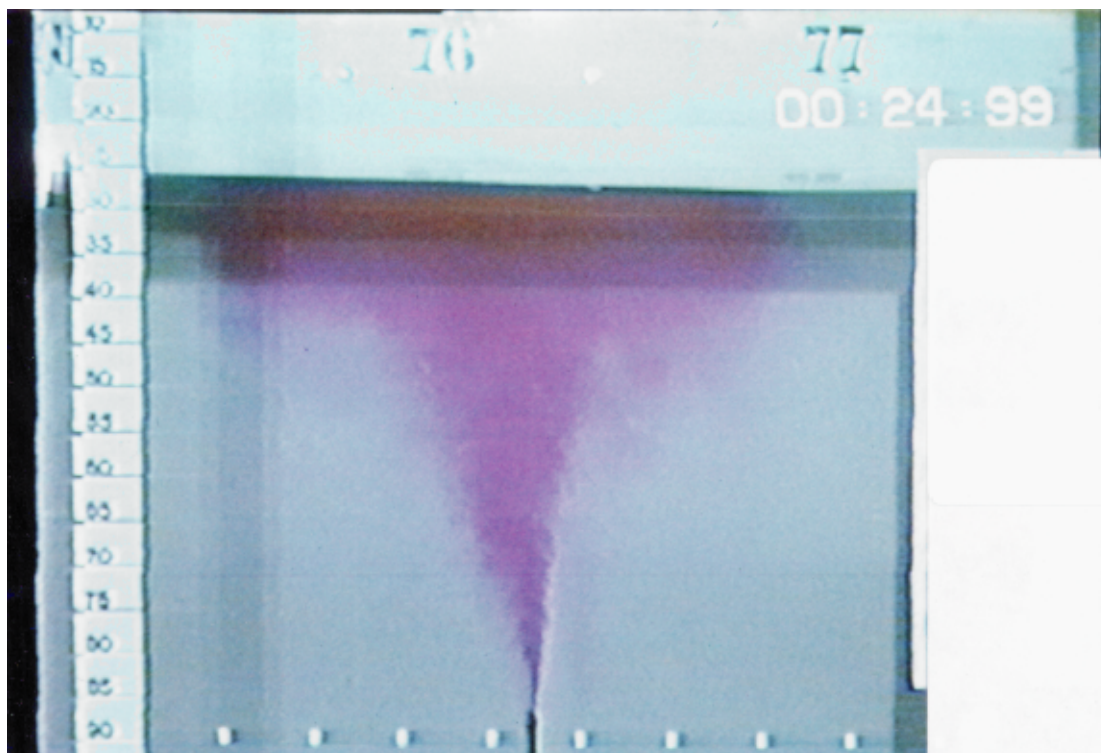


Fig. 16.2.2. *Getto immesso in un campo di liquido in moto ondoso con portata di 80l/h; $t=24.99$ s.*

