

## Interazione di uno scarico termico con il moto ondoso: determinazione dei profili di velocità e di temperatura

Diego Vicinanza, Michele Di Natale, Caterina Eramo e Stefania Di Ronza

DIC-SUN, Dipartimento di Ingegneria Civile, Seconda Università di Napoli, via Roma, 29 - 81031 Aversa (CE)

### Riassunto

Lo studio delle caratteristiche idrodinamiche del campo di moto che si determina in prossimità di uno scarico libero in mare rappresenta un tema di notevole interesse scientifico per l'interpretazione dei fenomeni di diffusione che avvengono nello specchio d'acqua antistante lo scarico stesso. Il problema, già trattato in letteratura mediante modelli matematici, è analizzato nella memoria mediante un'indagine di tipo sperimentale.

Le simulazioni effettuate si riferiscono al caso di correnti lente che si immettono in acqua ferma o in opposizione ad un moto ondoso, sia regolare che *random*.

Allo scopo di esaminare il fenomeno di dispersione idrodinamica che si determina nel campo di moto simulato, si è immesso un getto d'acqua a temperatura superiore rispetto a quella dell'ambiente ricettore, in presenza ed in assenza di moto ondoso.

Nell'ambito delle prove sperimentali effettuate sono state misurate le oscillazioni del pelo libero (tramite sonde di livello), le componenti di velocità (mediante un velocimetro ad ultrasuoni) ed il campo di diffusione termica (mediante un termografo). I risultati mostrano che la presenza della corrente ha un effetto significativo sui profili di velocità nonché sul fenomeno di diffusione termica.

**Parole chiave:** interazione getto "caldo" – moto ondoso, moto ondoso regolare e random, profili di velocità, profili di temperatura, termografo, velocimetro.

### Abstract

*The wave-current interaction is an important process characterised by modifications in the flow field such as wave front deformation, wave height and length reduction or increase, velocity profiles, etc. In past works the problem has been studied mathematically, whereas in this one it will be approached experimentally.*

*A systematic series of tests has been carried out on steady turbulent jets discharging into a stagnant ambient and in a wave environment. The hydrodynamic dispersion of a hot jet has been studied considering two different conditions: the discharge into a stagnant ambient and in a wave environment. An acoustic current meter and a thermograph have been used to obtain velocity and temperature profiles. Eight resistive gauges measured the wave profile. The results show how opposing waves strongly modify the jet velocity and temperature profiles.*

**Key-words:** *Wave-hot jet interaction, regular and random waves, velocity profiles, temperature profiles, thermograph, current meter.*

## Introduzione

L'interazione di uno scarico artificiale con il mare rappresenta un problema idrodinamico di notevole interesse scientifico e tecnico. Gli aspetti idrodinamici più rilevanti da esaminare sono le caratteristiche del campo di moto derivante dal fenomeno d'interazione, necessarie per studiare altri fenomeni importanti quali il trasporto di inquinanti o la dispersione termica nelle aree prossime allo scarico.

In letteratura il caso di getti tridimensionali che si immettono in un ambiente ricettore in quiete è stato studiato teoricamente e sperimentalmente da molti Autori (Wiegel et al., 1964; Jen et al., 1966; Hayashi e Shuto, 1967; Pande e Rajaratnam, 1977) nel caso di diversi tipi di sezione di scarico (circolare, rettangolare o quadrata) e differenti numeri di Richardson ( $R_{io}$ ). Di particolare interesse sono le misure fatte da Pande e Rajaratnam (1977) per valori moderati e grandi di  $R_{io}$  ( $R_{io}=0.15\div 1.14$ ); gli Autori hanno rilevato che i profili di velocità (media) e di temperatura (media) nel piano orizzontale sono simili tra loro e ben descritti da una funzione di tipo Gaussiano.

Per quanto concerne il problema della interazione tra una corrente e un moto ondoso con incidenza opposta, le indagini precedentemente effettuate si riferiscono ad una corrente che si immette in campo di moto ondoso regolare, descritto da una teoria stokiana al primo e al secondo ordine di approssimazione (Scarsi, 1984; Kishida, 1988 e 1990; Di Natale, 1998).

L'approccio di tipo sperimentale, alquanto complesso da effettuare per la difficoltà strutturale di riprodurre in laboratorio fenomeni idrodinamici che interessano aree di notevole estensione, è stato affrontato da diversi Autori (Ismail, 1981; Ismail e Wiegel, 1983; Ismail et al., 1988; Koole e Swan, 1994; Di Natale e Vicinanza, 2000).

I precedenti lavori evidenziano come la presenza del moto ondoso in opposizione determini un incremento di dispersione della quantità di moto e mostrano, altresì, la grande difficoltà di determinare i profili di velocità e di temperatura per via sperimentale nel fenomeno di interazione in esame.

L'indagine di laboratorio qui presentata ha avuto come obiettivo lo studio dell'interazione idrodinamica e termodinamica tra un getto ed un moto ondoso, sia nel caso di onde random (di prefissato spettro di energia), sia nel caso di onde regolari.

L'indagine, in una prima fase, è stata finalizzata non solo ad esaminare le modifiche indotte dal getto al campo di moto ondoso incidente, ma anche a determinarne, per punti, i profili verticali delle componenti orizzontali di velocità.

In particolare, le suindicate indagini sono state condotte esaminando separatamente i seguenti casi:

- getto che si immette in un fluido ambiente in quiete;
- getto che interagisce con un moto ondoso in opposizione.

Volendo confrontare i risultati ottenuti nel caso d'interazione getto–moto ondoso regolare con quello di corrente–moto ondoso random, si è ritenuto opportuno utilizzare il criterio dell'onda energeticamente equivalente ad un prefissato spettro (Scarsi et al., 1984).

In una seconda fase dell'indagine sperimentale, riproducendo le condizioni idrodinamiche prima citate, si è determinato il campo di diffusione termica indotto dall'immissione di un getto a temperatura maggiore di quella dell'ambiente ricettore. Le misure sono state effettuate utilizzando un termografo (radiometro a scansione all'infrarosso). Questa tecnica, non intrusiva e dotata di elevata risoluzione spaziale, è risultata molto vantaggiosa rispetto ai metodi di misura convenzionali.

## Installazione sperimentale

Le prove sperimentali sull'interazione getto-moto ondoso (Fig. 1) sono state effettuate presso il laboratorio del Dipartimento di Ingegneria Civile della Seconda Università di Napoli utilizzando il circuito idraulico descritto nel seguito e riportato in Figura 2.

### *Serbatoio e cassoni di alimentazione*

Il serbatoio di alimentazione, di dimensioni 3.20 m x 3.80 m x 3.40 m, costituito da una struttura in muratura, ha lo scopo di determinare un adeguato volume di invaso ed alimentare l'intero circuito.

Detto serbatoio è munito di una condotta di mandata di diametro DN=200 mm, interposta tra il serbatoio e i cassoni di alimentazione, di uno scarico di superficie e di fondo di diametro rispettivamente pari a 220 mm e 80 mm. All'interno del serbatoio sono altresì presenti le due condotte di acciaio zincato di diametro 80 mm provenienti dal pozzetto di ricircolo, le quali immettono una portata variabile tra 0-40 l/s. Sulla condotta di mandata è stata posta una saracinesca a piatto per regolare la portata e un misuratore elettromagnetico di portata bidirezionale, che permette la lettura istantanea delle portate in uscita. La condotta è collegata a due cassoni in acciaio zincato, di dimensioni 1.0 m x 2.45 m x 2.30 m e 1.5 m x 2.5 m x 2.30m, i quali hanno la funzione di garantire un prefissato carico idraulico sulla canaletta.

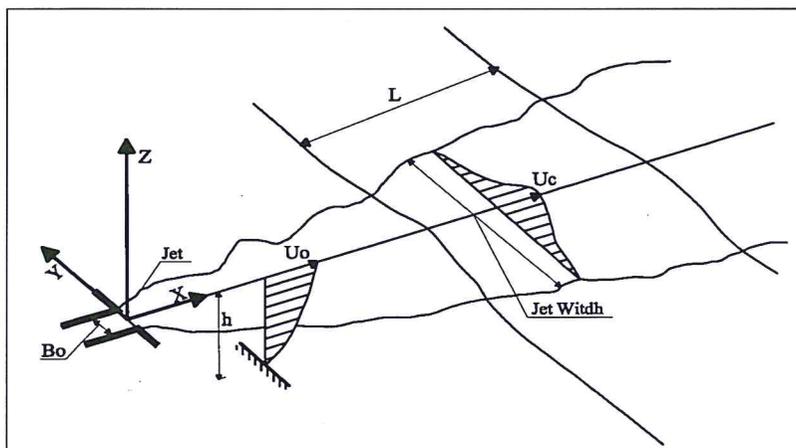
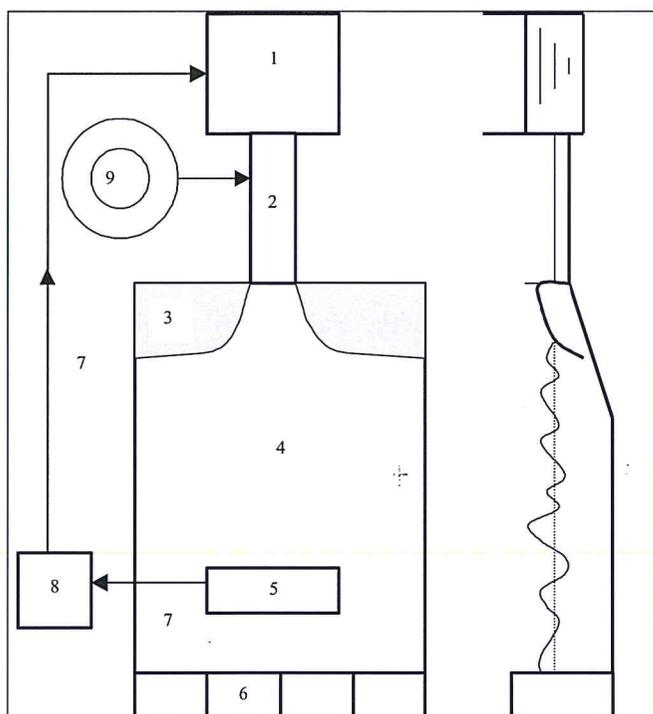


Figura 1 - Interazione getto-moto ondoso.



- 1 - Serbatoio e cassoni di alimentazione
- 2 - Canaletta in plexiglass
- 3 - Spiaggia assorbente
- 4 - Vasca ondogena
- 5 - Scarico di fondo
- 6 - Generatore del moto ondoso
- 7 - Condotte di ritorno
- 8 - Pompe e pozzetto di carico - ricircolo
- 9 - Boiler

C

Figura 2 - Installazione sperimentale.

### ***Canaletta in plexiglass***

I cassoni alimentano la canaletta idraulica in plexiglass, di dimensioni 0.3 m x 0.3 m x 5 m, la quale ha la funzione di immettere il getto all'interno della vasca.

Ad essa è stata attribuita una pendenza molto bassa ( $i=0.0001$ ) al fine di ottenere tutti i possibili profili di corrente in canale. A tal scopo è stata posizionata sul cassone una paratoia di dimensioni 0.3 m x 0.3 m, attraverso la cui regolazione è possibile riprodurre sia profili di corrente lenta (paratoia tutta aperta) che profili di corrente veloce (paratoia ad apertura variabile) all'interno della canaletta.

### ***Vasca ondogenica***

La vasca ondogenica, lunga 21 m e larga 3 m, è realizzata interamente in cls e presenta un fondo di pendenza 1:20 per un tratto di 10 m. Il tirante idrico, mantenuto costante per tutti gli esperimenti, è pari a 0.60 m. Nella sezione terminale della vasca sono posizionati quattro generatori d'onda del tipo a pistone (utilizzati a funzionamento sincrono), mentre in quella iniziale è stata realizzata, in fase di calibrazione del moto ondoso, una spiaggia assorbente per ridurre il fenomeno della riflessione del moto ondoso incidente e successivamente è stato installato un modello che riproduce la foce fluviale. La vasca è munita di uno scarico di fondo di dimensioni 1.5 m x 0.5 m, posto a 7.5 m dal lato opposto alla spiaggia assorbente, al fine di mantenere fisso il livello idraulico durante le prove.

