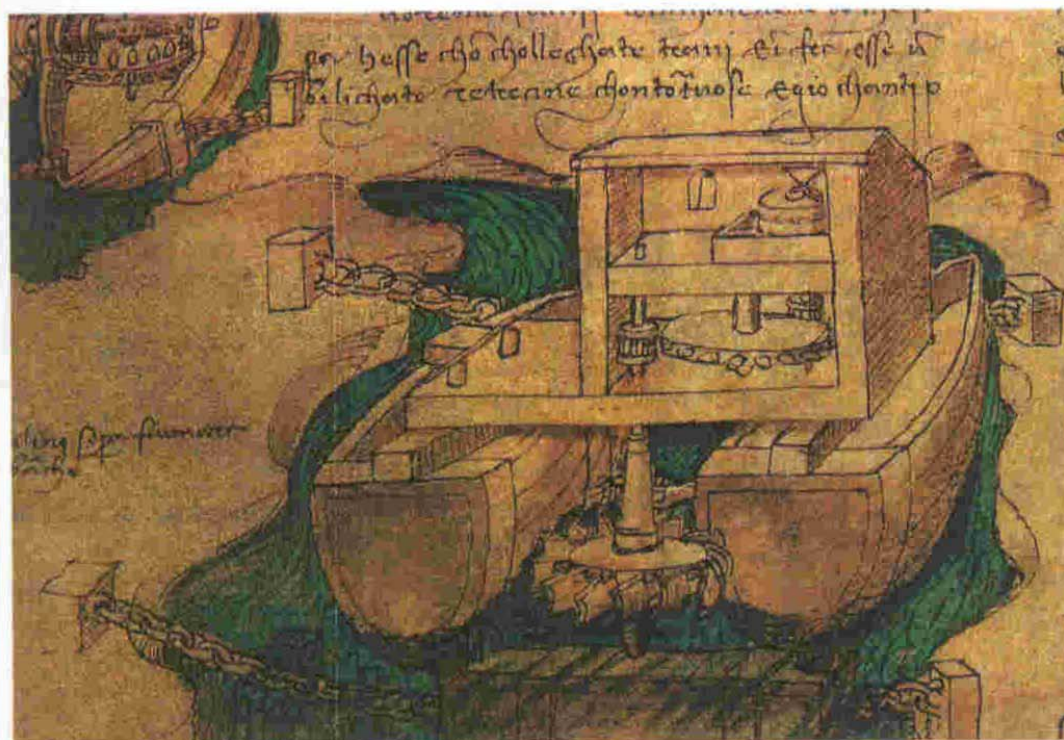




ASSOCIAZIONE ITALIANA  
DI MECCANICA TEORICA ED APPLICATA

# MECCANICA GENERALE MECCANICA DEI FLUIDI

Volume I



Disegno di Francesco di Giorgio, Ingegnere senese del '400

**XIII CONGRESSO NAZIONALE**

SIENA, 29 Settembre - 3 Ottobre 1997



XIII CONGRESSO NAZIONALE  
DELL'ASSOCIAZIONE ITALIANA  
DI MECCANICA TEORICA ED APPLICATA

ATTI

MECCANICA GENERALE  
MECCANICA DEI FLUIDI

Volume I

SIENA, 29 Settembre - 3 Ottobre 1997

EDIZIONI ETS



## SUL COEFFICIENTE DI INTRUSIONE DI UN GETTO IN UN CAMPO DI MOTO ONDOSI

M. MOSSA

*Dipartimento di Ingegneria delle Acque, Politecnico di Bari, Bari*

### SOMMARIO

Nella memoria si presentano i risultati sperimentali di uno studio sul coefficiente di intrusione di un getto immerso in un campo di liquido in quiete e del medesimo getto interagente con un campo di moto ondoso. Il confronto ha consentito di mettere in evidenza il benefico effetto del campo di moto ondoso nei processi di diffusione, come confermato dai diagrammi delle componenti trasversali di velocità e dall'andamento della portata lungo l'asse del getto.