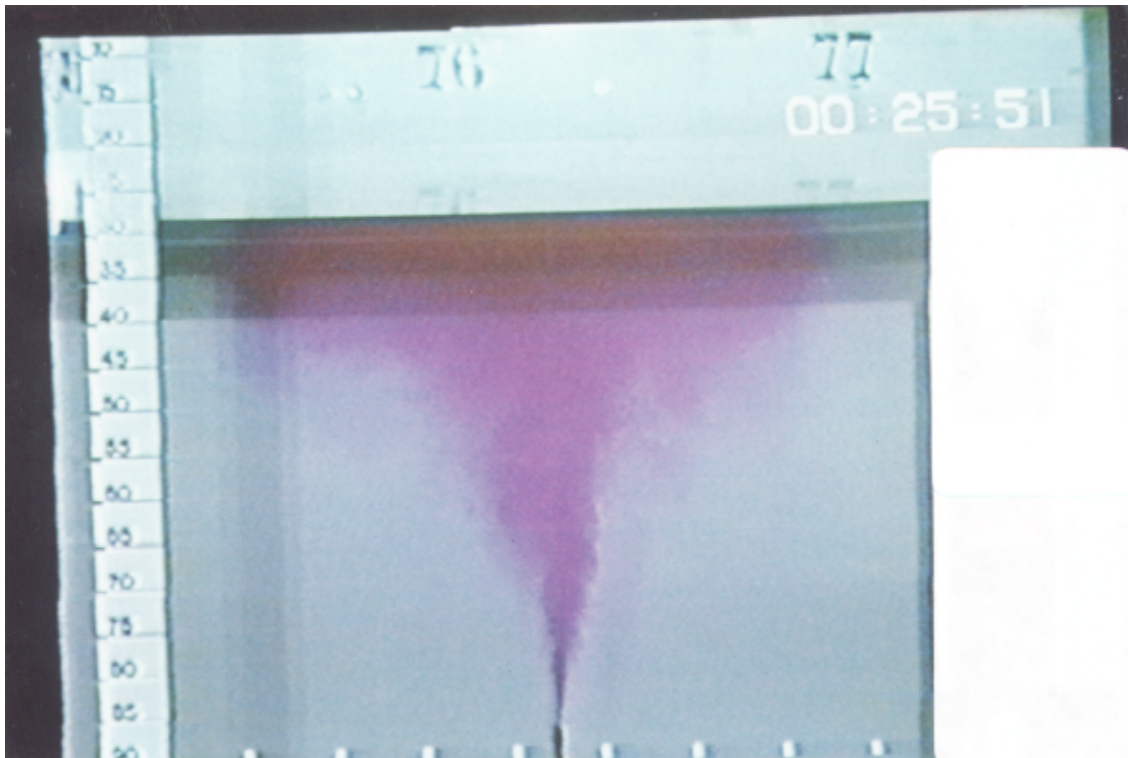


Fig. 16.2.3. *Getto immerso in un campo di liquido in moto ondoso con portata di 80l/h; $t=25.51$ s.*

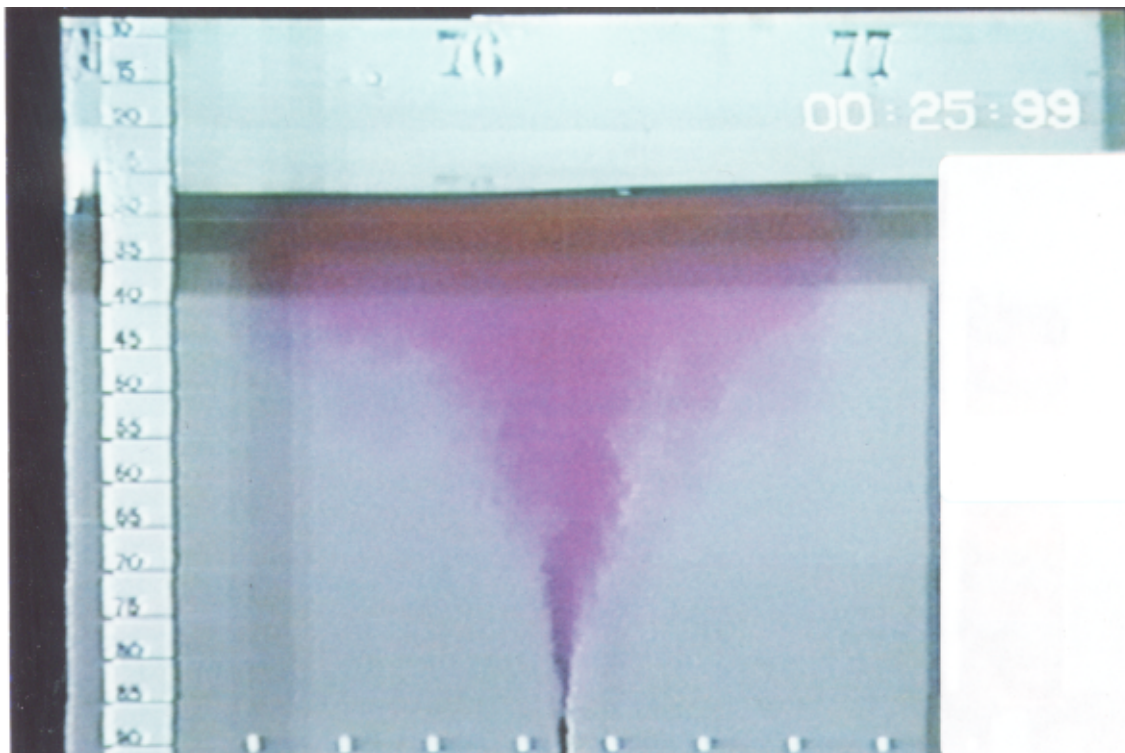


Fig. 16.2.4. *Getto immerso in un campo di liquido in moto ondoso con portata di 80l/h; $t=25.99$ s.*

