

ii. CONCLUSIONI.

L'impiego di scarichi a mare delle acque reflue ha trovato negli ultimi anni sempre maggiore utilizzazione. Numerosi sono le ricerche fatte sull'argomento. Tuttavia, come hanno evidenziato Chyan e Hwung (1993) sono ancora poche le conoscenze sul mescolamento e la diluizione di un getto turbolento interagente con un campo di moto ondoso, per cui occorrono indagini su modelli fisici che possano consentire di approfondire questa tematica.

Il presente studio è rivolto ad un'analisi dei rilievi sperimentali dei campi di moto generati da un getto interagente con un moto ondoso e dallo stesso getto immerso in un campo di liquido in quiete.

Quest'ultimo aspetto del problema, pur essendo già trattato ampiamente in letteratura, è carente di dati sperimentali specie per quanto attiene i rilievi della componente di velocità ortogonale al getto, che è fondamentale per lo studio dell'intrusione.

Nella studio si è effettuata una vasta ricerca bibliografica sulla diffusione dei getti immessi in un campo di liquido in quiete, in presenza di correnti e di moto ondoso. Oltre ad un'ampia analisi dei lavori più significativi reperiti in letteratura, viene data una interpretazione fisica dei problemi, accompagnata da una descrizione matematica degli stessi.

E' stata condotta un'indagine sperimentale in laboratorio con getti aventi uguale densità del fluido ambiente e immessi verticalmente.

Allo scopo, nel laboratorio del Dipartimento di Ingegneria delle Acque del Politecnico di Bari, si è provveduto alla realizzazione di un'apposito modello fisico per l'analisi della diffusione dei getti. Tale modello consiste, nelle sue principali caratteristiche, in un canale per moto ondoso con le pareti costituite da lastre di cristallo e il fondo da lastre di plexiglass sostenute da una serie di telai in ferro posti ad una distanza reciproca di circa 44 cm individuanti ciascuno una sezione di misura e controllo. La ventola piana, utilizzata per la generazione del moto ondoso, è posta ad una estremità del canale ed è azionata da un sistema oleodinamico che le imprime un moto di rototraslazione che meglio simula il moto ondoso in fondali di profondità limitata. Nel canale è immerso verticalmente un getto effluente da un orifizio. L'alimentazione dell'ugello è stata realizzata a mezzo di una vasca

di carico dotata di un setto di sfioro così da determinare condizioni di carico costante sulla luce di efflusso. La vasca di carico, mediante un sollevamento meccanico, è alimentata da una seconda vasca, disposta a quota più bassa della precedente, nella quale è possibile anche la preparazione di soluzioni di acqua con un tracciante (rodamina B). L'uso della sostanza colorante è stato utile per effettuare delle riprese video che, dopo una successiva analisi delle immagini, hanno permesso di trarre utili indicazioni qualitative sul fenomeno di diffusione di un getto sia nel caso di immissione in un campo di liquido in quiete sia nel caso di immissione in un campo di liquido in moto ondoso.

Sul campo di moto generato dai getti sono stati effettuati rilievi di velocità, utilizzando un sistema anemometrico laser Doppler (LDA) a fibre ottiche in modalità *back scattering* bidimensionale a quattro raggi. Questa apparecchiatura ha consentito di rilevare contemporaneamente due componenti di velocità dei campi di moto analizzati. Il sistema, inoltre, prevede la possibilità di poter acquisire, contemporaneamente alle velocità, le uscite analogiche, opportunamente digitalizzate, provenienti da quattro trasduttori. In particolare, questo ha consentito di poter rilevare, simultaneamente alle due componenti di velocità, l'altezza d'acqua nel canale in corrispondenza dell'asse del getto del punto di misura.

Con la suddetta apparecchiatura sono stati condotti rilievi sperimentali di un getto immesso in un campo di liquido in quiete, di un campo di moto ondoso del tipo che avrebbe successivamente interagito con il getto, e, in ultimo, dello stesso getto con un campo di moto ondoso. Si ritiene che tale modo di procedere abbia consentito una più obiettiva comparazione tra la diffusione dei getti in acqua ferma e degli stessi getti interagenti con le onde.