### ***Pompe e pozzetto di carico – ricircolo***

Dallo scarico della vasca si diparte una condotta di uscita in PVC di diametro 200 mm che convoglia l'acqua scaricata al pozzetto di ricircolo. Questo è stato realizzato in cls ed ha dimensioni 2.40 m x 2.00 m x 2.35 m. All'interno di tale pozzetto sono ubicate due pompe sommerse del tipo Flygt, convoglianti 20 l/s in corrispondenza della prevalenza di 4.00 m.

### ***Boiler***

L'impianto sperimentale per la diffusione di acqua "calda" è composto dalle seguenti parti:

- 1) un serbatoio in acciaio zincato della capacità di 3000 l, collaudato per resistere ad una pressione massima di 6 bar e coibentato con poliuretano rivestito in skay (spessore 50 mm);
- 2) un gruppo di resistenze trifase corazzate in acciaio inox (380 V, 50 Hz, P = 15 kW);
- 3) un termometro per il controllo visivo della temperatura, un manometro per il controllo della pressione interna e di un termostato regolabile;
- 4) due elettropompe funzionanti come circolatore gemellare del tipo LOWARA FCG 40-10 T. Tale circolatore è costituito da due pompe in parallelo, ognuna delle quali azionata da un motore elettrico a 3 velocità; la possibilità di azionare una sola pompa o entrambe contemporaneamente garantisce una grande flessibilità d'uso;
- 5) un misuratore di portata ad induzione elettromagnetica modello FLYGT FM 80 M/B. Il diametro del misuratore è pari a 80 mm, ed è inserito nella tubazione di mandata tramite dei giunti flangiati;
- 6) una cassetta coibentata per l'immissione del getto di acqua "calda" in vasca.

Il ciclo tipico di funzionamento dell'impianto su descritto prevede il riempimento del boiler con acqua fredda tramite condotta esterna e successivo riscaldamento ad una temperatura di  $80 \pm 90^\circ\text{C}$ .

L'immissione dell'acqua "calda" nella canaletta avviene attraverso un tubo coibentato collegato ad una cassetta di materiale zincato anch'essa coibentata esternamente, in modo da contenere al minimo la dispersione di calore. Tale cassetta è alloggiata nella canaletta e lo scarico avviene mediante una fenditura, in modo da riprodurre il getto che si adagia sulla corrente idrica preesistente.

### **Descrizione del sistema di generazione del moto ondoso**

La vasca ondogenica realizzata rientra, per le sue caratteristiche, nei cosiddetti modelli *short wave* (Hughes, 1993). Il sistema vasca ondogenica, è costituito dalle seguenti parti:

1. una vasca rettangolare collegata al sistema idraulico su descritto;
2. un sistema di battitori a pale disposti in corrispondenza di una estremità della vasca;
3. una struttura assorbente sul lato opposto a quello dei battitori;
4. una stazione hardware e software per la generazione del moto ondoso;
5. un sistema di sensori costituito da otto sonde resistive, per la misura delle oscillazioni del pelo libero;
6. una stazione hardware e software per la registrazione e la elaborazione dei parametri idrodinamici misurati.

### **Generatore d'onda**

La generazione del moto ondoso viene effettuata mediante un'apparecchiatura composta da un generatore di segnali e da una struttura meccanica, azionata da un motore elettrico passo-passo del tipo brushless IP656.3 Nm – 3000 rpm-2000 W (potenza di picco), che trasforma i segnali anzidetti in spostamenti delle pale, aventi ampiezze e frequenze variabili in funzione del segnale elettronico introdotto dal sistema. Il generatore di onde unidirezionale adottato è del tipo a pistone.

### **Simulazione degli stati di mare**

La simulazione di uno stato di mare reale nella vasca è stata ottenuta attraverso la seguente procedura:

1. determinazione dello stato di mare, in termini di variazioni di densità spettrale;
2. sintesi della serie temporale mediante una funzione pseudo-random;
3. trasformazione della serie nel segnale mandato al battitore;
4. misure ed analisi delle onde generate, per verificare l'accuratezza della simulazione.

Le caratteristiche spettrali degli stati di mare generati sono state rappresentate per tutte le prove con uno spettro di tipo JONSWAP (Ewing, 1975; Carter, 1982):

$$S(f) = G(f) \cdot \alpha \cdot H_s^2 \cdot f_p^4 \cdot f^{-5} \cdot \exp \left[ -1.25 \cdot \left( \frac{f_p}{f} \right)^4 \right] \quad (1)$$

$$\text{dove } G(f) = \gamma \exp \left\{ \frac{(f - f_p)^2}{2 \cdot \sigma \cdot f_p^2} \right\}, \quad \alpha = \frac{0.0624}{\left[ 0.230 + 0.0336 \cdot \gamma - \frac{0.185}{1.9 + \gamma} \right]}, \quad \gamma = 3.3,$$

$$\sigma = 0.07 \text{ per } f \leq f_p, \quad \sigma = 0.09 \text{ per } f > f_p \text{ e } f_p = T_p^{-1}.$$

Il metodo usato per la generazione del segnale da inviare al battitore è del tipo DSA (*Deterministic Spectral Amplitude*), ovvero parzialmente deterministico. Allo scopo di eliminare la ri-riflessione presente in vasca è stato necessario agire sia sulle onde riflesse (spiaggia assorbente), sia sulle caratteristiche della funzione di trasferimento al generatore, modificando in maniera iterativa la funzione di trasferimento fino alla coincidenza tra lo spettro teorico prefissato  $S_{\eta T}(\omega)$  e quello misurato  $S_{\eta m}(\omega)$ .

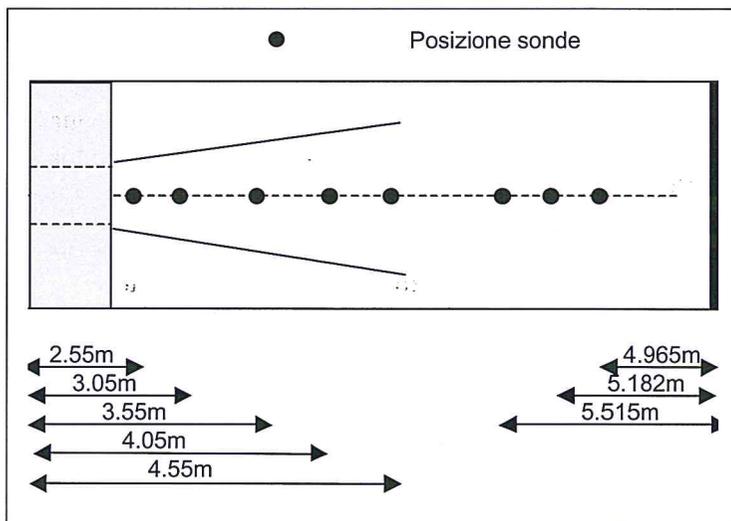
### **Strumentazione di misura**

#### **Sonde di livello**

Per misurare le escursioni del livello idrico sono state utilizzate otto sonde resistive, poste lungo l'asse longitudinale della vasca, di cui tre in prossimità del battitore (*offshore*) e le rimanenti cinque a distanze variabili dalla spiaggia assorbente (*inshore*). In Tabella 1 e Figura 3 sono riportate le suddette posizioni.

**Tabella 1**  
Posizione delle sonde di livello.

Sonde di livello	$x$ (m)	$y$ (m)
1	16.04	0
2	15.81	0
3	15.49	0
4	4.55	0
5	4.05	0
6	3.55	0
7	3.05	0
8	2.55	0



**Figura 3 - Posizione delle sonde di livello.**

**Velocimetro ad ultrasuoni**

Per misurare le tre componenti istantanee di velocità è stato utilizzato un velocimetro ad ultrasuoni (*Acoustic Doppler Velocimeter*) prodotto dalla Nortek. Il velocimetro è stato posto nelle stesse sezioni *inshore*,  $x_i$ , delle sonde di livello ( $x_4 = 4.55$  m,  $x_5 = 4.05$  m,  $x_6 = 3.55$  m,  $x_7 = 3.05$  m,  $x_8 = 2.55$  m) a diverse posizioni orizzontali,  $y_i$ , rispetto all'asse  $x$  (ad esempio  $y_1 = 0.5$  m,  $y_{-1} = -0.5$  m,  $y_2 = 0.6$  m,  $y_{-2} = -0.6$  m, .....,  $y_8 = 1.2$  m,  $y_{-8} = -1.2$  m,  $y_9 = 1.3$  m,  $y_{-9} = -1.3$  m) e verticali,  $z_i$ , (ad esempio  $z_1 = -0.035$  m,  $z_2 = -0.055$  m,  $z_3 = -0.08$  m, .....,  $z_8 = -0.205$  m), così come sintetizzato in Tabella 2.

**Tabella 2 - Posizione del velocimetro.**

$x_i$	$y_i$ (con $i$ da $\pm 1$ a $\pm 11$ ) (m)	$z_i$ (con $i$ da 1 a 15) (m)	$h_i$ (con $i$ da 4 a 8) (m)
4	da -1.1 a 1.1 con passo 0.10	Da -0.035 a -0.315 con passo 0.025	0.335
5	da -0.9 a 0.9 con passo 0.10	Da -0.035 a -0.275 con passo 0.025	0.305
6	da -0.7 a 0.7 con passo 0.10	Da -0.035 a -0.255 con passo 0.025	0.275
7	da -0.7 a 0.7 con passo 0.10	Da -0.035 a -0.215 con passo 0.025	0.253
8	da -0.5 a 0.5 con passo 0.10	Da -0.035 a -0.195 con passo 0.025	0.215

**Termografo**

Il campo di diffusione termica del getto è stato misurato mediante un radiometro a scansione all'infrarosso (FLIR System), costituito dalle seguenti parti:

- 1) un sistema ottico focalizzatore della radiazione captata;
- 2) un sistema di scansione optoelettronico;
- 3) un sistema ottico interno costituito da lenti di collimazione e filtraggio;
- 4) un devar, che fa da contenitore del liquido refrigerante (Azoto a  $-196^\circ\text{C}$ ) e da involucro sotto vuoto per l'elemento rilevatore;
- 5) un preamplificatore del segnale video.

Il sistema è in grado di rilevare variazioni di temperatura fino a  $0.1^\circ\text{C}$ . La misura superficiale di temperatura è stata effettuata su di un'area che include le sezioni di misura suindicate.

## Impostazione delle prove

### Valutazione dei parametri idrodinamici adimensionali

L'obiettivo principale dell'indagine idrodinamica è stato quello di studiare le variazioni del campo di moto indotto dall'immissione di un getto in un ambiente ricettore in quiete o sottoposto all'azione del moto ondoso. I parametri caratteristici indipendenti dell'onda e del getto considerati sono:  $H$  oppure  $He$  = altezza d'onda regolare;  $H_s$  = altezza d'onda significativa;  $T$  oppure  $Te$  = periodo d'onda regolare;  $Tp$  = periodo d'onda di picco;  $L$  = lunghezza d'onda;  $Lp$  = lunghezza d'onda di picco;  $Q_0$  = portata allo sbocco;  $u_0$  oppure  $u_{ms0}$  = velocità allo sbocco.

Le variabili indipendenti dell'onda considerate sono, oltre alla lunghezza d'onda  $L_0$  (numero d'onda  $k_0 = \frac{2 \cdot \pi}{L_0}$ ) e all'ampiezza  $a_0$ , l'altezza del fondale  $h_0$ , la viscosità del fluido  $\mu$ , la densità del fluido  $\rho$

e l'accelerazione di gravità  $g$  (il pedice "0" denota i parametri dell'onda a largo).

Le variabili indipendenti sono state espresse in termini adimensionali, e la loro analisi è stata ottenuta dall'applicazione delle equazioni dinamiche e cinematiche che governano il problema.

Le variabili dipendenti utilizzate, invece, per definire il modello di efflusso sono:

$u_m$  = componente orizzontale della velocità mediata nel tempo (getto);

$u_{ms}$  = componente orizzontale della velocità mediata nel tempo, in superficie (getto);

$u_{mm}$  = componente orizzontale della velocità mediata nel tempo, lungo l'asse (getto);

$u_{mv}$  = componente orizzontale della velocità mediata nel tempo (moto ondoso - getto).