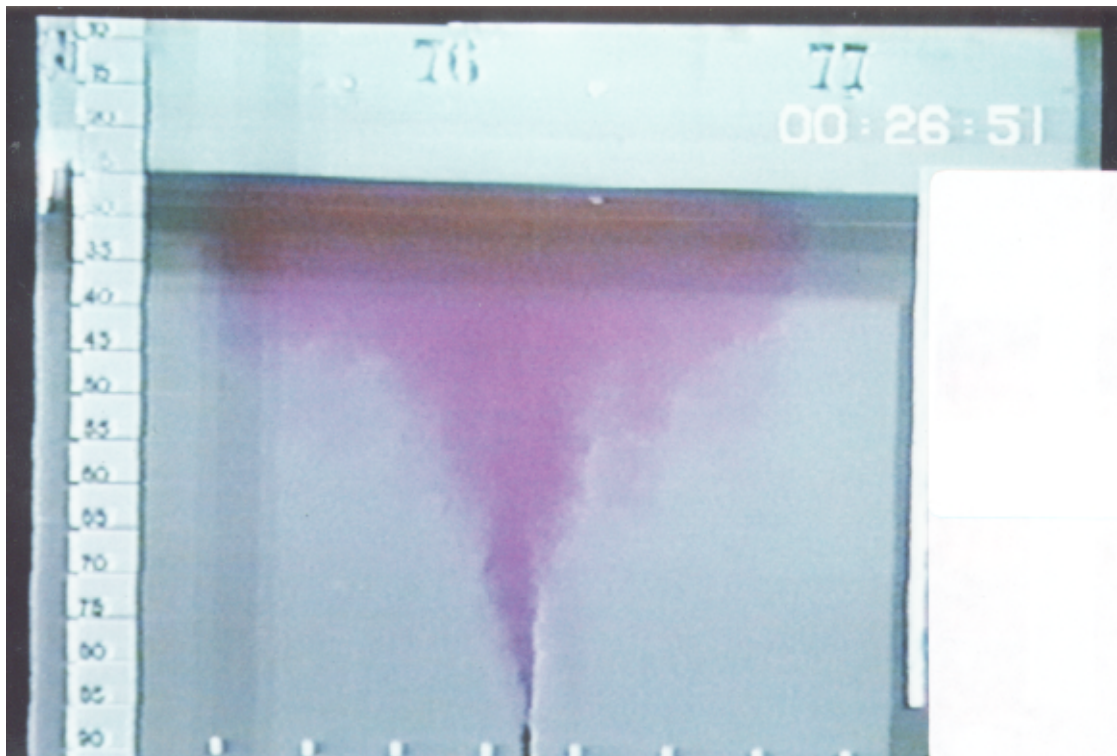


Fig. 16.2.5. Getto immesso in un campo di liquido in quiete con portata di 80l/h; $t=26.51$ s.