Per una analisi qualitativa del fenomeno, utilizzando una tecnica di visualizzazione delle immagini, si è evidenziato l'effetto benefico del moto ondoso sulla diffusione. Infatti nei getti in presenza di onde si ha un maggiore allargamento. Con la tecnica di visualizzazione messa a punto è stato possibile evidenziare le tre regioni di diffusione del getto: *regione di flessione*, *regione di transizione*, *regione di getto sviluppato* e la presenza di una corrente di ricaduta.

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 che in presenza di moto ondoso si ha 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 che è 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 profili longitudinali della velocità. Infatti, dal confronto dei diagrammi di velocità relativi a un getto interagente con un campo di moto ondoso con quelli corrispondenti al caso dello stesso getto immerso in un campo di liquido in quiete, si nota che, in presenza di onde, si ha 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 in presenza di moto ondoso 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.

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 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, 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 hanno evidenziato che le interazioni di un getto con un campo di moto ondoso sono essenzialmente legate alle componenti orizzontali del fluido ambiente. Tale conclusione è avallata dalle seguenti considerazioni:

- 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.
- 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 invece 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.

- 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.

Nell'ambito della ricerca, per lo stesso getto, immesso verticalmente nel fluido ricevente, si sono effettuati i rilievi delle componenti orizzontale e verticale della velocità e del profilo del pelo libero sia quando il getto veniva immesso nel canale con liquido in quiete che in presenza di moto ondoso. I rilievi di velocità sono stati effettuati in un numero significativo di sezioni e, per ciascuna di queste, in un congruo numero di punti.

Per i getti immessi in un fluido in quiete, l'analisi dei profili della velocità media verticale ha evidenziato, in accordo con quanto riportato in letteratura, l'esistenza di un *core* in prossimità dell'ugello e il classico andamento campanulare.

L'allargamento del getto, espresso attraverso la scala delle lunghezze (b), definita come la distanza dall'asse del getto dove la velocità è $1/e$ volte quella in asse, è crescente in funzione della distanza dall'ugello e segue mediamente le leggi teoriche riportate in letteratura.

I valori delle velocità rilevate nelle diverse sezioni trasversali del getto, opportunamente adimensionalizzati, si addensano tutti su un'unica curva, confermando l'ipotesi di similitudine.

Per alcune sezioni i rilievi di velocità, estesi a distanza molto grande dall'asse, hanno confermato l'esistenza del flusso di ricaduta, già evidenziato con l'analisi delle immagini.

Significative sono le misure delle componenti radiali di velocità, dalle quali si nota

che nella zona esterna del getto si ha una componente orientata verso l'asse dello stesso.

Il rilievo delle componenti orizzontali di velocità è particolarmente delicato, in quanto un piccolo errore della verticalità del getto dà luogo a notevoli errori. Nella presente ricerca, per alcune sezioni prossime all'ugello, si sono effettuati rilievi di velocità su due lati del getto, che hanno confermato, pur con la dispersione dovuta alla delicatezza delle misure, l'ipotesi teorica di simmetria dei profili di velocità rispetto all'asse del getto. A tal proposito è da notare che in letteratura sono molto scarsi i dati relativi ai valori medi di velocità normali all'asse di un getto. Per esempio, Wygnanski e Fiedler (1969) riportano una curva rappresentativa dell'andamento dei profili di velocità ortogonali all'asse del getto da loro analizzato, osservando, tra l'altro, che essa è stata ottenuta attraverso l'applicazione dell'equazione di continuità a partire dai rilievi delle componenti longitudinali di velocità. Ossia, la curva non è il risultato diretto di una misurazione. Gli stessi autori, però, riportano i risultati sperimentali relativi alle intensità di turbolenza delle componenti fluttuanti di velocità ortogonali all'asse del getto analizzato.

Per tale ragione, si ritiene che i profili delle componenti orizzontali di velocità riportati nell'ambito di questa tesi siano di particolare interesse; essi, infatti, evidenziano la presenza di una velocità di intrusione e presentano un andamento analogo a quello teorico proposto da Tollmien (1926).