In accordo con le variabili sopra analizzate, i parametri adimensionalizzati utilizzati sono:

$$\frac{b}{L_0}, \frac{H}{L_0}, \frac{b}{L_p}, \frac{H_s}{L_p}, \frac{z}{b_u}, \frac{y}{b_u}, \frac{y}{b_0}, \frac{x}{\sqrt{A_0}}, \frac{u_m}{u_{ms}}, \frac{u_{ms}}{u_{mm}}, \frac{u_{mm}}{u_0}, \frac{u_{mv}}{u_0}$$

dove  $b_0$  è la larghezza della sezione allo sbocco,  $A_0$  è la sezione allo sbocco,  $h_u$  è il valore che assume la coordinata  $z$  dove il rapporto  $\frac{u_m}{u_{ms}}$  è pari a 0.5,  $b_u$  è il valore che assume la coordinata  $y$  dove

il rapporto  $\frac{u_{ms}}{u_{mm}}$  è pari a 0.5.

### Valutazione dei parametri di temperatura adimensionali

In una seconda fase dell'indagine sperimentale, si è analizzato il fenomeno di diffusione termica di uno scarico a temperatura superiore di quella dell'ambiente ricettore. Le variabili indipendenti che caratterizzano il getto superficiale "caldo" sono: la portata di acqua "calda" immessa, la posizione  $x$  di immissione, e la temperatura allo sbocco,  $T_0$ . Al fine di rendere generalizzabili i risultati degli esperimenti, le variabili sono state espresse in termini adimensionali.

In accordo con le variabili sopra analizzate, i parametri dipendenti adimensionalizzati sono:

$$\frac{x}{\sqrt{A_0}}, \frac{y}{\sqrt{A_0}}, y/b_T, \frac{\Delta T_s}{\Delta T_m}; \frac{\Delta T_s}{\Delta T_0}; \frac{\Delta T_m}{\Delta T_0}$$

dove:

$\Delta T_s$  è la differenza di temperatura ( $T_s - T_a$ ), dove  $T_s$  è la temperatura in superficie e  $T_a$  è la temperatura ambiente;

$\Delta T_0$  è la differenza di temperatura ( $T_0 - T_a$ );

$\Delta T_m$  è la differenza di temperatura ( $T_m - T_a$ ), dove  $T_m$  è la massima temperatura in superficie lungo l'asse  $x$  del getto;

$\Delta T_w$  è la temperatura in superficie in presenza di getto - moto ondoso;

$b_T$  è il valore che assume la coordinata  $y$  dove il rapporto  $\frac{\Delta T_s}{\Delta T_m}$  è pari a 0.5.

### Definizione delle caratteristiche di prova

Le prove sperimentali sono state eseguite relativamente alle seguenti tre condizioni:

- moto ondoso in assenza di getto;
- getto in assenza di moto ondoso;
- interazione getto-moto ondoso.

La Tabella 3 mostra gli stati di mare selezionati per le varie condizioni di prova. La serie RA/RE100 è stata realizzata per calibrare il moto ondoso regolare (RE) e confrontare le sue caratteristiche energetiche con quelle random (RA). La serie RA/RE200 è stata eseguita per valutare il campo di moto e di diffusione termica. La durata di ciascuna prova è stata fissata pari a 350 s e l'acquisizione del profilo d'onda irregolare è iniziata dopo 150 s, necessari per raggiungere la condizione di regime. Il segnale è stato acquisito con una frequenza di campionamento di 20 Hz. Come già detto, si è utilizzato un metodo di calibrazione del moto ondoso che tiene conto del fenomeno della doppia riflessione. I risultati ottenuti mostrano una buona coincidenza tra lo spettro assegnato e quello misurato. Il coefficiente medio di riflessione, calcolato per ogni prova seguendo il metodo proposto da Mansard et al. (1980), è risultato pari a circa 0.07. Per quanto concerne le onde regolari, sono state riprodotte in canale onde stokiane al primo e al secondo ordine di approssimazione. La durata di ciascuna prova è stata fissata pari a 26 s per contenere gli effetti della ri-riflessione. La Tabella 3 mostra le caratteristiche ondose di prova. I risultati ottenuti restituiscono un coefficiente medio di riflessione pari a 0.15. Le misure del campo di moto della corrente sono state effettuate in assenza e in presenza di moto ondoso. Nel caso di sola corrente la durata di ciascuna prova è stata fissata pari a 800 s e l'acquisizione del segnale è iniziata dopo 600 s, necessari per raggiungere la condizione di regime. Il segnale è stato acquisito con una frequenza di campionamento di 20 Hz. La portata di prova è stata fissata pari a 15 l/s.

Nel seguito è stata analizzata solo la componente orizzontale di velocità,  $u(x, y, z, t)$ , assunta positiva se concorde all'asse  $x$  di Figura 1. Per il campo di diffusione termica, le suddette prove sono state eseguite immettendo in vasca un getto d'acqua superficiale a temperatura ( $T_0=35^\circ\text{C}$ ) superiore a quella dell'ambiente ricettore ( $T_a=13^\circ\text{C}$  e  $T_a=20^\circ\text{C}$ ). Le prove effettuate sono caratterizzate da due diversi numeri di Richardson<sup>1</sup> pari rispettivamente a 0.03 e 0.06. Il termografo acquisisce immagini digitali con una frequenza di campionamento di 1Hz.

Tabella 3 - Parametri caratteristici di prova.

<i>Test</i>	$H_c$ (cm)	$T_c$ (s)	$L_o$ (cm)	$H_c/L_o$	$b/L_o$		<i>Test</i>	$H_s$ (cm)	$T_p$ (s)	$L_p$ (cm)	$H_s/L_p$	$b/L_p$
RE100	3.1	1.08	286	0.011	0.21		RA100	4.4	1.20	212	0.021	0.28
RE101	3.7	1.08	286	0.013	0.21		RA101	5.3	1.20	212	0.025	0.28
RE102	5.2	1.08	286	0.018	0.21		RA102	7.3	1.20	212	0.034	0.28
RE103	3.1	1.26	378	0.008	0.16		RA103	4.4	1.40	271	0.016	0.22
RE104	3.7	1.26	378	0.010	0.16		RA104	5.3	1.40	271	0.020	0.22
RE105	5.2	1.26	378	0.014	0.16		RA105	7.3	1.40	271	0.027	0.22
RE106	3.1	1.44	449	0.007	0.13		RA106	4.4	1.60	327	0.013	0.18
RE107	3.7	1.44	449	0.008	0.13		RA107	5.3	1.60	327	0.016	0.18
RE108	5.2	1.44	449	0.011	0.13		RA108	7.3	1.60	327	0.022	0.18
RE201	6.0	1.26	230	0.026	0.26		RA201	8.0	1.40	270	0.030	0.22
RE202	11.0	1.26	230	0.048	0.26		RA202	14.0	1.40	270	0.052	0.22

<sup>1</sup> Il numero di Richardson è pari a  $R_{i0} = \frac{g \cdot b_0 \cdot \Delta\rho_0 / \rho_a}{u_0^2}$  dove  $\Delta\rho_0$  è la differenza tra  $\rho_0$  (densità dello strato superficiale del getto a temperatura  $T_0$ ) e  $\rho_a$  (densità dello strato superficiale d'acqua del ricettore a temperatura ambiente  $T_a$ ).

Da un'indagine preliminare si è osservato che la temperatura dell'ambiente ricettore, a seguito dell'immissione del getto caldo, si manteneva costante per un tempo di circa 20 minuti, trascorsi i quali, si ha una variazione di un 1°C. Pertanto, è stato necessario aspettare circa 5 minuti tra due test consecutivi per ripristinare le condizioni iniziali. In presenza del moto ondoso random, a seguito di una serie di prove preliminari, si è riscontrato che le condizioni di regime venivano ottenute dopo un tempo di circa 750 s, trascorso il quale iniziava la registrazione del segnale di velocità per una durata di 200 s. Al fine di verificare la simmetria del getto rispetto all'asse  $x$ , si sono immerse sulla corrente delle particelle di polistirolo e si è osservata la loro traiettoria nel tempo.

**Risultati delle prove**

I dati analizzati in questo lavoro sono:

- 1) le variazioni del profilo dell'onda nel tempo, in sezioni opportunamente scelte (vedi Tab. 1);
- 2) la componente orizzontale della velocità delle particelle, in sezioni prestabilite (vedi Tab. 2);
- 3) le variazioni di temperatura indotte dall'immissione di un getto a temperatura maggiore di quella dell'ambiente ricettore, sia esso in quiete o sottoposto all'azione del moto ondoso incidente.

**Moto ondoso regolare**

In Figura 4 è riportato, a titolo di esempio, il confronto tra il profilo d'onda misurato e quello calcolato mediante la teoria di Stokes al II ordine di approssimazione. Analogamente si è confrontata la variazione della componente orizzontale di velocità,  $u$ , lungo l'asse  $x$  in fase di cresta, con il corrispondente andamento teorico; i suddetti confronti hanno mostrato una buona coincidenza tra le misure effettuate e le condizioni teoriche assegnate in fase di calibrazione.

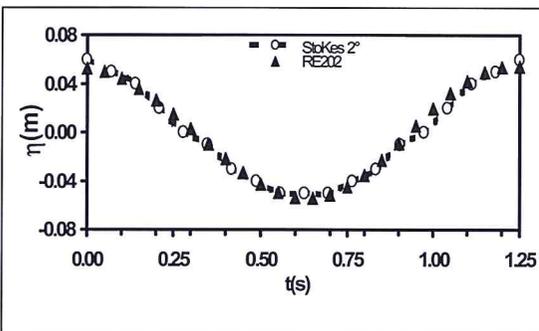


Figura 4 - Cronogramma della  $\eta(x,t)$  relativo alla prova RE202.

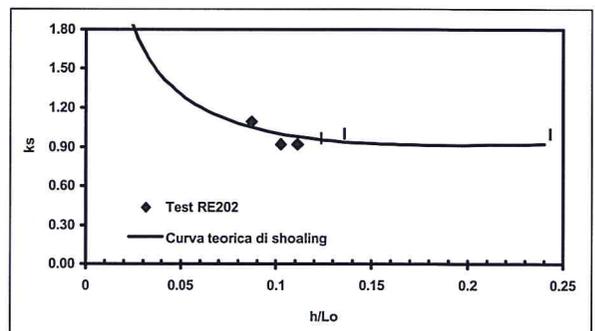


Figura 5 - Valori sperimentali e curva teorica di  $k_s$  al variare di  $h/L_0$  in assenza di getto.

La variazione dell'altezza d'onda in assenza di corrente, da largo a sottocosta (fenomeno di shoaling), è riportata in Figura 5 con riferimento alla prova RE202. I punti sperimentali rappresentati dal coefficiente di shoaling,  $k_s$ , in funzione della profondità relativa  $h/L_0$  sono ben interpretati dall'andamento teorico ricavato dalla teoria di Airy.

**Moto ondoso random**

Come sarà meglio evidenziato nel seguito, l'interazione del getto con onde random è più complessa di quella con onde regolari; per tale motivo nasce l'esigenza di introdurre un'onda regolare energeticamente equivalente allo spettro JONSWAP, nel rispetto della densità di energia e del flusso di energia (Rebaudengo e Scarsi, 1984). A tal proposito, le caratteristiche di prova nel caso di moto ondoso regolare, sono state ottenute utilizzando le formule proposte dagli Autori su citati che forniscono l'altezza ed il periodo dell'onda regolare energeticamente equivalente:

$$H_e = 2.828 \cdot \sqrt{m_0} \quad (2) \qquad T_e = m_{-1} / m_0 \quad (3)$$

**Misure di velocità del getto**

Per quanto concerne il campo di moto relativo alla sola presenza del getto, in Figura 6 è riportato, a titolo di esempio, il cronogramma della componente di velocità  $u(x, y, z, t)$  relativamente alla sezione di misura  $x = x_7, y = y_0, z = z_5$ .

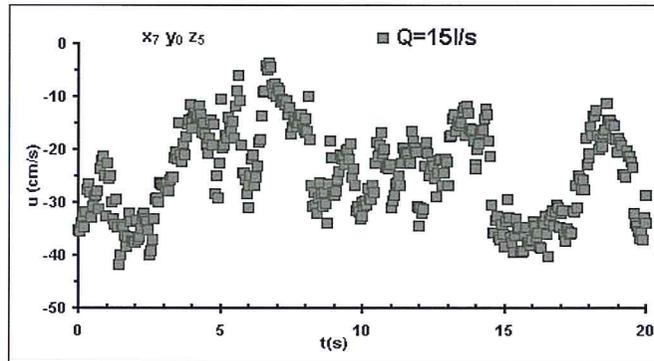


Figura 6 - Cronogramma u-t relativo alla prova Q=15l/s.

