

INDAGINE SUL CAMPO DI MOTO DI UN'ONDA REGOLARE

Leonardo Damiani, Michele Mossa
Dipartimento di Ingegneria delle Acque - Politecnico di Bari

Sommario

Il presente lavoro illustra alcune esperienze condotte presso il Dipartimento di Ingegneria delle Acque del Politecnico di Bari indirizzate al rilievo simultaneo delle componenti di velocità mediante un sistema anemometrico laser Doppler (LDA) e del profilo di superficie di un campo di moto ondoso.

E' stata esaminata un'onda che, secondo il diagramma di Le Méhauté, rientra nella regione di Stokes al II ordine. Si è osservato che le teorie di Airy e di Stokes al II ordine riescono a interpretare con un grado di approssimazione accettabile e comparabile tra di loro il campo di moto ondoso esaminato.

Inoltre, sono state analizzate le non linearità con i parametri E_2/E_1 ed E_3/E_1 , in analogia con quanto proposto da Guza e Thornton (1980) e Petrillo (1988). In particolare, l'andamento di E_2/E_1 per le componenti di velocità è crescente in funzione della distanza dal fondo, in accordo con la teoria di Stokes al II ordine. I valori sperimentali di E_2/E_1 sono confrontabili con quelli teorici (Stokes al II ordine) per le componenti orizzontali di velocità, mentre risultano maggiori per quelle verticali e per il profilo dell'onda.

I risultati esposti confermano quanto affermato da Dean (1970) circa la difficoltà di individuare un'unica teoria in grado di descrivere con la stessa precisione tutte le grandezze caratteristiche di un campo di moto ondoso.

1. INTRODUZIONE

Nel presente lavoro si riportano i primi risultati di un'indagine sperimentale indirizzata al rilievo simultaneo del profilo di superficie e delle componenti di velocità di un'onda regolare di ampiezza finita su profondità costante. Il lavoro si inserisce nell'ambito di una più ampia ricerca in atto presso il Dipartimento di Ingegneria delle Acque del Politecnico di Bari, tesa all'analisi dell'evoluzione delle onde (sia regolari che random) su fondali acclivi. I risultati

disponibili consentono di trarre interessanti conclusioni circa la possibilità di rappresentare l'onda esaminata (che ricade nella regione di Stokes al II ordine secondo la classificazione di Le Méhauté) con la teoria di Airy piuttosto che con teorie non lineari, le cui formulazioni, certamente più complesse, non sempre risultano più idonee a descrivere le grandezze caratteristiche di un campo di moto ondoso.

Si osserva che attualmente sono disponibili molte teorie che possono descrivere un campo di moto ondoso (Airy, Stokes di ordine superiore, etc.). A fronte di tale abbondanza di analisi teoriche, risultano ancora scarsi i rilievi sperimentali che possano avallare le stesse. Come è noto, il diagramma di Le Méhauté consente di delimitare le regioni di validità delle più note teorie sul moto ondoso, facendo uso dei parametri $h/(gT^2)$ e $H/(gT^2)$, essendo h la profondità, H l'altezza d'onda, T il periodo e g l'accelerazione di gravità.

Secondo Dean (1970) è possibile che una teoria possa descrivere con accuratezza i rilievi di un profilo di superficie, ma non le componenti di velocità, o viceversa. Questa condizione di relatività della validità delle maggiori teorie non è evidenziata nel diagramma di Le Méhauté.

Ragone (1983), analizzando i rilievi sperimentali condotti con un sistema LDA su campi di moto ondoso descrivibili, secondo il diagramma di Le Méhauté, attraverso la teoria lineare di Airy o quella di Stokes al II ordine, osserva che, in entrambi i casi, gli scarti tra valori calcolati e misurati risultano piuttosto modesti.

Graw (1994) esegui delle misure di velocità, con uso di un sistema LDA, di alcuni campi di moto ondoso, che, secondo il diagramma di Le Méhauté, sono descrivibili attraverso la teoria di Stokes al II ordine. Facendo riferimento alle principali teorie, la tab. I sintetizza il giudizio del

Tab. I.