Nella tesi è stata effettuata un'analisi delle componenti turbolente della velocità con il calcolo delle principali grandezze statistiche. I dati indicano che la turbolenza in genere è non tayloriana.

L'analisi sulle microscale e scale integrali temporali lungo una sezione trasversale del getto ha consentito di dare un'interpretazione dei processi di produzione e dissipazione di energia cinetica turbolenta. In particolare, le analisi condotte per le microscale e scale integrali della turbolenza evidenziano una loro tendenza ad aumentare verso la regione esterna. Questo consente di poter affermare che allontanandosi dall'asse del getto, è dominante l'azione dei macrovortici, ossia l'azione di recupero di energia dal campo di moto medio. L'osservazione che sia le scale integrali che le microscale della turbolenza sono crescenti verso la regione esterna, avallano le osservazioni di Pedersen (1986), secondo cui, relativamente a una sezione trasversale, l'integrale del termine di produzione è maggiore dell'integrale del termine di dissipazione di energia cinetica turbolenta nei campi

di moto caratterizzati da fenomeni di mescolamento, tipo i getti. I macrovortici, in effetti, in prossimità della regione esterna, danno luogo a un incremento dell'energia del campo di moto medio, consentendo, di fatto, il moto di masse di fluido del corpo idrico ambiente e il loro trasporto verso l'alto (con corrispondente aumento di energia cinetica e potenziale del campo di moto medio del getto). Pedersen (1986), in effetti, mise in evidenza che i macrovortici non svolgono solo la funzione di alimentare la turbolenza attraverso un'azione di sottrazione di energia dal campo di moto medio, ma anche un'azione tesa a incrementare l'energia di questo.

Il rilievo contemporaneo delle componenti orizzontale e verticale di velocità ha consentito di determinare l'andamento delle tensioni tangenziali medie turbolente.

Per quanto attiene l'andamento della quantità di moto al variare della sezione è noto che tale grandezza dovrebbe teoricamente mantenersi costante. In alcune sezioni si è visto che la quantità di moto, ottenuta integrando i dati sperimentali, subisce un aumento. Questo risultato conferma l'esistenza di un flusso di ricaduta. Tale aumento è da imputarsi al fatto che il calcolo della quantità di moto è stato esteso dall'asse fino al valore nullo di velocità, senza tenere conto delle correnti di ritorno, che darebbero un contributo negativo. Infatti anche se le correnti di ritorno sono caratterizzate da velocità molto basse, esse interessano settori circolari con raggi molto grandi. A riguardo di tale tipo di problematica, Papanicolaou e List (1988) osservarono che solo "nel caso in cui il fluido ambiente non ha componenti di velocità parallele all'asse del getto, la quantità di moto si conserva". Inoltre, gli stessi autori misero in evidenza che per il caso di un getto immesso in un canale sperimentale, caratterizzato, ovviamente, da un volume finito di fluido, si ha un flusso di ricaduta (*reverse flow*) in prossimità delle pareti e un debole flusso, nella stessa direzione e verso del campo di moto longitudinale del getto, in corrispondenza delle regioni immediatamente adiacenti ad esso (Papanicolaou e List, 1988). In tal caso è logico attendersi che la quantità di moto, calcolata limitatamente alla sezione trasversale del getto, ossia dall'asse dello stesso fino al punto in cui il valore verticale di velocità si annulla, varierà in funzione del campo di moto complessivo getto-fluido ambiente.

L'analisi delle portate lungo l'asse del getto, ottenuto per integrazione dei diagrammi di velocità, ha consentito di verificare, in accordo con la letteratura, l'incremento della stessa lungo la direzione di diffusione. Infine la conoscenza

dell'andamento delle portate ha permesso di calcolare il coefficiente di intrusione $\alpha_e = v_e/u_m$ che, nel caso di getto immerso in un fluido in quiete, è risultato essere uguale a 0.024.