La componente della velocità orizzontale misurata  $u(x, y, z, t)$  è definita come:

$$u(x, y, z, t) = u'(x, y, z, t) + u_m(x, y, z) \tag{4}$$

dove  $u_m(x, y, z)$  è il valore mediato nel tempo della velocità istantanea  $u(x, y, z, t)$ , e  $u'(x, y, z, t)$  rappresenta la fluttuazione turbolenta. La velocità media è stata determinata integrando la  $u(x, y, z, t)$  in un tempo sufficientemente lungo ( $t_0=200$  s), in modo da ottenere  $u'(x, y, z, t) \approx 0$ .

**Misure di temperatura del getto**

Per quanto riguarda lo studio del campo di diffusione termica, le immagini registrate dal termografo sono la media di 16 fotogrammi acquisiti ad una frequenza di 1Hz. In Figura 7 è riportata una sequenza di immagini relativamente alla prova  $Q = 15l/s R_{t0}=0.06$ .

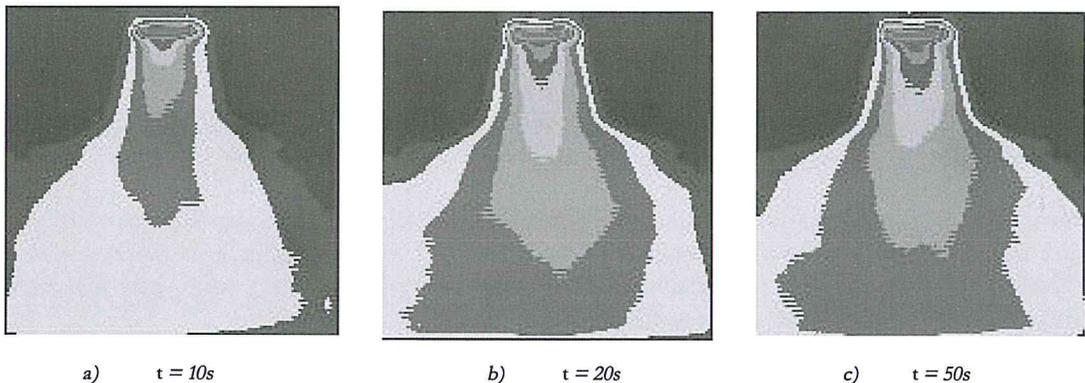


Figura 7 - Sequenza relativa alla prova Q=15l/s.

A seguito di una serie di prove preliminari, si è riscontrato che le condizioni di regime venivano ottenute dopo un tempo di 20 s dall'immissione del getto a temperatura  $T_0 = 35^\circ C$  (Fig. 7b e c); tale condizione si manteneva inalterata per 80 s, trascorsi i quali la temperatura del ricettore aumentava di circa un  $1^\circ C$ . Un limite dello strumento utilizzato è quello di restituire l'immagine acquisita in maniera distorta nel piano  $(x, y)$ ; per tale motivo è stato necessario effettuare un passaggio di scala, tenendo conto del campo di misura reale e di quello registrato dalla telecamera. L'immagine distorta

ha la forma di un trapezio, la cui base minore è posizionata davanti all'osservatore. Si nota che la maggiore distorsione si ha lungo l'asse x, dove un pixel (unità di misura del fotogramma) è risultato pari a 2,40 cm, mentre lungo l'asse y un pixel ha assunto valori diversi per ogni x. Con tale scalatura è stato possibile ottenere le immagini e i relativi valori di temperatura non distorti spazialmente, nel campo di misura prestabilito.

**Misure di velocità del getto-moto ondoso**

Per quanto concerne il campo di moto relativo del getto in presenza di moto ondoso, in Figura 8 è riportato il cronogramma della componente di velocità  $u(x, y, z, t)$  relativamente alla sezione di misura  $x=x_7, y=y_0, z=z_5$ . Nel caso di interazione corrente-moto ondoso, la natura periodica del campo di moto suggerisce la scomposizione della variabile  $u(x, y, z, t)$  in tre aliquote:

$$u(x, y, z, t) = \tilde{u}(x, y, z, t) + u'(x, y, z, t) + u_m(x, y, z) \tag{5}$$

dove  $\tilde{u}(x, y, z, t)$  è il contributo della componente di oscillazione dovuta al moto ondoso. In tal caso la velocità media è stata determinata integrando la  $u(x, y, z, t)$  in un tempo  $D$  ( $D = 100 T$ ) sufficientemente lungo da eliminare la componente  $u'(x, y, z, t)$ , e tale da risultare un multiplo del periodo  $T$  per eliminare la componente oscillatoria  $\tilde{u}(x, y, z, t)$ .

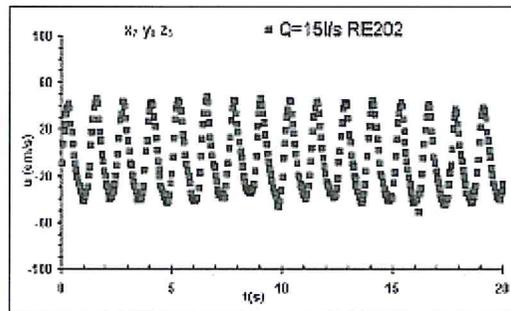


Figura 8 - Cronogramma u-t relativo alla prova RE202 Q=15l/s. Moto ondoso regolare energeticamente equivalente.

Per tutte le prove effettuate nel caso d'interazione corrente-moto ondoso, si è verificato che il campo di moto, in presenza di un moto ondoso random, è ben interpretato con la teoria dell'onda energeticamente equivalente. Nella Figura 9 sono state messe a confronto le velocità medie  $u_m(z)$ , lungo la verticale, relativamente ad una condizione di prova caratterizzata da onde random e dalla corrispondente onda regolare equivalente, evidenziando come i due profili sono perfettamente coincidenti.

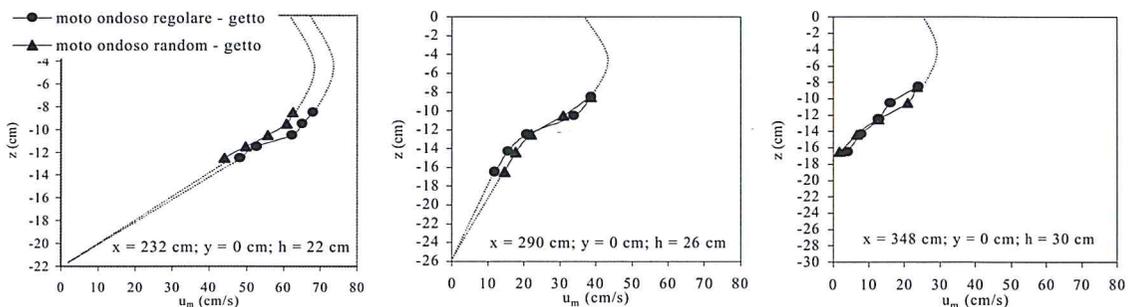


Figura 9 - Profili della velocità  $u_m(z)$  in presenza di moto ondoso regolare e random.

### Misure di temperatura getto-moto ondoso

In Figura 10 è riportata una sequenza di immagini relativamente alla prova RE201  $Q = 15\text{l/s}$ . Le condizioni di regime sono state ottenute dopo un tempo di 30 s dall'immissione del getto a temperatura  $T_0 = 35^\circ\text{C}$  (Fig. 10b e c); tale condizione si manteneva inalterata per 50 s, trascorsi i quali la temperatura del ricettore aumentava di circa un  $1^\circ\text{C}$ .

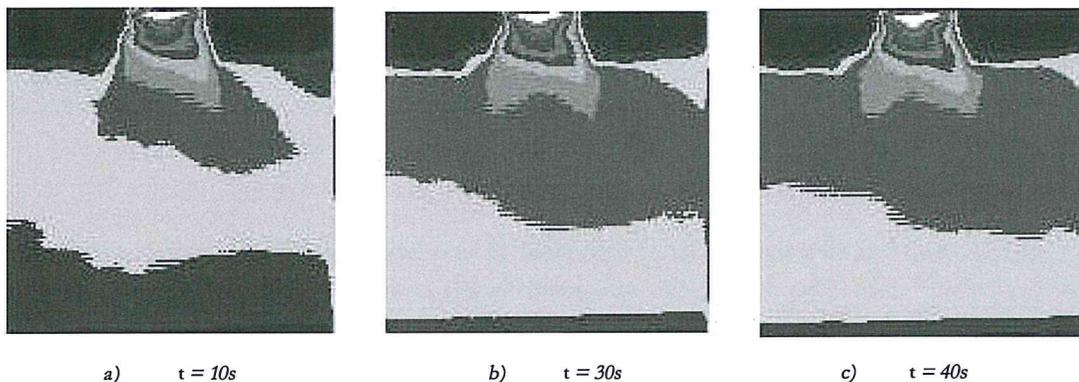


Figura 10 - Sequenza relativa alla prova RE201  $Q=15\text{l/s}$ .

### Analisi dei risultati

Nell'analisi dei risultati, di seguito riportata, si darà conto delle elaborazioni e delle interpretazioni eseguite relativamente all'azione di un getto che si immette in acqua ferma, e in una seconda fase in opposizione ad un moto ondoso regolare.

Le elaborazioni effettuate sono relative ai seguenti aspetti del fenomeno in esame:

- 1) determinazione delle variazioni delle caratteristiche dell'onda per effetto del getto;
- 2) analisi del campo di moto nel piano  $(x, y)$  e  $(x, z)$ , dovuto alla presenza di un getto che si immette in un ambiente ricettore, in quiete o sottoposto all'azione del moto ondoso;
- 3) analisi della diffusione termica nel piano  $(x, y)$ , dovuta alla presenza di un getto a temperatura superiore a quella dell'ambiente ricettore, in quiete o sottoposto all'azione del moto ondoso.

### Variazioni delle caratteristiche dell'onda

L'analisi dei risultati relativi alla variazione dell'altezza d'onda in presenza di corrente, da largo a sottocosta, è riportata in Figura 11 con riferimento alla prova  $Q=15\text{l/s}$  RE202.

In presenza di corrente si osserva come, al diminuire della profondità relativa ( $0.05 < h/L < 0.1$ ), si ha un sensibile aumento del coefficiente  $k_s$ .

Per tutte le prove effettuate si è riscontrato, nella sezione prossima allo sbocco ( $x_8$ ), un incremento dell'altezza d'onda variabile tra il 2% e il 10%.

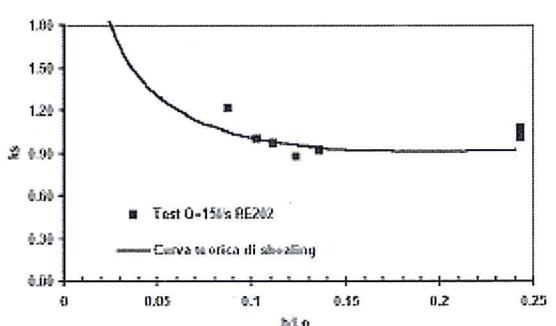


Figura 11 - Valori sperimentali e curva teorica di  $k_s$  al variare di  $h/L_0$  in presenza di corrente.

**Analisi del campo di moto di un getto piano in assenza di moto ondoso**

Da un'analisi degli studi precedenti riguardanti il campo di moto generato da un getto piano in un ambiente ricettore in quiete, si è notato come le misure effettuate da Pande e Rajaratnam (1977) e le espressioni interpolari da essi proposte risultino le più adatte ad interpretare i fenomeni in esame.