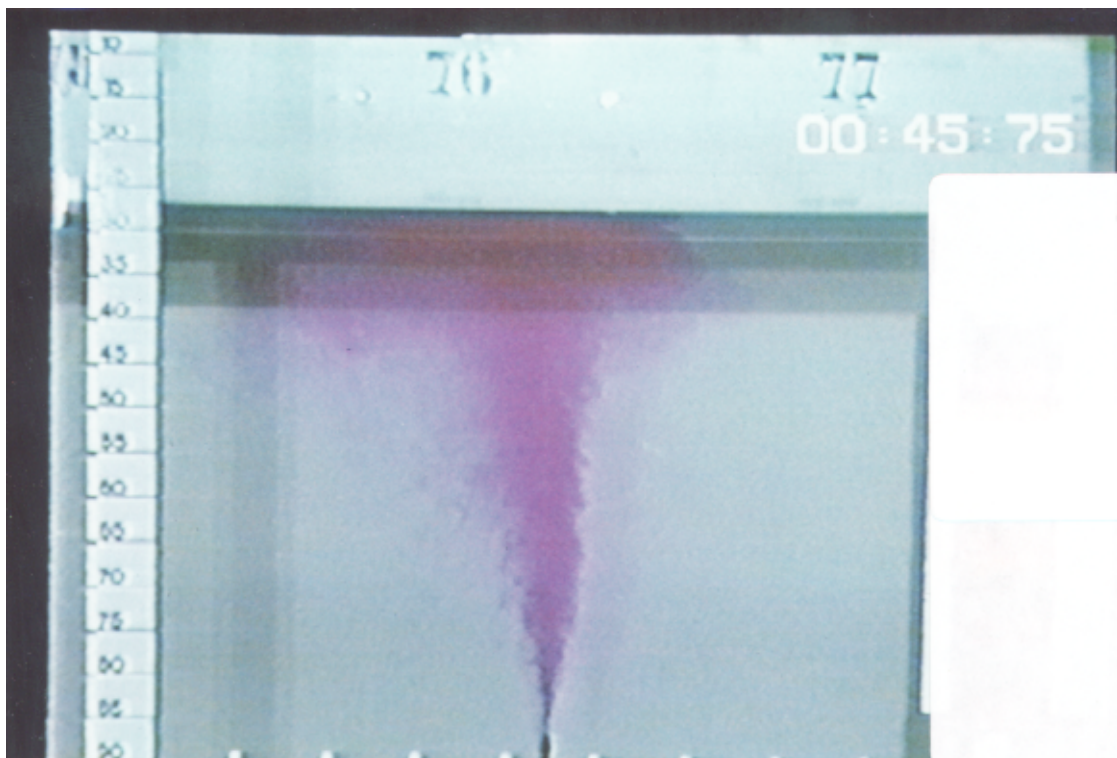


Fig. 16.2.6. Getto immesso in un campo di liquido in quiete con portata di 20l/h.

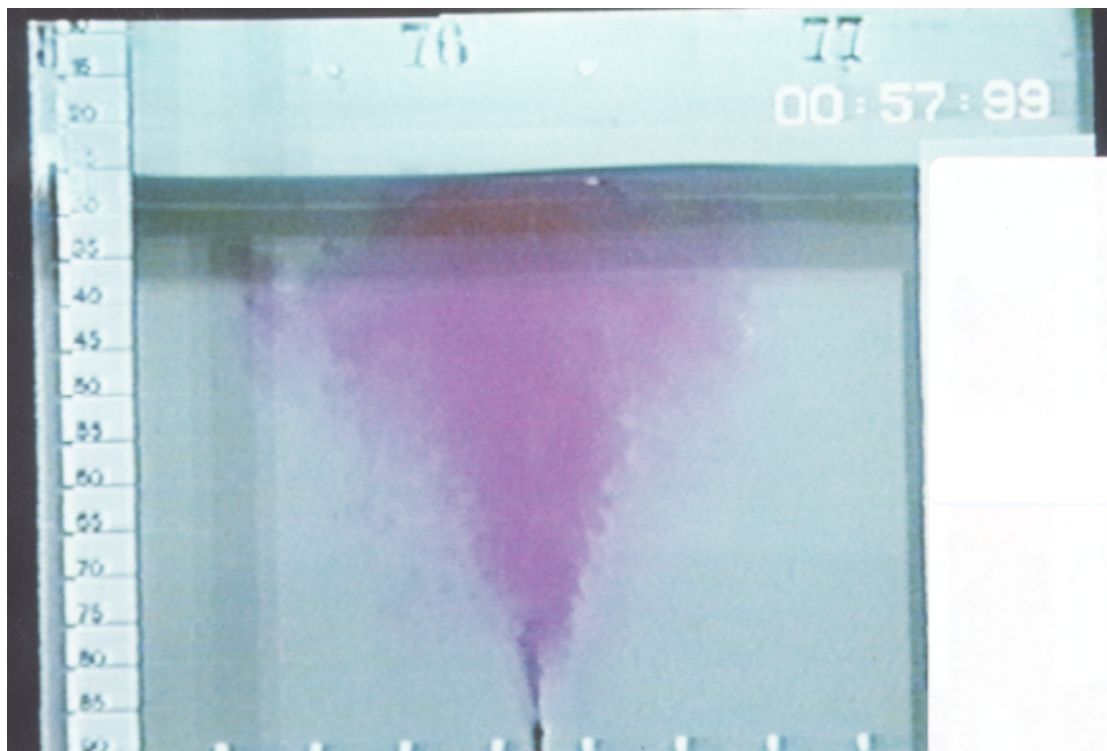


Fig. 16.2.7. Getto immesso in un campo di liquido in moto ondoso con portata di 20l/h; $t=57.99$ s.