### ABSTRACT

This paper considers the entrainment of a non-buoyant jet discharged beneath a series of progressive waves. The results are compared to an identical discharge in a stagnant ambient. This comparison highlights the additional entrainment, resulting from the oscillations of the trajectory of the jet, as shown by the the transverse velocity profiles and the flow rates.

### 1. INTRODUZIONE

Nel campo dell'ingegneria ambientale si pone spesso il problema dello studio idrodinamico di flussi in regioni confinanti, ma con differenti livelli energetici. In tutti questi campi di moto è presente il fenomeno dell'intrusione (*entrainment*), che può essere definita come segue [13]: l'immissione di fluido non turbolento nella regione turbolenta di un altro fluido oppure la diffusione di un fluido caratterizzato da un campo di moto turbolento all'interno di un fluido ambiente in moto non turbolento.

In particolare, per quanto riguarda l'analisi idrodinamica dei getti, esistono molti modelli teorici derivati dalla soluzione integrale di Morton et al. [6] in cui si fa riferimento all'ipotesi secondo la quale l'incremento di portata che si realizza in una sezione trasversale di altezza unitaria di un getto è proporzionale al prodotto tra la velocità longitudinale in asse (o la velocità longitudinale media nella sezione trasversale) e la circonferenza che delimita la sezione trasversale stessa. La costante di proporzionalità è nota come coefficiente di intrusione. Secondo Rajaratnam [10] il coefficiente di intrusione dei getti di quantità di moto circolari immessi in un campo di liquido in quiete (definito come il rapporto tra la velocità di intrusione normale all'asse del getto  $v_e$  e la velocità longitudinale in asse  $u_m$ , nella sezione trasversale di interesse) è  $\alpha_e = v_e/u_m = 0.026$ ; Chan e Kennedy [1], utilizzando la velocità media  $V$  delle sezioni trasversali, sempre per i getti di quantità di moto circolari immessi

in un campo di liquido in quiete, hanno proposto la seguente relazione per il coefficiente di intrusione:  $\alpha' = v_e/V = 0.053$ . Pedersen [13] mise in evidenza la dipendenza di tale parametro dal numero di Froude densimetrico, infinitamente elevato per i getti di quantità di moto.

## 2. ANALISI DEL COEFFICIENTE DI INTRUSIONE DI UN GETTO INTERAGENTE CON UN CAMPO DI MOTO ONDOSI

Shuto e Ti [12] studiarono in laboratorio l'influenza delle onde su un getto di densità immesso verticalmente da un orifizio circolare in un campo di moto ondoso. Gli Autori trovarono le seguenti relazioni per il calcolo del coefficiente di intrusione  $\alpha$  definito come il rapporto tra la velocità di intrusione e la differenza tra le velocità verticali caratteristiche del getto e del campo di moto ondoso

$$\begin{cases} \alpha = 1.21 F_{rU}^{-1} & F_{rU} \leq 4.3 \\ \alpha = 0.28 & F_{rU} \geq 4.3 \end{cases} \quad (1)$$

Nelle (1)  $F_{rU}$  è il numero di Froude densimetrico riferito alla velocità  $U$  rappresentativa del flusso dell'ambiente esterno, definita come la media delle componenti orizzontali di velocità del campo di moto ondoso calcolata in un semiperiodo. Gli Autori hanno ritenuto più appropriato utilizzare  $F_{rU}$  nelle (1) piuttosto che il numero di Froude densimetrico classico, riferito alla velocità di efflusso del getto, a differenza di Fan [3], che propose di esprimere il coefficiente di intrusione come segue

$$\alpha = f(k F_{rw0}^{5/8}) \quad (2)$$

avendo indicato con  $f$  una funzione da ricavarsi sperimentalmente, con  $k$  il rapporto tra la velocità di efflusso del getto  $w_0$  ed  $U$ , e con  $F_{rw0}$  il numero di Froude densimetrico classico.

Shuto e Ti osservano che, per piccoli valori di  $F_{rU}$ , è necessario utilizzare con cautela la (1). Gli Autori, infatti, notano che, definendo il coefficiente di intrusione come il rapporto tra la velocità di intrusione e la velocità che causa l'intrusione stessa, è fisicamente impossibile che esso possa assumere valori maggiori dell'unità senza ammettere l'esistenza di un meccanismo di amplificazione. Queste considerazioni portano a concludere che, come affermato dagli stessi Autori, il loro modello "cade in difetto per piccoli valori del numero di Froude densimetrico".