Teoria	Vel. orizzontale	Vel. verticale	Prof. di superficie
Teoria di Airy	o	o	o
Teoria di Stokes al II ordine	+	+	+
Teoria di Stokes al III ordine	-	++	++

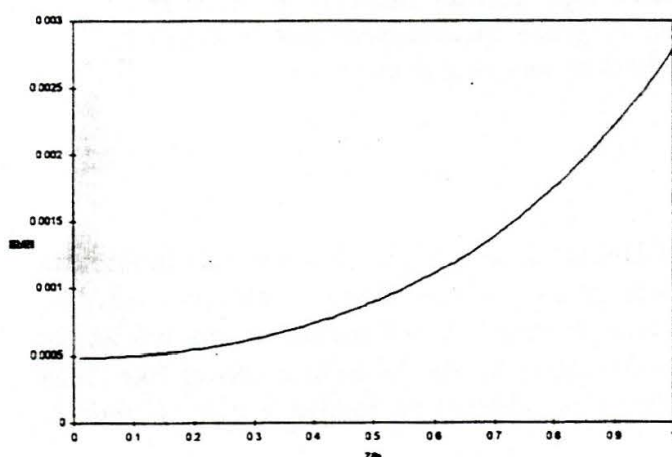


Fig. 1. E_2/E_1 per la componente orizzontale di velocità (Stokes II ordine).

confronto tra i valori misurati e quelli teorici secondo Graw.

Dalla tabella (nella quale la teoria di Airy è assunta come termine di comparazione (°) e i segni + e - indicano, rispettivamente, un migliore o peggiore adattamento rispetto alla stessa) si evince che la teoria di Stokes al III ordine è in grado di rappresentare meglio la componente verticale di velocità e il profilo di superficie. In altri termini è possibile supporre dall'analisi dei dati di Graw che le non linearità sono più evidenti sia nel profilo di superficie sia nella

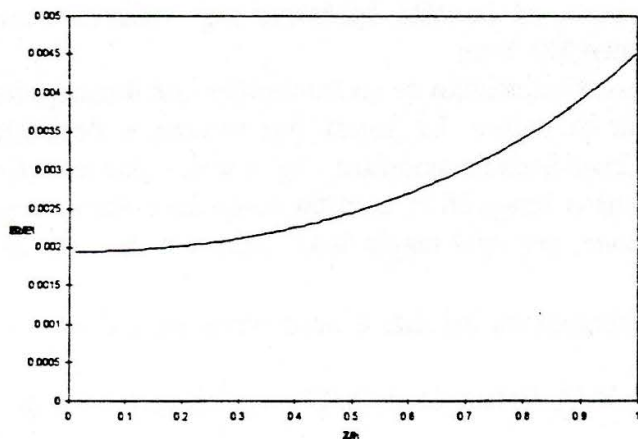


Fig. 2. E_2/E_1 per la componente verticale di velocità (Stokes II ordine).

Stokes al II ordine all'onda analizzata nell'ambito di questo studio, è maggiore per le componenti verticali di velocità rispetto a quelle orizzontali e cresce in funzione della distanza dal fondo Z adimensionalizzata con la profondità h (figg. 1 e 2). Per quanto attiene il profilo di superficie, sempre utilizzando la teoria di Stokes al II ordine per l'onda analizzata, si ha $E_2/E_1=0.004015$.

componente verticale di velocità. La valutazione delle non linearità può essere condotta, in analogia con quanto proposto da Guza e Thornton (1980) e Petrillo (1988), attraverso gli spettri di potenza delle componenti orizzontali e verticali di velocità e del profilo di superficie, determinando i contenuti energetici intorno alla frequenza fondamentale (E_1) e a due e tre volte tale frequenza (E_2 ed E_3 rispettivamente). Le non linearità possono essere rappresentate attraverso i rapporti E_2/E_1 ed E_3/E_1 . In particolare, il rapporto E_2/E_1 , ottenibile teoricamente applicando la teoria di

2. DESCRIZIONE DELL'APPARATO SPERIMENTALE

2.1. Canale con generatore di moto ondoso

L'impianto sperimentale, diffusamente descritto in precedenti lavori (Lamberti et al., 1988) è costituito da un canale per moto ondoso con le pareti di cristallo e fondo di plexiglass, sostenute da una serie di telai in ferro posti ad una distanza reciproca di circa 44 cm. Il canale è largo 100 cm, alto 120 cm e lungo circa 45 m.

Per la realizzazione del moto ondoso si è utilizzata una ventola piana posta ad una estremità del canale ed azionata mediante un opportuno cinematismo studiato in modo da imprimere un movimento di rototraslazione che meglio simuli il moto ondoso in fondali di profondità limitata.

Il segnale di comando della servovalvola del sistema oleodinamico è stato generato da un calcolatore di processo dotato di una scheda di conversione A/D e D/A della National Instruments modello AT-MIO 16 H. Le uscite analogiche sono comprese nell'intervallo ± 10 V. La casa costruttrice garantisce una accuratezza di 4.88 mV.