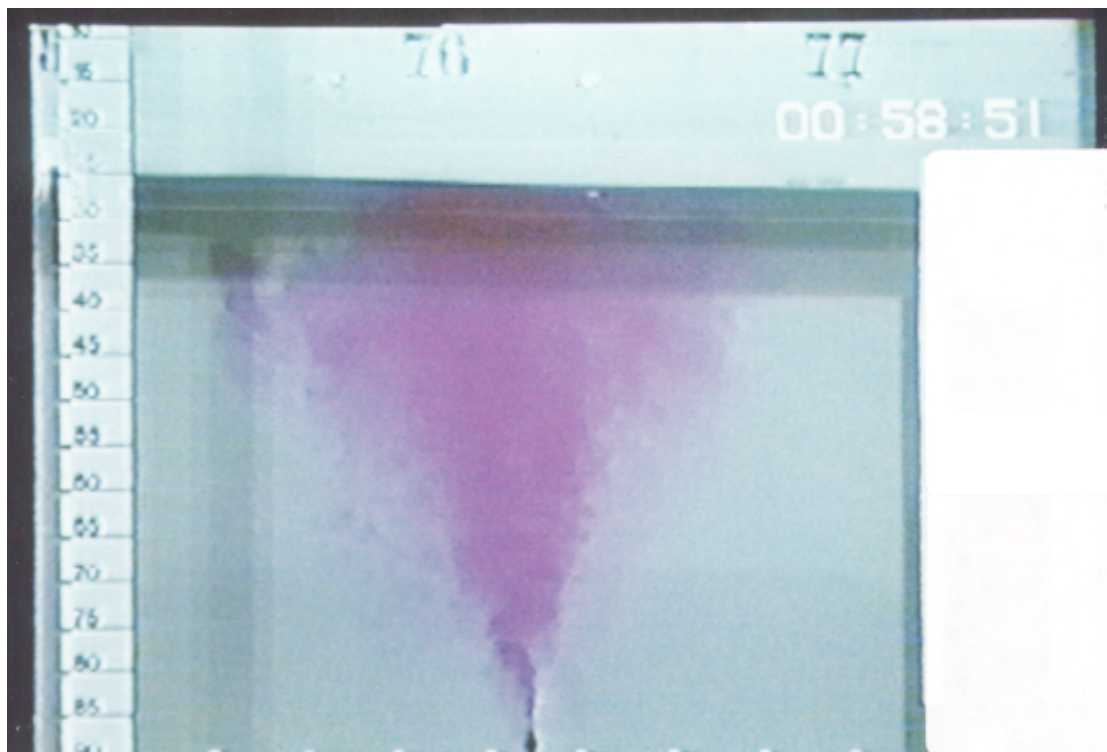


Fig. 16.2.8. Getto immesso in un campo di liquido in moto ondoso con portata di 20l/h; $t=58.51$ s.

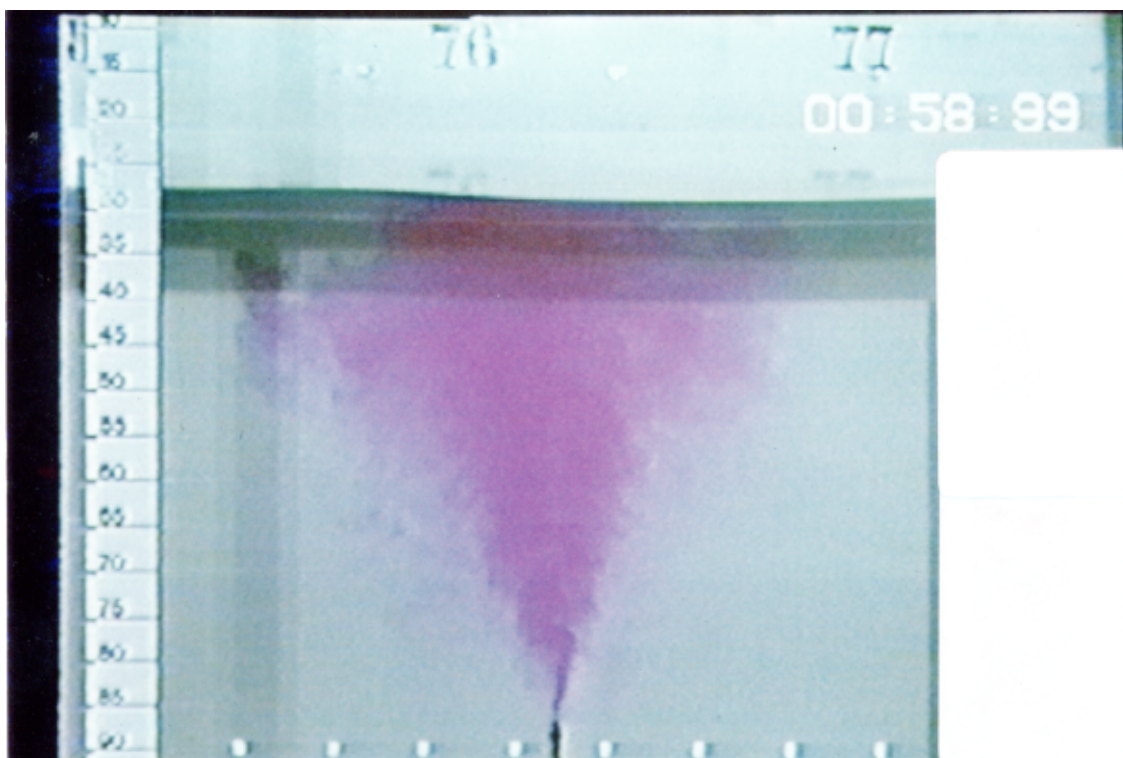


Fig. 16.2.1. Getto immesso in un campo di liquido in moto ondoso con portata di 20l/h; $t=58.99$ s.