In particolare gli Autori, per numeri di Richardson moderati ( $R_{io}=0.15 \div 0.56$ ) e grandi ( $R_{io}=0.79 \div 1.14$ ), hanno proposto le seguenti equazioni esponenziali (Gaussiana) per descrivere l'andamento dei profili di velocità  $u_m(x, y, z)$  sia nel piano  $(x, y)$  che nel piano  $(x, z)$ :

$$\frac{u_{ms}}{u_{mm}} = e^{-0.693 \left(\frac{y}{b_n}\right)^2} \quad (6)$$

$$\frac{\Delta T_s}{\Delta T_m} = e^{-0.693 \left(\frac{y}{b_r}\right)^2} \quad (7)$$

$$\frac{u_m}{u_{ms}} = e^{-0.693 \left(\frac{z}{b_n}\right)^2} \quad (8)$$

$$\frac{\Delta T}{\Delta T_m} = e^{-0.693 \left(\frac{z}{b_r}\right)^2} \quad (9)$$

Gli Autori hanno fornito, inoltre, delle equazioni che descrivono le variazioni di velocità e temperatura, al variare della distanza relativa dallo sbocco,  $x/\sqrt{A_o}$ , e del numero di Richardson:

$$\frac{u_{mm}}{u_{mso}} = \frac{5.68 \cdot R_{io}^{\frac{1}{3}}}{\left(x/\sqrt{A_o}\right)^{\frac{2}{3}}} \quad (R_{io}=0.15 \div 0.79) \quad (10)$$

$$\frac{u_{mm}}{u_{mso}} = \frac{1.43 \cdot R_{io}^{\frac{6}{1}}}{\left(x/\sqrt{A_o}\right)^{\frac{1}{3}}} \quad (R_{io}=0.79 \div 1.14) \quad (11)$$

$$\frac{\Delta T_m}{\Delta T_o} = \frac{4.42 \cdot R_{io}^{\frac{1}{3}}}{\left(x/\sqrt{A_o}\right)^{\frac{2}{3}}} \quad (R_{io}=0.15 \div 0.79) \quad (12)$$

$$\frac{\Delta T_m}{\Delta T_o} = \frac{3.17 \cdot R_{io}^{\frac{3}{1}}}{\left(x/\sqrt{A_o}\right)^{\frac{2}{3}}} \quad (R_{io}=0.79 \div 1.14) \quad (13)$$

Pertanto, in una prima fase dell'analisi, è stata verificata la validità delle espressioni proposte da Pande e Rajaratnam (1977) per i casi esaminati, e là dove queste risultino inadeguate sono state proposte nuove espressioni interpolari.

**Cinematica del getto nel piano  $(x, z)$**

In Figura 12, a titolo esemplificativo, sono riportati i profili verticali delle velocità  $u_m(x, y, z)$  lungo l'asse, per la portata  $Q=15l/s$ . Si nota, come nella sezione prossima allo sbocco ( $x_8$ ) i profili presentano un gradiente elevato, che via via decresce allontanandosi dalla sezione di sbocco.

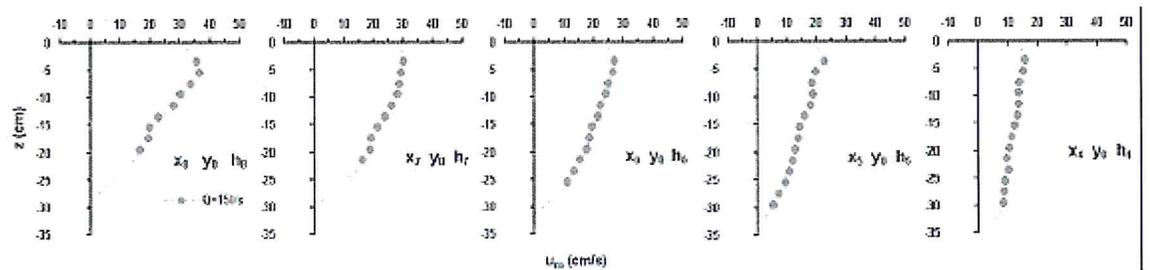


Figura 12 - Profili della velocità  $u_m(x, y, z)$  del getto nel piano  $(x, z)$ .

Si è proceduto quindi alla adimensionalizzazione dei suddetti profili, riportando in diagramma la velocità relativa  $u_m/u_{ms}$  in funzione di  $z/h_u$ . I dati sperimentali lungo l'asse risultano ben interpretati dall'equazione proposta da Rajaratnam (eq. 8). Lateralmente si riscontra una maggiore dispersione, così come mostrato in Figura 13. Quanto su detto è confermato da un'analisi di regressione (Tab. 4) dalla quale si evince come il coefficiente di dispersione  $\sigma$  aumenti al crescere di  $y/\sqrt{A_0}$ . Nelle suddette tabelle sono riportate le espressioni interpolari che meglio si adattano ad interpretare i profili di velocità, nelle sezioni trasversali all'asse del getto.

Tabella 4 - Dati SUN per  $Q=15$  l/s e relative equazioni interpolari.

$y/\sqrt{A_0}$	EQUAZIONE $n^\circ \text{ dati} = 60$	R	$\sigma$
0	$u_m/u_{ms} = e^{-0.693(z/b)^2}$	0.976	0.0018
$\pm 0.55$	$u_m/u_{ms} = 1.07 e^{-0.598(z/b)^{1.43}}$	0.890	0.0114
$\pm 0.55$	$u_m/u_{ms} = e^{-0.693(z/b)^2}$	0.819	0.0180
$\pm 1.10$	$u_m/u_{ms} = 1.10 e^{-0.659(z/b)^{1.267}}$	0.900	0.0129
$\pm 1.10$	$u_m/u_{ms} = e^{-0.693(z/b)^2}$	0.842	0.0199

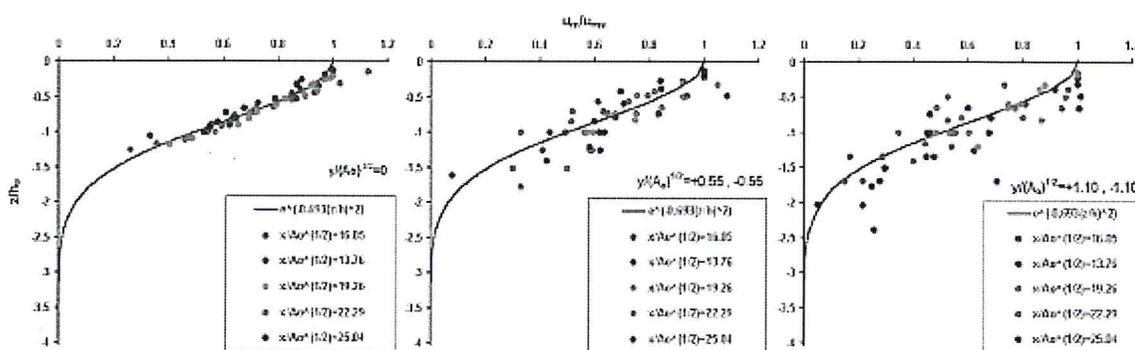


Figura 13 - Profili della velocità  $u_m/u_{ms}$  in funzione di  $z/h_u$  ed eq. (8).

**Cinematica e campo di diffusione termica del getto nel piano (x, y)**

Nella Figura 14 sono riportati i profili delle velocità  $u_m(x, y, z)$  e delle temperature  $T(x, y, z)$  trasversali all'asse della corrente, relativamente alla portata di 15l/s. Si nota come, nella sezione prossima allo sbocco, i profili di velocità presentano una distribuzione del tipo a campana, con un gradiente che tende a ridursi fino alla sezione  $x_4$ ; ciò è dovuto principalmente all'allargamento trasversale della corrente.

Per quanto riguarda le temperature si osserva come, passando dalla sezione  $x_8$  ad  $x_4$ , l'andamento dei profili si modifica da gaussiano a quasi lineare uniforme.

Un modo diverso di visualizzare i risultati su detti è quello di rappresentare la temperatura mediante curve isoterme opportunamente adimensionalizzate ( $\Delta T_s/\Delta T_0$ ) nel piano ( $x/\sqrt{A_0}, y/\sqrt{A_0}$ ), così come riportato nella Figura 15, relativamente alla prova  $Q=15$ l/s  $Ri_0=0.03$ . Da tale grafico è evidente, come nella sezione  $y = 15\sqrt{A_0}$  il valore  $\Delta T_s = 0.5 \cdot \Delta T_0$ .

Come già fatto per le misure nel piano (x, z), i profili di velocità sono stati adimensionalizzati secondo i criteri proposti da Pande e Rajaratnam (1977), ovvero si sono riportati i valori  $u_{ms}/u_{mm}$  in funzione di  $y/b_u$ . La relazione (6) è adeguata, visto il buon coefficiente di correlazione e lo scarto quadratico medio, come mostrato in Figura 16.

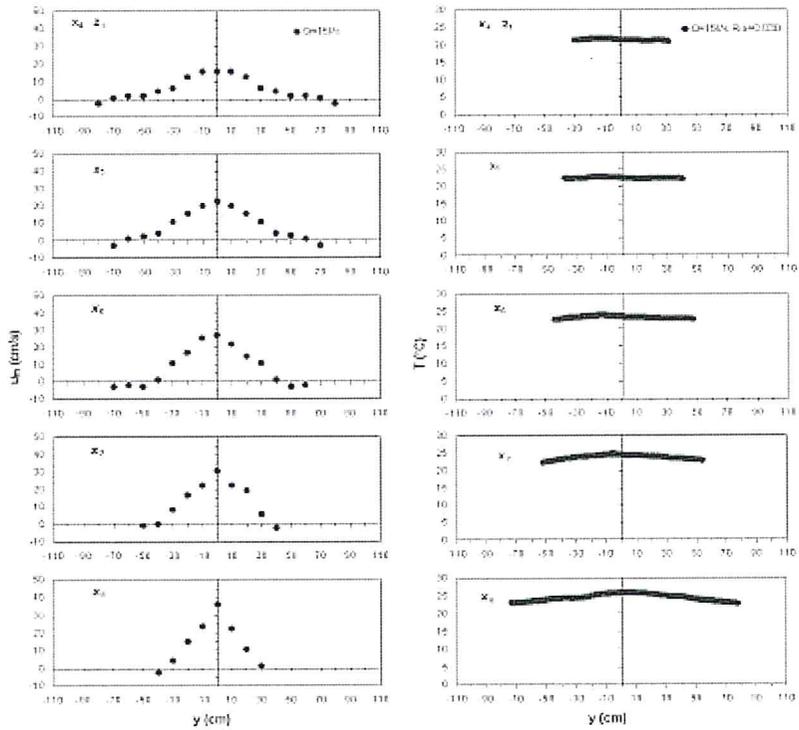


Figura 14 - Profili della velocità  $u_m(x, y, z)$  e delle temperature  $T(x, y, z)$  del getto nel piano  $(x, y)$ .

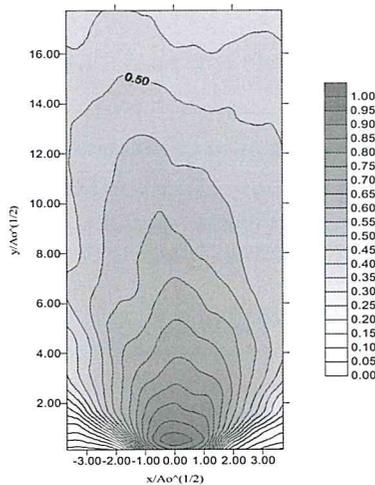


Figura 15- Andamento delle curve isoterme nel caso di  $Q=151/s$  nel piano  $(y/\sqrt{A_0}, x/\sqrt{A_0})$ .

Analogamente per le temperature, per  $Ri_0=0.03 - 0.06$ , si è diagrammato il rapporto  $\Delta T_s / \Delta T_m$  in funzione di  $y/b_T$  per le sezioni  $x_8-x_7-x_6$ , così come riportato in Figura 17. Si nota un buon accordo tra i dati sperimentali e la curva teorica (eq. 7) per valori  $-1 < y/b_T < +1$ . Per quanto riguarda le sezioni  $x_5-x_4$ , si è osservato dalle misure effettuate che il rapporto  $\Delta T_s / \Delta T_m$  al variare di  $y/b_T$  assume un andamento lineare quasi uniforme.

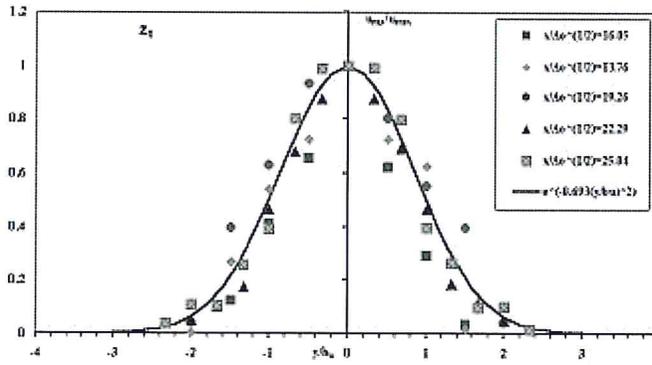


Figura 16 - Valori sperimentali ed eq.ne (6) di  $u_{ms}/u_{mm}$  in funzione di  $y/b_u$ .