Ger [4] analizzò l'influenza del moto ondoso su getti di densità effluenti orizzontalmente da un ugello circolare in cui predomina la quantità di moto indotta dalle onde per almeno un mezzo dell'altezza di risalita. L'Autore osserva che il comportamento di un getto di densità immesso in un campo di moto ondoso è caratterizzato da un incremento dell'intrusione rispetto al caso di immissione in un campo di liquido in quiete e ciò si manifesta con un incremento dell'allargamento del getto. Ger estese gli studi di Chan e Kennedy [1] al caso di un getto in presenza di moto ondoso, proponendo, per il coefficiente di intrusione, la seguente relazione

$$\alpha = \alpha(U/U_e) \quad (3)$$

da ricavarsi sperimentalmente. La (3) è una funzione del rapporto tra la velocità orizzontale  $U$  caratteristica del moto ondoso, proposta da Shuto e Ti e definita in precedenza, e la velocità di efflusso del getto. Essa, inoltre, non dipende dal numero di Froude densimetrico. I risultati sperimentali dell'Autore portano a concludere che, accettando una dipendenza lineare di  $\alpha$  da  $U/U_e$ , il coefficiente di intrusione possa calcolarsi come segue

$$\alpha = 0.05 + 0.63 U/U_e \quad (4)$$

Nel caso di assenza di moto ondoso, dalla (4) si ricava  $\alpha=0.05$ , solo di poco inferiore al valore 0.053 proposto da Chan e Kennedy [1]. Dalla (4) si nota che, a parità di  $U_e$ ,  $\alpha$  è una funzione crescente di  $U$  e quindi aumenta con l'altezza d'onda  $H$  e decresce col periodo d'onda  $T$ . Inoltre, a

valori più piccoli del rapporto tra la profondità dell'ambiente esterno e la lunghezza d'onda ( $h/L$ ) corrispondono valori più grandi del coefficiente di intrusione.

Da quanto detto si nota che sono scarsi i risultati sperimentali sul coefficiente di intrusione nel caso dei getti interagenti con un campo di moto ondoso. Ciò fu messo in evidenza anche da Chin [2], che nel modello matematico lagrangiano per lo studio del fenomeno utilizza un coefficiente di intrusione forzato dovuto al moto ondoso in aggiunta a quello classico dei getti immessi in un campo di liquido in quiete.

### 3. ANALISI DEI RISULTATI SPERIMENTALI

Le esperienze, condotte nel canale per moto ondoso del laboratorio del Dipartimento di Ingegneria delle Acque del Politecnico di Bari, si riferiscono a getti di quantità di moto sommersi e ad asse verticale effluenti da una luce posta a 16.7 cm dal fondo. L'impianto di generazione del getto consta di un ugello di forma troncoconica 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. L'impianto sperimentale, diffusamente descritto in precedenti lavori ([7], [8], [9]), è costituito da un canale per moto ondoso con le pareti di cristallo e fondo di plexiglas, largo 100 cm, alto 120 cm e lungo circa 45 m. Per il rilievo delle velocità del campo di moto si è impiegato un sistema LDA bidimensionale a fibre ottiche, in modalità backscattering. Le misurazioni di velocità sono state effettuate su un getto immesso in un campo di liquido in quiete e sul medesimo getto interagente con un campo di moto ondoso progressivo. Per entrambe le configurazioni la profondità dell'acqua in canale era  $h=80$  cm, la portata  $Q_e=80$  l/h, a cui corrisponde una velocità  $U_e=6.42$  m/s e un numero di Reynolds nella sezione di efflusso  $Re=13482$ . Per quanto riguarda lo studio del getto in presenza di moto ondoso, sono stati riprodotti in canale treni di onde regolari con periodo  $T=2.00$  s, altezza d'onda  $H=4.20$  cm, lunghezza d'onda  $L=5.10$  m e parametro  $h/L=0.1569$ .