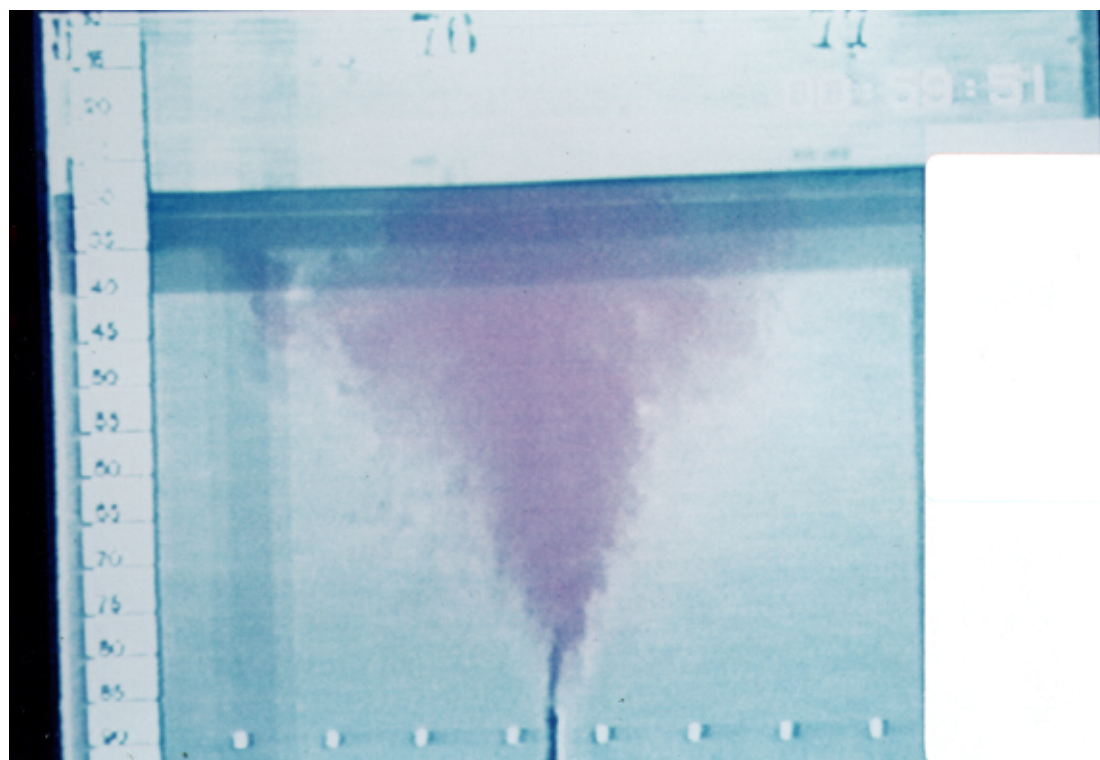


Fig. 16.2.2. Getto immesso in un campo di liquido in moto ondoso con portata di 20l/h; $t=59.51$ s.

tesso autore, metterebbe in evidenza la loro tendenza ad oscillare e, quindi, a dar luogo a delle erronee interpretazioni comparative rispetto al caso di un getto.

Le immagini delle figg. 16.2.2-5 e 16.2.7-10 mettono anch'esse in evidenza un comportamento oscillatorio del getto immesso 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 i parametri, così come avverrebbe per le piume.

E' evidente 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 in moto 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 o, quanto 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. 16.2.2-5 e 16.2.7-10 hanno consentito di confermare le ipotesi avanzate da Chyan e Hwung (1993). Ossia, 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, si osserva che 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, metaforicamente, la sua *identità*, in virtù della *rigidezza* 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 orizzontali 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 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, condotti nell'ambito di questa ricerca. Questi diagrammi, che verranno mostrati nel par. 19.1, sono relativi a un getto interagente con un campo di moto ondoso. Tali diagrammi, confrontati con quelli corrispondenti al caso dello stesso getto immesso in un campo di liquido in quiete, evidenziano, per la regione di flessione, un appiattimento dei profili di velocità e una sostanziale uguaglianza dei valori di allargamento delle sezioni trasversali. Alla luce di tali considerazioni, dunque, è possibile affermare che, in vicinanza dell'ugello, il getto si comporta come un corpo rigido sottoposto alle oscillazioni impresse dal fluido ambiente.