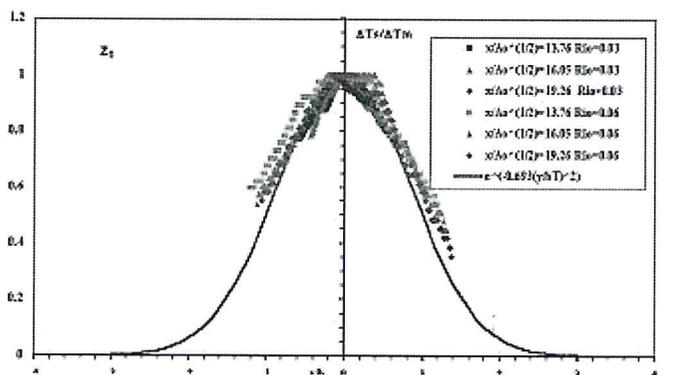


Figura 17 - Valori sperimentali eq. (7) di  $\Delta T_s/\Delta T_m$  in funzione di  $y/b_T$ .

**Analisi del campo di moto di un getto piano in presenza di moto ondoso**

Nel caso di interazione getto - moto ondoso, dall'elaborazione dei dati si sono ricavate espressioni interpolari che interpretano i fenomeni nel piano (x, z), mentre nel piano (x, y) si propongono abachi che descrivono il decremento percentuale in fissate sezioni.

**Cinematica del moto ondoso – getto nel piano (x, z)**

Nella Figura 18 sono riportati, in presenza e assenza del moto ondoso (RA201 e RA202), i profili verticali delle velocità  $u_{mw}$ . Si nota come in presenza di moto ondoso, tali profili riducono in maniera sensibile il proprio gradiente, il quale tende quasi ad annullarsi nelle sezioni  $x_4$ - $x_5$  con valori della velocità prossimi a zero.

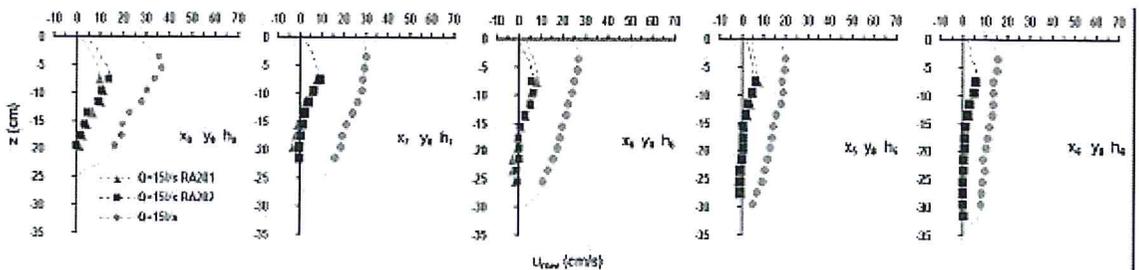


Figura 18 - Profili della velocità  $u_{mw}(x, y, z)$  in assenza e in presenza di moto ondoso nel piano (x,z).

Si è proceduto, quindi, alla adimensionalizzazione dei suddetti profili utilizzando il seguente parametro:  $\frac{\Delta w}{\Delta w_s}$ , dove  $\Delta w = u_{mw} - u_{mwm}$  e  $\Delta w_s = u_{mws} - u_{mwm}$ , essendo rispettivamente  $u_{mwm}$  e  $u_{mws}$  la velocità minima e quella superficiale del getto in presenza del moto ondoso, in una assegnata sezione. In Tabella 5 e nelle Figure 19 e 20 sono riportate, per assegnati valori di  $y/\sqrt{A_o}$  (0, ± 0.55, ± 1.10), le espressioni esponenziali che meglio interpretano i dati sperimentali:

$$\frac{\Delta w}{\Delta w_s} = 1.17e^{-0.716\left(\frac{z}{b_u}\right)^{2.84}} \quad Q=151/s \text{ RA201} \quad (14)$$

$$\frac{\Delta w}{\Delta w_s} = 1.45e^{-0.965\left(\frac{z}{b_u}\right)^{2.33}} \quad Q=151/s \text{ RA202} \quad (15)$$

Si sono confrontate le suddette curve con le gaussiane ricavate nel caso di solo getto; tale confronto evidenzia come il moto ondoso modifica la forma della curva, rendendola non più di tipo gaussiana ma esponenziale cubica.

Tabella 5 - Dati SUN con relative equazioni interpolari.

$y/\sqrt{A_o}$	$n^\circ$ dati	EQUAZIONE $Q=15 \text{ l/s RA201}$	R	$\sigma$	EQUAZIONE $Q=15 \text{ l/s RA202}$	R	$\sigma$
0	48	$\Delta w/\Delta w_s = 1.17e^{-0.716(z/b_u)^{2.84}}$	0.952	0.0113	$\Delta w/\Delta w_s = 1.45e^{-0.965(z/b_u)^{2.33}}$	0.915	0.0201
±0.55	52	$\Delta w/\Delta w_s = 1.22e^{-0.613(z/b_u)^{2.62}}$	0.982	0.00464	$\Delta w/\Delta w_s = 1.06e^{-0.564(z/b_u)^{3.89}}$	0.984	0.00478
±1.10	52	$\Delta w/\Delta w_s = 1.39e^{-0.951(z/b_u)^{2.05}}$	0.964	0.00890	$\Delta w/\Delta w_s = 1.09e^{-0.588(z/b_u)^{3.05}}$	0.963	0.00966

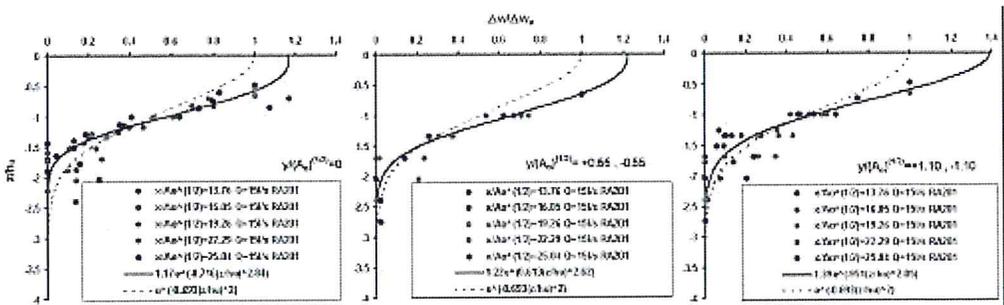


Figura 19 - Profili della velocità  $\Delta w/\Delta w_s$  in funzione di  $z/h_u$ .

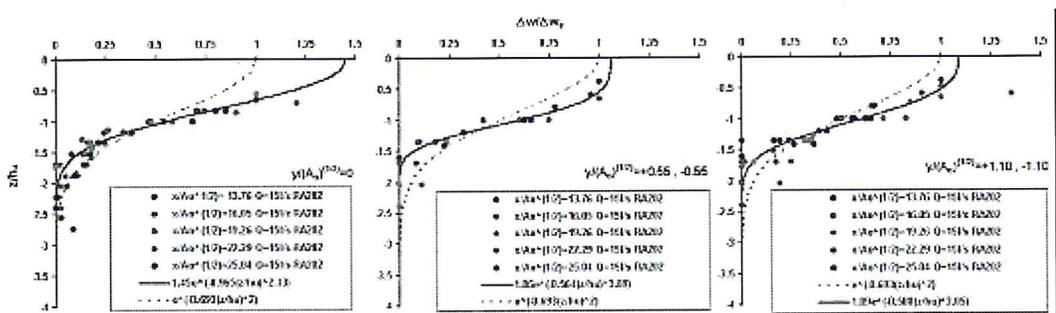


Figura 20 - Profili della velocità  $\Delta w/\Delta w_s$  in funzione di  $z/h_u$ .

**Cinematica e campo di diffusione termica del moto ondoso – getto nel piano (x, y)**

Nella Figura 21 e 22 sono riportati, in presenza del moto ondoso regolare (RA201 e RA202), i profili delle velocità  $u_{mw}$  e delle temperature  $T(x, y, z)$  trasversali all’asse della corrente. Si nota come in presenza di moto ondoso, i profili passano dalla distribuzione gaussiana, tipica del solo getto, ad una distribuzione lineare uniforme. In particolare i profili di velocità, relativamente alle prove  $Q=151/s$  RA201 - 202, sono praticamente coincidenti in ogni sezione, evidenziando così la poco

influenza dell'altezza d'onda nel fenomeno d'interazione, condizione che non si verifica per il campo delle temperature.

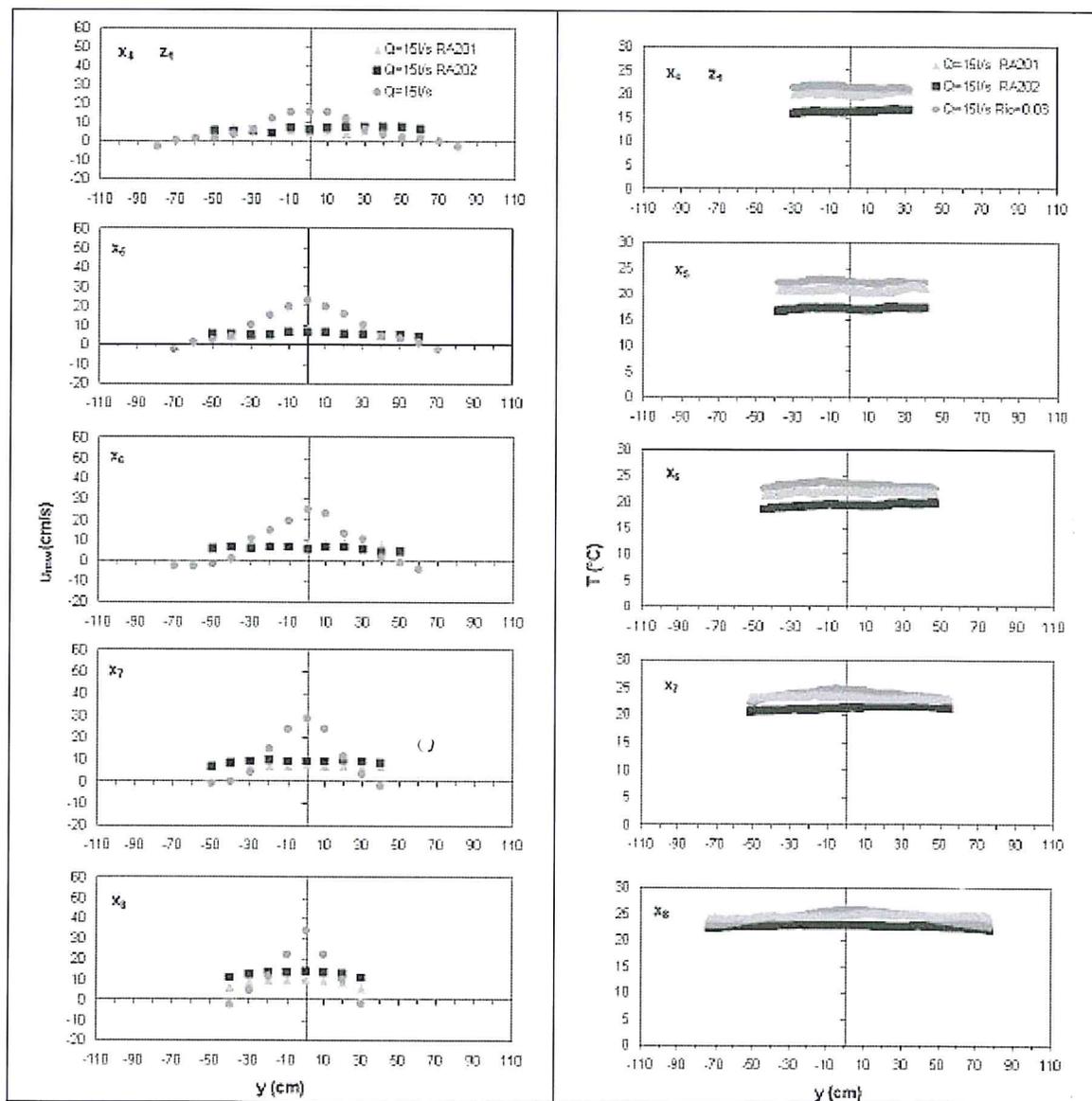


Figura 21 - Profili della velocità  $u_{mw}(x, y, z)$  del getto-moto ondoso nel piano  $(x,y)$ .