Nelle figg. 1(a-h) si riportano alcuni diagrammi delle componenti longitudinali e trasversali di velocità del getto immesso in un campo di liquido in quiete e del medesimo getto immesso in un campo di liquido in moto ondoso. Si osserva che nelle stesse figure si è indicato con  $z$  la distanza della sezione trasversale dall'ugello e con  $x$  la distanza del punto di misura dall'asse del getto; inoltre sono state assunte positive le componenti trasversali di velocità con verso opposto a quello dell'asse  $x$ . In letteratura sono molto scarsi i dati relativi ai valori medi di velocità normali all'asse di un getto. Il rilievo di tali velocità può essere effettuato solo avendo a disposizione un sistema anemometrico in grado di misurare con accuratezza valori bassi di velocità. Inoltre, occorre predisporre l'apparato sperimentale con molta cura, in quanto una piccola rotazione dell'asse medio del getto rispetto alla sonda del sistema LDA porterebbe a delle erronee valutazioni. L'analisi delle velocità trasversali è particolarmente interessante, poiché mette in evidenza l'esistenza, nella parte esterna del getto, di un flusso che muove dall'esterno verso l'asse del getto a conferma del fenomeno dell'intrusione. Dalle stesse figure, tra l'altro, si nota che il flusso di intrusione, a parità di tutti gli altri parametri è maggiore per il caso del getto immesso in un campo di liquido in moto ondoso rispetto allo stesso getto immesso in un campo di liquido in quiete. Normalmente, inoltre, in prossimità dell'asse del getto il campo di moto è caratterizzato da componenti trasversali di velocità orientate dall'asse verso l'ambiente esterno. Queste considerazioni, almeno per quanto riguarda il getto immesso in un campo di liquido in quiete sono in accordo con la soluzione teorica proposta da Tollmien (si veda [10]). Per quanto riguarda le componenti longitudinali di velocità del getto interagente con le onde, si osserva l'esistenza di due picchi a testimonianza del cosiddetto *effetto dumb-bell* [11], tipico dello scarico di acque in estuari con presenza di forti maree. Gli altri rilievi di velocità, qui non riportati per brevità, confermano gli andamenti analizzati.