Nella regione di transizione e 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 transizione e 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, secondo Chyan e Hwung (1993), si affianca al classico meccanismo di intrusione di un getto in acqua ferma. 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.

Si ritiene che il fenomeno descritto da Chyan e Hwung (1993) possa essere interpretato alla luce delle seguenti considerazioni. Nelle regioni di transizione e di getto sviluppato, le sezioni trasversali di un getto sono maggiori 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 paralleli all'asse medio del getto, in modo da ottenere delle porzioni di flusso sufficientemente piccole perché 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, nelle regioni di transizione e di getto sviluppato, ogni punto di una fissata sezione trasversale del getto stesso non è sottoposto ad una analoga oscillazione.

Si osserva, inoltre, che nelle regioni di transizione e 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, come le considerazioni precedentemente svolte mettono in evidenza, che le interazioni di un getto con un campo di moto ondoso 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

punti antinodali (caratterizzati, come è noto, dalle sole componenti verticali di velocità), si verifica che i valori della scala delle lunghezze trasversali b non subiscono delle apprezzabili variazioni rispetto al caso di immissione in acqua ferma. Allorché il getto è ubicato in una sezione nodale (caratterizzata, come è noto da sole componenti orizzontali di velocità), i profili di velocità media locale nelle sezioni trasversali di misura risultano molto appiattiti, con una forte riduzione dei gradienti 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.

Si ritiene che le considerazioni precedenti possano 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 ambiente che si introduce nel getto". Ossia, 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 a secondo delle 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 vorticosi in direzione 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 di *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, l'incremento di vorticità legato 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 vorticosi 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*.

16.3. Processi di dispersione di un soluto in un campo di moto non stazionario: analogia con il caso di un getto interagente con un campo di moto ondoso.

Si consideri un campo di moto laminare in un sistema bidimensionale del tipo rappresentato in fig. 16.3.1. I problemi di dispersione di un soluto in un campo di moto del tipo indicato possono essere trattati analogamente al caso della diffusione molecolare unidirezionale (Fisher et al., 1979) attraverso la seguente equazione

$$\frac{\partial \bar{C}}{\partial t} + u \frac{\partial \bar{C}}{\partial x} = K \frac{\partial^2 \bar{C}}{\partial x^2} \quad (16.3.1)$$

dando, tuttavia, il giusto significato ai simboli. In particolare il sovrassegno indica una media lungo la direzione trasversale h (si veda la fig. 16.3.1) e K è un *coefficiente di dispersione longitudinale*, il cui ruolo è analogo al coefficiente D di diffusione molecolare proposto da Fick. Con l'introduzione di tale coefficiente si perviene ad un'*equazione di dispersione monodimensionale* riportata sopra.

Nel caso particolare che le pareti superiore ed inferiore di fig. 16.3.1 siano in moto con velocità rispettivamente uguale a $+U/2$ e $-U/2$, la distribuzione di velocità del fluido in moto laminare tra le piastre è data da

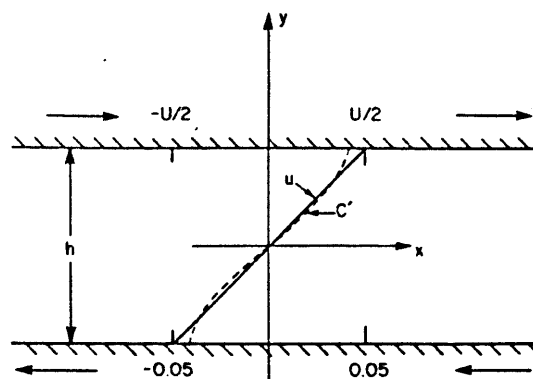


Fig. 16.3.1. Campo di moto con profilo lineare di velocità.

$$u(y) = U \frac{y}{h}.$$

In tal caso si dimostra che nella (16.3.1) va posto

$$K = \frac{U^2 h^2}{120D}.$$

Nel caso di un campo di moto non stazionario descritto dalla seguente relazione

$$u(y, t) = \frac{Uy}{h} \sin\left(\frac{2\pi t}{T}\right)$$

essendo T il periodo di oscillazione, diventa importante definire una scala temporale del processo di dispersione, di seguito riportata

$$T_c = \frac{h^2}{D}$$

definibile come il tempo minimo necessario affinché il profilo di concentrazione risenta appieno di un profilo di velocità.