Figura 22 - Profili della temperatura  $T(x, y, z)$  del getto-moto ondoso nel piano  $(x,y)$ .

I risultati ottenuti sono stati rappresentati mediante curve isoterme opportunamente adimensionalizzate ( $\Delta T_s / \Delta T_0$ ) nel piano  $(x/\sqrt{A_0}, y/\sqrt{A_0})$ , così come riportato nelle Figure 23 per le prove  $Ri_o=0.03$  RA201-202. Da tali grafici, è evidente come la presenza del moto ondoso determina un incremento della quantità di moto; relativamente alla prova  $Ri_o=0.03$  RA201 il valore  $\Delta T_s = 0.5 \cdot \Delta T_0$  si ha nella sezione  $y = 11\sqrt{A_0}$ , mentre per  $Ri_o=0.03$  RA202 tale valore si raggiunge in corrispondenza di  $y = 7\sqrt{A_0}$ .

Il problema della variazione indotta dal moto ondoso al campo di moto della corrente nel piano (x, y) è stato esaminato facendo riferimento al seguente termine:

$$\Delta u_{mv} = \frac{100(u_m - u_{mv})}{u_m}$$

che rappresenta, alla generica  $x/\sqrt{A_0}$ , il decremento percentuale della velocità in presenza di moto ondoso, rispetto al valore,  $u_m$ , in condizioni di quiete.

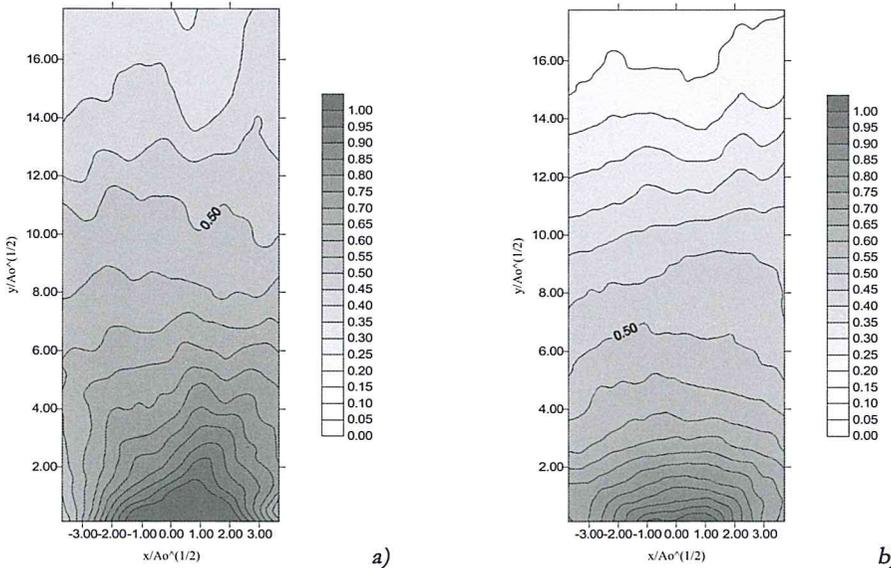


Figura 23 - Andamento delle curve isoterme nel caso  $R_{io}=0.03$ : a) RA201 e b) RA202 nel piano  $(y/\sqrt{A_0}, x/\sqrt{A_0})$ .

La correlazione trovata lega i valori di  $\Delta u_{mv}$  ed i parametri caratteristici del moto ondoso ( $b/L, H/L$ ), con i rapporti adimensionali,  $x/\sqrt{A_0}, y/b_0$ . Nella Figura 24 è riportato in diagramma, per fissati valori di  $x/\sqrt{A_0}$ , il decremento percentuale  $\Delta u_{mv}$  rispetto alla larghezza relativa del getto  $y/b_0$ . Si osserva che il decremento percentuale  $\Delta u_{mv}$  decresce all'aumentare della larghezza relativa del getto  $y/b_0$ , e che il gradiente della curva  $\Delta u_{mv} = f(y/b_0)$  diminuisce all'aumentare della distanza relativa dallo sbocco,  $x/\sqrt{A_0}$ .

Analogamente, per valutare la variazione indotta dal moto ondoso al campo di diffusione termica del getto nel piano (x, y), si è fatto riferimento al termine:

$$\Delta T_w = \frac{100(T - T_w)}{T}$$

che rappresenta, alla generica  $x/\sqrt{A_0}$ , il decremento percentuale della temperatura in presenza di moto ondoso rispetto al valore, T, in condizioni di quiete. La correlazione trovata lega i valori di  $\Delta T_w$  ed i parametri caratteristici del moto ondoso ( $b/L, H/L$ ) con i rapporti adimensionali,  $x/\sqrt{A_0}, y/\sqrt{A_0}$ . Nella Figura 25 sono riportati il decremento percentuale  $\Delta T_w$  rispetto alla larghezza relativa del getto  $y/\sqrt{A_0}$  e  $x/\sqrt{A_0}$ , relativamente alle prove  $R_{io}=0.03$  RA201- RA202. Si osserva che lungo l'asse  $x/\sqrt{A_0}$  il decremento percentuale assume valori compresi tra il 10% e il 20%.

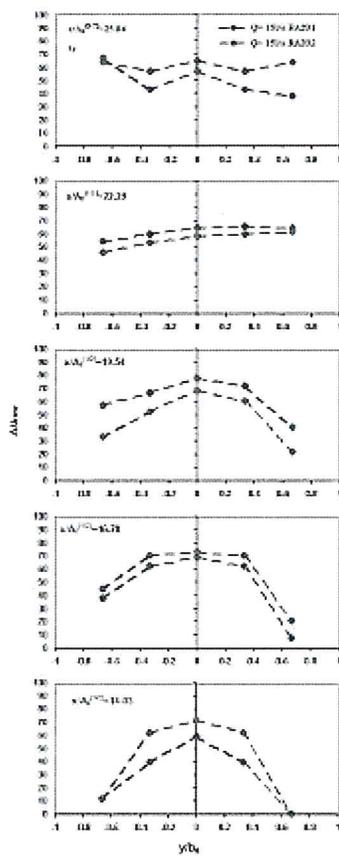


Figura 24 - Decremento percentuale  $\Delta u_{mw}$  rispetto alla larghezza relativa del getto  $y/b_0$ .

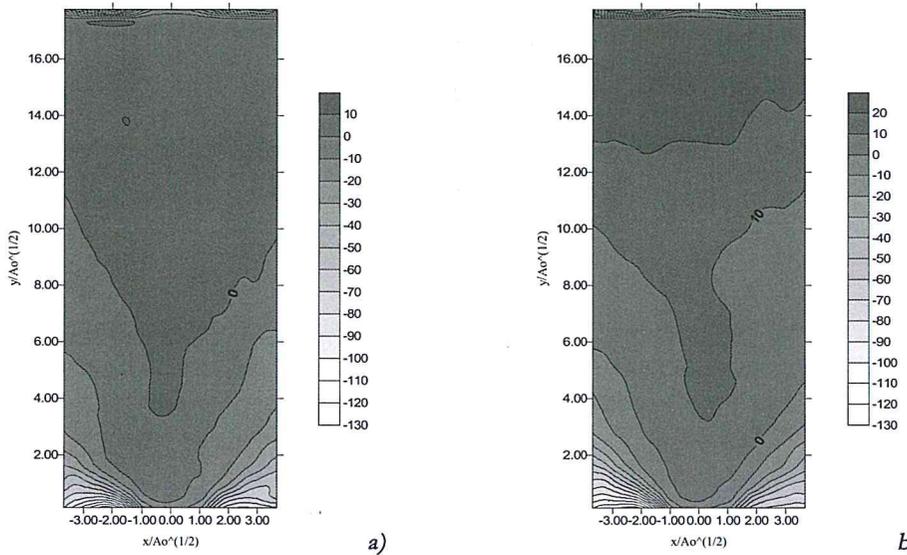


Figura 25 - Isotherme relative a  $\Delta Tw$  per la prova  $Re_o=0.03$ : a) RA201 b) RA202 nel piano  $(y/\sqrt{A_0}, x/\sqrt{A_0})$ .

### Riduzione della velocità e della temperatura in asse al getto

La riduzione della velocità massima lungo l'asse x in assenza e in presenza di moto ondoso è riportata in Figura 26. Sono proposte inoltre, in Tabella 6, le equazioni di tipo esponenziale che ben interpretano i dati sperimentali:

$$\frac{u_{mm}}{u_{mso}} = 0.998e^{-0.003\left(\frac{x}{\sqrt{A_u}}\right)^{1.988}} \quad (16)$$

$$\frac{u_{mmw}}{u_{mso}} = e^{\left(-0.33\frac{x}{\sqrt{A_u}}\right)^{5.84}} \quad (17)$$

Le suddette espressioni, ricavate per valori della portata variabili tra 5 e 30 l/s, consentono di ricavare il valore massimo  $u_{mm}$  e  $u_{mmw}$  per qualunque valore di x, nota la velocità allo sbocco  $u_{mso}$  e la sezione idrica  $A_0$  iniziale.

Tabella 6 - Dati SUN con relative equazioni interpolari.

DATI	N° dati	EQUAZIONE	R	$\sigma$
$Q=5\div 30l/s$	52	$u_{mm}/u_{mso}=0.998e^{(-0.003(x/\sqrt{A_u}))^{1.988}}$	0.995	0.005
$Q=10\div 30l/s$ RA202	47	$u_{mm}/u_{mso}=e^{(-0.33(x/\sqrt{A_u}))^{0.584}}$	0.992	0.001

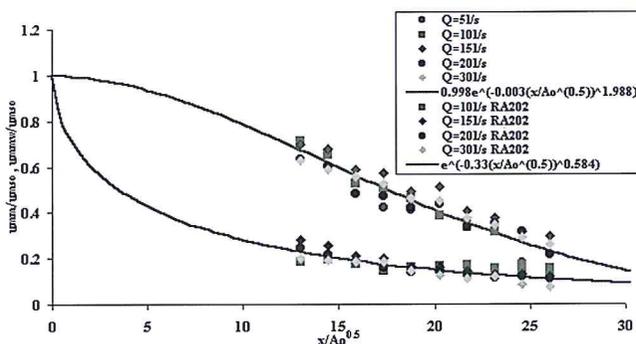


Figura 26 - Variazione di  $u_{mm}/u_{mso}$ ,  $u_{mmw}/u_{mso}$  al variare di  $x/(A_0)^{1/2}$ .

Le equazioni 12 e 13, ricavate da Pande e Rajaratnam (1977) per descrivere la riduzione della temperatura massima lungo l'asse x in assenza di moto ondoso, per numeri di Richardson moderati e grandi, risultano essere inadeguate ad interpretare i dati sperimentali con  $R_{i0}=0.03-0.06$ . In Figura 27 e Tabella 7 è riportata la seguente espressione:

$$\frac{\Delta T_m}{\Delta T_0} = e^{-0.15\left(\frac{x}{\sqrt{A_0}}\right)^{0.62}} \quad (18)$$

rispettivamente calcolate per  $R_{i0}=0.03$   $R_{i0}=0.06$ .

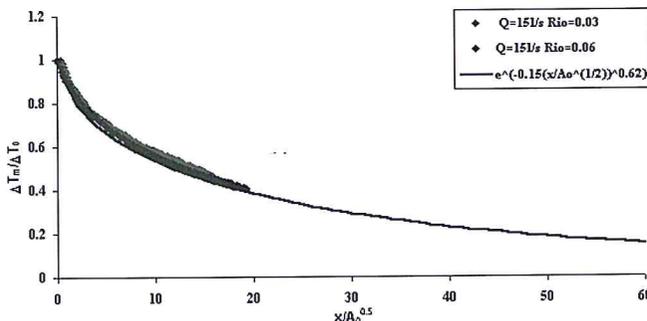


Figura 27 - Variazione di  $\Delta T_m/\Delta T_0$  al variare di  $x/(\sqrt{A_0})$ .

Tabella 7 - Dati SUN con relative equazioni interpolari.