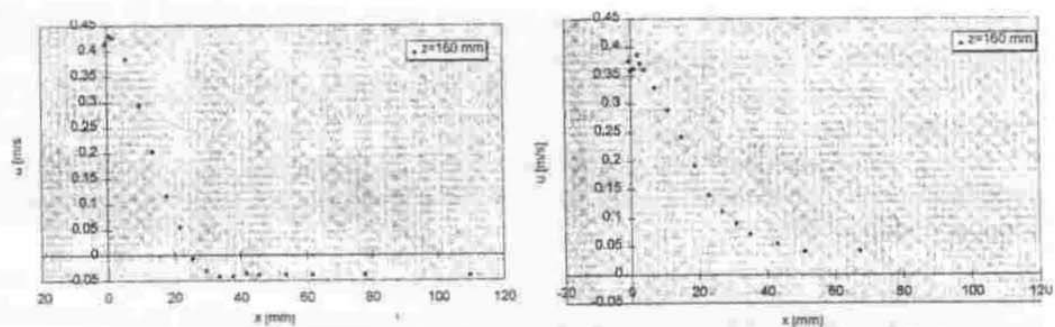
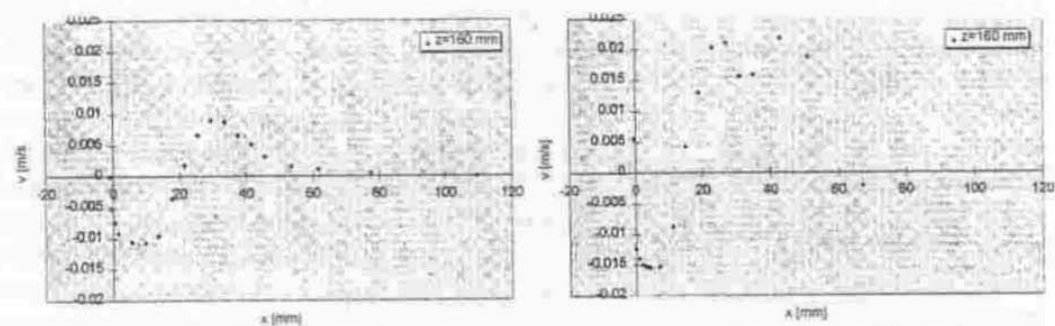
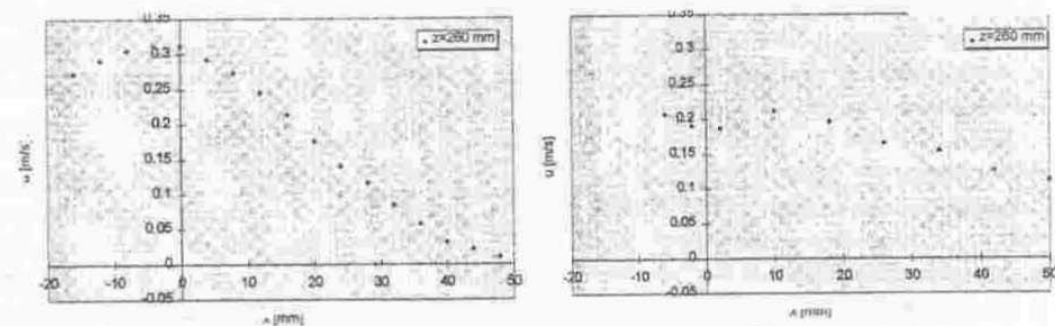
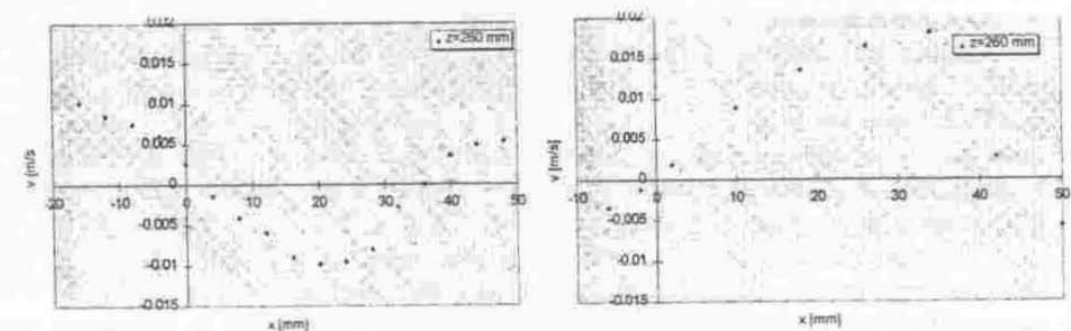
a) Velocità longitudinali (senza onde;  $z=160$  mm)b) Velocità longitudinali (con onde;  $z=160$  mm)c) Velocità trasversali (senza onde;  $z=160$  mm)d) Velocità trasversali (con onde;  $z=160$  mm)e) Velocità longitudinali (senza onde;  $z=260$  mm)f) Velocità longitudinali (con onde;  $z=260$  mm)g) Velocità trasversali (senza onde;  $z=260$  mm)h) Velocità trasversali (con onde;  $z=260$  mm)