Prima di effettuare lo studio del getto interagente con le onde, sono stati eseguiti rilievi del solo campo di moto ondoso, ossia del profilo di superficie e delle componenti orizzontali e verticali di velocità. Il moto ondoso è relativo a condizioni di acque a profondità intermedie le cui caratteristiche, secondo il diagramma di Le Mehaute, sono descrivibili dalla teoria di Stokes del II ordine. L'analisi spettrale del profilo di superficie e delle componenti orizzontali e verticali di velocità ha messo in evidenza un diverso comportamento di queste ultime per quanto attiene le non linearità. Infatti, le componenti di velocità non sono affette nella stessa misura dalle non linearità. In particolare, i rilievi hanno evidenziato che le componenti verticali di velocità sono caratterizzate dalla presenza di armoniche di ordine superiore più accentuate rispetto alle corrispondenti componenti orizzontali.

Le non linearità sono state valutate anche considerando l'energia presente nell'intorno della frequenza di picco e delle sue due armoniche principali, come proposto da Guza e Thornton (1980). Utilizzando, pertanto, gli spettri di potenza del profilo di superficie del moto ondoso e delle componenti orizzontali e verticali di velocità, è stato possibile valutare l'energia in un intorno della componente principale (E_1) e delle sue due armoniche superiori (E_2 ed E_3). I rapporti E_2/E_1 e E_3/E_1 valutati per le componenti di velocità sono risultati sempre più piccoli dei corrispondenti valori calcolati per il profilo di superficie; inoltre, tali rapporti sono maggiori per la componente verticale di velocità.

Nella tesi viene, infine, effettuata una analisi dei dati sperimentali del moto ondoso e gli stessi sono interpretati con le principali teorie.

Per i getti interagenti con il moto ondoso i rilievi delle componenti verticali di velocità, in una analisi euleriana del campo di moto, hanno messo in evidenza un appiattimento ed un allargamento dei diagrammi rispetto a quelli rilevati sullo stesso getto immerso in acqua ferma.

I dati di velocità, opportunamente adimensionalizzati, si addensano intorno ad un'unica curva.

I rilievi della componente verticale della velocità sullo stesso getto in presenza di moto ondoso di uguale altezza d'onda, ma con diverse frequenze, hanno messo in evidenza

che nella zona di flessione del getto, ossia per le sezioni prossime all'ugello, la velocità in asse tende a crescere con la frequenza.

Le componenti orizzontali delle velocità, in analogia con quelle rilevate sul getto immesso in acqua ferma, evidenziano nella zona esterna del getto un orientamento verso l'asse medio, ad indicare il fenomeno di intrusione.

Anche per i rilievi sul getto immesso in presenza di moto ondoso è stata condotta una accurata analisi statistica calcolando le principali grandezze caratteristiche.

Per quanto attiene lo scarto quadratico medio, a differenza del caso di getto immesso in acqua ferma, gli andamenti nelle diverse sezioni non si addensano intorno ad un'unica curva, ma sono parametrizzabili con un numero indice definito come il rapporto tra la velocità in asse e la massima velocità verticale di moto ondoso per la sezione in analisi. Ciò dà un'ulteriore conferma dell'influenza del moto ondoso sul processo di diffusione.

L'analisi spettrale delle componenti di velocità ha evidenziato, a differenza del getto immesso in acqua ferma, la presenza di un picco dominante a frequenza uguale a quella del moto ondoso, anche in zone del getto prossime all'asse medio.

L'andamento della portata, calcolata per integrazione delle componenti verticali di velocità, in funzione della distanza dall'ugello presenta un'andamento crescente. Inoltre, i valori delle portate in tutte le sezione trasversali sono marcatamente maggiori rispetto a quelli relativi allo stesso getto immesso in acqua ferma.

Il coefficiente di intrusione è risultato più elevato di quello trovato per lo stesso getto immesso in acqua ferma.

Ciò è in accordo con quanto trovato, sempre sperimentalmente, da A.M. Ger (1979). Esso, inoltre, conforta l'ipotesi fatta da altri autori (D.A. Chin, 1988 et al.) che, nei modelli matematici lagrangiani da essi proposti, utilizzano, nel caso di getti immessi in un campo di moto ondoso, un coefficiente di intrusione forzato in aggiunta a quello classico.