DATI	N° dati	EQUAZIONE	R	σ
R <sub>io</sub> =0.03-0.06	264	$\Delta T_m/\Delta T_o = e^{-0.150(x/\sqrt{A_0})0.620}$	0.940	0.003
R <sub>io</sub> =0.03 RA201	125	$\Delta T_m/\Delta T_o = 1.328e^{-0.284(x/\sqrt{A_0})0.525}$	0.998	0.00012
R <sub>io</sub> =0.03 RA202	125	$\Delta T_m/\Delta T_o = e^{-0.15(x/\sqrt{A_0})0.818}$	0.990	0.00091

In Figura 28 sono riportate le equazioni che descrivono l'andamento delle temperature lungo l'asse, in presenza di moto ondoso per R<sub>io</sub>=0.03 RA201-202.

Le suddette espressioni sono utili, in quanto consentono di ricavare il valore massimo T, per qualunque valore di x, nota la temperatura allo sbocco T<sub>o</sub> e la sezione idrica A<sub>0</sub> iniziale:

$$\frac{\Delta T_m}{\Delta T_o} = 1.327e^{-0.284\left(\frac{x}{\sqrt{A_0}}\right)^{0.525}} \tag{19}$$

$$\frac{\Delta T_m}{\Delta T_o} = e^{-0.15\left(\frac{x}{\sqrt{A_0}}\right)^{0.818}} \tag{20}$$

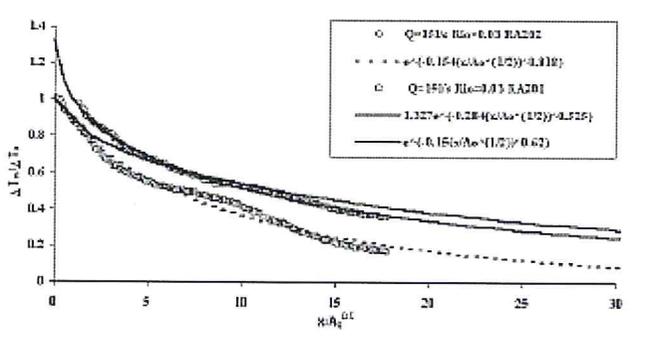


Figura 28 - Riduzione della temperatura massima,  $\frac{\Delta T_m}{\Delta T_o}$ , in funzione di  $x/\sqrt{A_0}$ .

**Valutazione del campo di moto e di diffusione termica nel piano (x, y) in funzione dell'allargamento del getto.**

Al fine di ricavare l'andamento delle velocità nel piano (x, y) nel caso di interazione getto – moto ondoso, è necessario conoscere l'allargamento laterale del getto, b<sub>u</sub>. Sperimentalmente è stata ricavata la seguente relazione (Fig. 29a):

$$\frac{b_u}{b_0} = 0.0726 \cdot \left(\frac{x}{b_0}\right) - 0.0849 \tag{21}$$

Utilizzando la seguente procedura è possibile valutare la velocità u<sub>mm</sub>:

- nota la sezione idrica A<sub>0</sub>, la velocità u<sub>mso</sub> allo sbocco e la sezione (x, y) di interesse, utilizzando l'equazione (16) è possibile ricavare il valore massimo u<sub>mm</sub> del getto lungo l'asse;
- utilizzando i profili adimensionali (eq.6 - Fig.16) del getto, si ricava il valore della velocità u<sub>ms</sub> nel piano (x, y) noto la b<sub>u</sub> (eq.21);
- nota u<sub>ms</sub> = u<sub>m</sub>, mediante i diagrammi di Figura 24 si ricavano i valori delle velocità u<sub>mw</sub> nel piano (x, y), nel caso di interazione getto - moto ondoso.

Analogamente, per ciò che concerne le temperature, al fine di ricavarne l'andamento nel piano (x, y) nel caso di interazione getto - moto ondoso, è stata ricavata sperimentalmente la seguente relazione (Fig. 29b):

$$\frac{b_T}{b_0} = 0.2125 \cdot \left( \frac{x}{b_0} \right) - 1.1171 \quad (22)$$

Utilizzando la seguente procedura è possibile valutare la temperatura  $T_w$ :

- nota la sezione idrica  $A_0$  e la sezione (x, y) di interesse, la temperatura  $T_0$  allo sbocco e quella ambiente  $T_a$ , utilizzando l'equazione (18) è possibile ricavare il valore massimo  $T_m$  del getto lungo l'asse;
- utilizzando i profili adimensionali (eq.7 - Fig.17) del getto, si ricava il valore della velocità  $T_s$  nel piano (x, y) noto  $b_T$  (eq.22);
- nota  $T_s = T$ , mediante i diagrammi di Figura 25, si ricavano i valori delle temperature  $T_w$  nel piano (x, y) nel caso di interazione getto - moto ondoso.

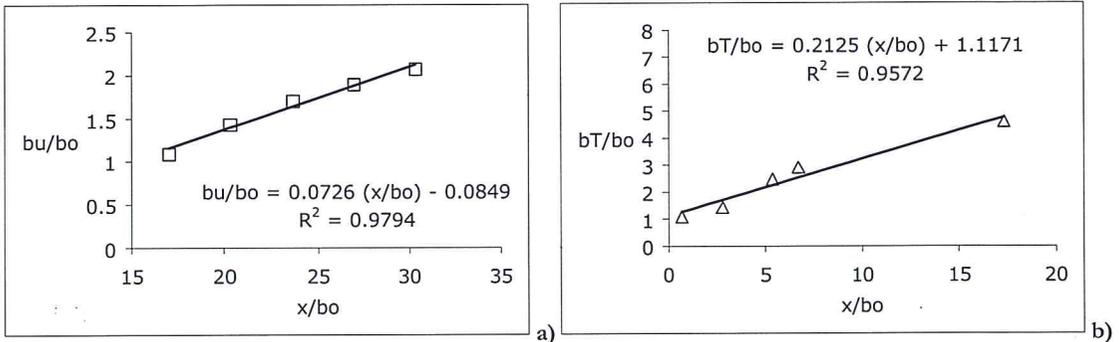


Figura 29 - Correlazione dell'allargamento laterale del getto: a) campo di moto, b) campo delle temperature.

### Conclusioni

I risultati ottenuti hanno mostrato come, nell'ambito delle prove eseguite, la presenza del moto ondoso produce sensibili variazioni sia al campo di moto relativo ad una corrente che si immette in acqua ferma, sia al campo di diffusione termica.

Le elaborazioni effettuate hanno evidenziato i seguenti aspetti:

- in presenza di corrente si osserva una sensibile variazione del coefficiente  $k_s$ , al diminuire della profondità relativa  $b/L$ , con incrementi variabili dal 2 % al 10 % per  $0.05 < b/L < 0.1$ ;
- il campo di moto nel piano (x, y) determinato dalla presenza di un getto, che si immette in un ambiente ricettore in quiete, è ben interpretato dall'equazione (6);
- il campo di moto nel piano (x, z) in presenza di solo getto è ben interpretato dall'equazione (8)

per  $\frac{y}{\sqrt{A_0}} = 0$  e  $Q=15$  l/s. L'equazione (8) cade in difetto per  $\frac{y}{\sqrt{A_0}} = \pm 0.55$  e  $\frac{y}{\sqrt{A_0}} = \pm 1.10$ ,

per i quali sono state proposte nuove relazioni riportate in Tabella 4;

- la riduzione della velocità massima di un getto lungo l'asse x,  $u_{mw}$ , è ben rappresentata dall'equazione (16);
- la variazione indotta dal moto ondoso al campo di moto della corrente nel piano (x, y), è ben descritto dai diagrammi di Figura 24, nei quali è rappresentato il decremento percentuale  $\Delta u_{mw}$  rispetto alla larghezza relativa del getto  $y/b_0$  e alla distanza relativa dallo sbocco,  $\frac{x}{\sqrt{A_0}}$ ;

- la riduzione della velocità massima lungo l'asse  $x$ , per effetto dell'interazione getto - moto ondoso, è ben rappresentata dall'equazione (17);
- il campo di moto nel piano  $(x, z)$ , determinato dalla presenza di un getto che si immette in un ambiente ricettore, sottoposto all'azione del moto ondoso, è ben interpretato dalle relazioni interpolari riportate in Tabella 5;
- l'allargamento laterale del getto,  $b_{10}$ , è descritto dall'equazione (21);
- il campo di diffusione termica nel piano  $(x, y)$  determinato dalla presenza di un getto, che si immette in un ambiente ricettore in quiete, è ben interpretato dall'equazione (7);
- la riduzione della temperatura massima di un getto lungo l'asse  $x$ , è ben rappresentata dall'equazione (18);
- la variazione indotta dal moto ondoso al campo di diffusione termica del getto, rappresentata dal decremento percentuale rispetto a  $\frac{x}{\sqrt{A_0}}$  e  $\frac{y}{\sqrt{A_0}}$ , è riportato in Figura 25.
- la riduzione della temperatura massima lungo l'asse  $x$ , per effetto dell'interazione getto - moto ondoso, è ben rappresentata dall'equazione 19 e 20;
- l'allargamento laterale del getto,  $b_T$ , è descritto dall'equazione (22).

Utilizzando i risultati e le equazioni presentate in questo lavoro è possibile ricavare il campo di moto e di diffusione termica in assenza ed in presenza di moto ondoso.

## Bibliografia

- Carter D.J.T. (1982) - *Prediction of wave height and period for a constant wind velocity using the JONSWAP results*. Ocean Engineers, 9: 17-33.
- Di Natale M. (1998) - *Non linear hydrodynamic effects of opposing jet-current on waves*. Proc. of ISOPE, Montreal.
- Di Natale M. e Vicinanza D. (2000) - *Experimental velocity profiles in wave-jet interaction*. Proc. of ISOPE, Seattle.
- Ewing J.A. (1975) - *Some results from the Joint North Sea Waves Project of interest for engineers*. Mechanical Engineering Publications Ltd, pp. 41-46, London.
- Hayashi T. e Shuto N. (1967) - *Diffusion of warm water jet discharged horizontally at the water surface*. Proceedings IAHR Congress, Volume 4, Fort Collins.
- Hughes S.A. (1993) - *Physical Models and Laboratory Techniques in Coastal Engineering*. Advanced Series on Ocean Engineering, Volume 7, World Scientific.
- Ismail N.M. (1981) - *Effect of opposing wave on the mixing of a surface horizontal jet*. Tech. Rep. HEL27-9 Hydraulic and Coastal Eng. Division University of California, Berkeley.
- Ismail N.M. e Wiegel R.L. (1983) - *Opposing wave effect on momentum jets spreading rate*. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, ASCE, Volume 109, n. 4, pp. 465-483.
- Ismail N.M., Wiegel R.L., Ryan P.J. e Tu S.W. (1988) - *Mixing of thermal discharges in coastal waters*. International Conference of Coastal Engineering, Sydney.
- Jen Y., Wiegel R.L. e Mobarek I. (1966) - *Surface discharge of horizontal warm water jets*. Journal of Power Division, ASCE, 92: 1-30.
- Kishida N. e Sobey R.J. (1988) - *Stokes theory for waves on linear current*. J. Eng. Mech., Volume 114.
- Koole R. e Swan C. (1994) - *Measurements of a 2-D non-buoyant jet in a wave environment*. Coastal Eng., Volume 24, pp.151-169, Elsevier.
- Mansard E. e Funke E. (1980) - *The measurements of incident and reflected spectra using a least square method*. Proc. 17th Intern. Conf. on Coastal Eng., Volume 1, pp.154-172, Sydney, Australia.
- Pande B.B.L. e Rajaratnam N. (1977) - *An Experimental study of bluff buoyant turbulent surface jets*. Journal of Hydraulic Research, IAHR, n. 3, pp. 261-275, Delft.

- Rajaratnam N. (1976) - *Turbulent jets*. Elsevier, Amsterdam.
- Rebaudengo L. e Scarsi G. (1984) - *L'onda energeticamente equivalente allo spettro di energia JONSWAP*.  
Quaderno dell'Istituto di Idraulica della Facoltà di Ingegneria di Genova.
- Scarsi G. e Stura S. (1984) - *Upstream Propagation of Gravity Waves on a Current*. Atti 19° Conv. Idr. E  
Costr. Idr.
- Wiegel R.L., Mobarek I. e Yen Y. (1964) - *Discharge of warm jet over sloping bottom*. Hydraulic and  
Coastal Engineering Division University of California, Berkeley.

**Manoscritto ricevuto il 19/4/2001, accettato il 5/12/2001.**