Fig. 1 - Diagrammi delle componenti longitudinali e trasversali di velocità

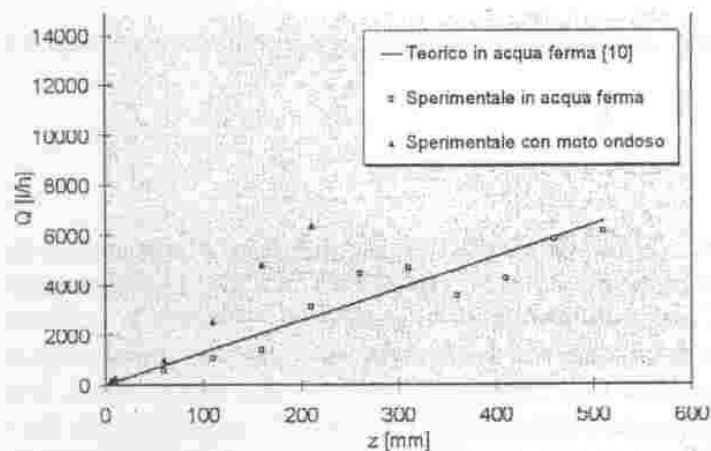


Fig. 2 - Andamento della portata

valore di velocità è uguale a  $u_m/e$ , è sempre maggiore nel caso di un getto interagente con un campo di moto ondoso (se valutata nella direzione di propagazione delle onde) rispetto al caso dello stesso getto immesso in un campo di liquido in quiete. Tuttavia, limitatamente alle sezioni trasversali dei punti riportati in fig. 2, i valori della scala delle lunghezze trasversali  $b$  dei getti interagenti con un campo di moto ondoso differiscono di qualche punto percentuale da quelli del medesimo getto in acqua ferma. Queste considerazioni consentono di valutare le portate anche per i getti in presenza di moto ondoso assumendo l'ipotesi di assialsimmetria [12] per le sezioni prossime all'ugello. In fig. 2, dunque, per il getto immesso in un campo di liquido in moto ondoso, si riportano solo i valori delle portate delle sezioni trasversali che soddisfano il criterio esposto in precedenza.

Il coefficiente di intrusione può allora essere ottenuto dalla velocità di intrusione calcolata con la seguente relazione

$$\frac{dQ}{dz} = \frac{d}{dz} \int_0^B 2\pi x u dx = 2\pi B v_e \quad (5)$$

avendo indicato con  $B$  la distanza dall'asse del getto del punto in cui la velocità longitudinale media  $u$  è molto piccola e, dunque, trascurabile. Dalla (5), facendo riferimento alla  $dQ/dz$  e ai valori di  $B$  ottenuti dai dati sperimentali per il caso del getto immesso in un campo di liquido in quiete, il valore di  $\alpha_e = v_e/u_m$ , mediato su tutte le sezioni trasversali, è uguale a 0.024, molto prossimo al valore 0.026 proposto da Rajaratnam [10], mentre  $\alpha'_e = v_e/V$  è risultato uguale a 0.049, prossimo a 0.053 proposto da Chan e Kennedy [1]. I risultati sperimentali, tra l'altro, hanno messo in evidenza la variabilità del coefficiente di intrusione con la distanza  $z$  a causa dell'andamento della portata lungo tale asse. La non linearità delle portate con  $z$  è dovuto al flusso di ricaduta che tende a ridurre la portata nelle sezioni in cui tale flusso si genera e ad alimentarla nelle sezioni in cui esso si chiude a formare un grande vortice. Si ritiene, pertanto, che i valori del coefficiente di intrusione riportati in letteratura siano mediati sulle sezioni trasversali, non considerando gli effetti legati alla variazione non lineare della portata, che è stata rilevata nel presente studio e da Koole e Swan [5].

Per il getto immesso in un campo di liquido in moto ondoso, il valore del coefficiente di intrusione  $\alpha'_e = v_e/V$  ottenuto dall'elaborazione dei dati sperimentali è uguale a 0.056. I risultati ottenuti, dunque, mettono in evidenza che il coefficiente di intrusione del getto interagente con un campo di moto ondoso è maggiore di quello dello stesso getto immesso in un campo di liquido in quiete. I rilievi condotti, tra l'altro, consentono di effettuare un confronto qualitativo con la legge del coefficiente di intrusione proposta da Ger [4]. Il valore del coefficiente di intrusione ottenuto dalla (4) è uguale a 0.06. Il leggero scostamento rispetto al dato ottenuto dalla (5) è legato al fatto

In fig. 2 si mostra il diagramma delle portate ottenute per integrazione delle componenti longitudinali di velocità dei getti analizzati nel presente studio. La valutazione della portata è stata effettuata ipotizzando una condizione di assialsimmetria del campo di moto. Come mostrato in altri lavori (si veda [8]), la scala delle lunghezze trasversali  $b$ , definita come la distanza dall'asse medio del getto del punto in cui il

che la relazione (4) è stata ricavata per interpolazione lineare di dati sperimentali che si riferiscono a getti effluenti orizzontalmente.