Si possono distinguere, pertanto, due casi limiti

- 1) $T \gg T_c$ (dispersione analoga al caso di flusso stazionario in ogni direzione);
- 2) $T \ll T_c$ (inesistenza di dispersione legata al profilo di velocità, si veda la fig. 16.3.2).

Si osserva che per un profilo di velocità lineare e di equazione $u(y) = U \sin(\alpha)/h$, essendo α una costante, il coefficiente di dispersione è

(16.3.2)

$$K = \frac{U^2 h^2}{120D} \sin^2 \alpha.$$

Pertanto, nel caso in cui $T \gg T_c$, il coefficiente di dispersione è dato dalla media d'insieme dei valori assunti dalla (16.3.2) al variare di α . Si ottiene, dunque, il seguente coefficiente di dispersione

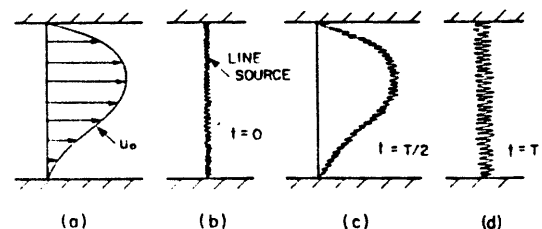


Fig. 16.3.2. Caso in cui $T \ll T_c$. (a) Distribuzione di velocità; (b) Sorgente lineare a $t=0$; (c) Distribuzione a $t=T/2$; (d) Distribuzione a $t=T$.

$$K = \frac{U^2 h^2}{240 D}.$$

Nel caso in cui $T \ll T_c$, invece, $K \rightarrow 0$. Per le situazioni intermedie si può far riferimento al diagramma di fig. 16.3.3 per quanto attiene il valore del coefficiente K da utilizzare nella (16.3.1).

Queste brevi considerazioni (si faccia riferimento a Fisher et al. (1979) per ulteriori approfondimenti) mettono in evidenza che se la frequenza secondo cui varia $u(y,t)$ è molto grande rispetto a T_c , non si verifica la dispersione.

In analogia, nel caso di un getto immerso verticalmente in un campo di liquido in moto ondoso, se la frequenza f dello stesso è molto grande rispetto ad una scala di frequenza rappresentativa di ciascuna sezione trasversale del getto ($f_t = u_m/b$, con ovvio significato dei simboli), quest'ultimo non risentirebbe del moto ondoso.

In effetti si possono distinguere due situazioni estreme:

- 1) $f \gg f_t$, in cui l'effetto del moto ondoso è praticamente nullo;
- 2) $f \ll f_t$, in cui il sistema è analogo a quello di un getto interagente con un campo di moto del fluido ambiente trasversale ad esso. Si pensi, per esempio, al caso di onde di marea o agli tsunami; è evidente che in questo caso il getto risentirebbe di tali campi di moto come se si trattasse di correnti trasversali.

Le situazioni intermedie, di gran lunga più frequenti, sono quelle che si intendono trattare nell'ambito di questa tesi.

Le considerazioni qui proposte mettono in evidenza l'importanza delle scale che intervengono in un fenomeno affinché di esso si possa dare una valutazione in termini qualitativi.

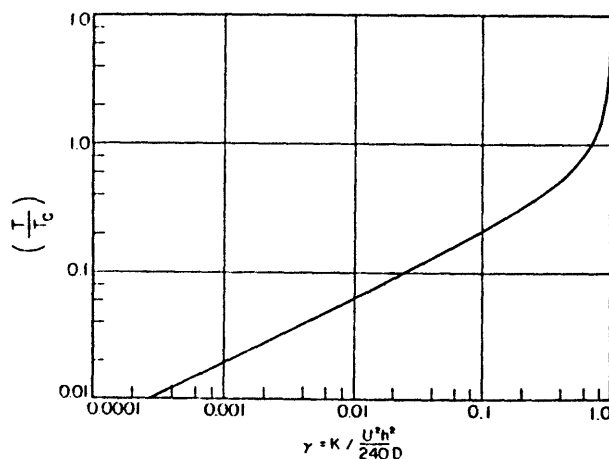


Fig. 16.3.3. Relazione tra il coefficiente di dispersione K e il periodo di oscillazione T .