#### 4. CONCLUSIONI

Nel presente lavoro si sono riportati dei risultati sperimentali sul coefficiente di intrusione di un getto di quantità di moto immesso in un campo di liquido in quiete e del medesimo getto interagente con un campo di moto ondoso. L'analisi del getto immesso in un campo di liquido in quiete ha consentito di valutare il coefficiente di intrusione con due formulazioni proposte in letteratura ( $\alpha_r$  e  $\alpha'_r$ ), mettendo in evidenza la dipendenza dalla distanza dall'ugello; il valor medio, invece, è in accordo con quello proposto da Rajaratnam [10] e da Chan e Kennedy [1], rispettivamente. Per i getti interagenti con un campo di moto ondoso, l'analisi dei risultati sperimentali ha messo in evidenza che il coefficiente di intrusione è maggiore di quello dello stesso getto immesso in acqua ferma. Quest'ultimo risultato è avallato dai diagrammi sperimentali delle componenti trasversali di velocità, scarsamente presenti in letteratura anche per il caso dei getti effluenti in acqua ferma. Inoltre, il coefficiente di intrusione sperimentale del getto immesso in un campo di liquido in quiete è in accordo con la (4), proposta da Ger [4] per i getti effluenti orizzontalmente.

I profili delle componenti longitudinali di velocità dei getti immessi in un campo di liquido in moto ondoso hanno messo in evidenza, per alcune sezioni trasversali, la presenza di due picchi a conferma del cosiddetto *effetto dumb-bell* proposto da Sharp [11]. La scarsità dei rilievi sperimentali relativi ai getti interagenti con le onde richiede un ulteriore approfondimento della tematica, tenuto conto dell'influenza tutt'altro che marginale che la presenza di un campo di moto ondoso presenta nei processi di diffusione di un getto e di diluizione del soluto trasportato.

#### BIBLIOGRAFIA

- [1] Chan, T.L., Kennedy, J.F., "Turbulent, nonbuoyant, or buoyant jets discharged into flowing or quiescent fluids", *IJHR*, Rep. No. 140, 1972.
- [2] Chin, D.A., "Model of buoyant-jet-surface-wave interaction", *ASCE, Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, vol. 114, No. 3, May, 1988.
- [3] Fan, L.N., "Turbulent buoyant jets into stratified or flowing ambient fluids", *Rep. KH-R-15*, W. Keck Lab., California Institute of Technology, 1967.
- [4] Ger, A.M., "Wave effects on submerged buoyant jets", *Proc. 18th IAHR Cong.*, 1979.
- [5] Koole R., Swan C., "Measurements of a 2-D non-buoyant jet in a wave environment", *Coastal Engineering*, 24, 1994.
- [6] Morton, B.R., Taylor, G.I., Turner, J.S., "Turbulent gravitational convection from maintained and instantaneous sources", *Proc. R. Soc., Ser. A*, Vol. 234, 1956.
- [7] Mossa, M., *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, 1996.
- [8] Mossa, M., "Campo di moto generato da un getto in presenza di moto ondoso", *XXV Conv. Naz. di Idraulica e Costruzioni Idrauliche*, Torino, 16-18 settembre, 1996.
- [9] Mossa, M., Petrillo, A., "Turbulent energy transport of a jet in stagnant or wave environment", *Proc. XXVII IAHR Cong.*, San Francisco, USA, 1997.
- [10] Rajaratnam, N., *Turbulent jets*, Elsevier Sc. Publ. Company, Amsterdam, 1976.
- [11] Sharp, J.J., "The effects of waves on buoyant jets", *Proc. Inst. Civ. Eng.*, Part 2, 81, 1986.
- [12] Shuto, N., Ti, L.H., "Wave effects on buoyant plumes", *Proc. 14th Coastal Eng. Conf.*, 1974.
- [13] Pedersen F.B., *Environmental hydraulics: stratified flows - lecture notes on coastal and estuarine studies*, Springer Verlag, 1986.