Si è realizzato un apposito software per la generazione del segnale di ingresso al circuito elettrico di controllo, che è di tipo sinusoidale con frequenza, definibile in input, variabile tra 0.2 e 1 Hz e ampiezza variabile tra 0.5 e 2.5 V.

2.2. Sistema LDA

Il sistema LDA è costituito da una sorgente laser Ar-Ion Coherent Innova serie 70 di potenza 5 W, raffreddata ad acqua. L'alimentazione elettrica avviene con una tensione di 380 V trifase con terra, senza neutro; la potenza impegnata è di 25 KW. Il sistema di raffreddamento ha una portata di 8-10 l/min alla pressione di 3 atm.

Il sistema LDA è del tipo a fibre ottiche, in modalità *backscattering*, bidimensionale a quattro raggi, con lunghezze d'onda di 488.0 nm e 514.5 nm.

Il sistema ottico di trasmissione e ricezione è costituito da un *transmitter* con 4 manipolatori ottici, due fotomoltiplicatori e un separatore di colore. La sonda trasmittente e ricevente è bidimensionale, con diametro di 85 mm e con lente frontale modulare, che, a scelta, può essere con distanza focale di 310 mm o 500 mm. Il cavo ottico, lungo 30 m, è costituito da fibre ottiche *single-mode*, ad alto mantenimento della polarizzazione, per ogni raggio laser emesso e da fibra *multi-mode* per il segnale di ricezione.

L'intero sistema di acquisizione ed elaborazione dei dati è noto come FlowTool™ della DANTEC Measurement Technology.

Il processore di segnale è un 58N40 FVA Enhanced della Dantec, comprensivo di una scheda per la seconda dimensione.

Come è noto i processori del segnale Doppler di vecchia generazione, tipo il Tracker o il Counter, hanno una limitazione operativa dovuta alla presenza di rumore di fondo eventualmente sovrapposto al segnale Doppler. Ogni qualvolta si verifica una causa che genera o incrementa il rumore di fondo (volume di misura troppo vicino alle pareti, modalità di misura in *backscattering*, riflessioni indesiderate, etc.) sia il Tracker che il Counter non sono più in grado di inseguire la frequenza Doppler. I processori di nuova generazione consentono di estrarre la frequenza Doppler anche quando essa è annegata nel rumore di fondo. Tra questi si ricordano il BSA e l'FVA della Dantec, l'IFA mod. 650 o mod. 750 della TSI e il DSA della Aerometrics.

Le caratteristiche essenziali dell'FVA sono così sintetizzabili:

- rappresentazione digitale della velocità a 12 bit;
- banda di frequenza Doppler simmetrica rispetto al valore di velocità nulla per analisi di campi di moto caratterizzati da bassi valori di velocità media;
- banda di frequenza Doppler asimmetrica rispetto al valore di velocità nulla per analisi di campi di moto caratterizzati da alti valori di velocità media;
- larghezza della banda di frequenza Doppler fino a 45 MHz;
- 4 canali ausiliari a 12 bit per contemporanee acquisizioni delle uscite analogiche provenienti da altrettanti trasduttori (per es. trasduttori per la misura della pressione, della temperatura, delle altezze, etc.);
- buffer di memoria fino a 16 MByte per i dati acquisiti;
- processamento fino a 120000 dati/s per ciascun canale;
- limite di definizione dei *burst* fino a un rapporto SNR di -6 dB;
- *frequency shifter* interno;
- possibilità di controllo della funzione *high voltage* dei fotomoltiplicatori;
- accuratezza uguale allo 0.4% del valore di fondo scala della banda di frequenza Doppler utilizzata.

Il sistema è in grado, attraverso una scheda di conversione A/D della Keithley Metrabyte modello DAS 50/4, di acquisire, contemporaneamente alle due componenti di velocità, le uscite analogiche provenienti da quattro trasduttori. Su uno dei quattro canali disponibili è stata collegata una sonda di tipo resistivo per la misurazione delle elevazioni dell'onda. La sonda è stata sempre posizionata lungo la verticale passante per il volume di misura del sistema LDA. L'intero sistema è assistito da un calcolatore di processo dotato del software di gestione Flowware Dantec ver. 3.1.

Il software è parte integrante dell'intero sistema di misura e consente un *setup* ottimale del processore di segnale, l'acquisizione dei dati in modalità multi-canale, l'analisi dei dati acquisiti e una loro rappresentazione grafica.

In particolare, tramite il software è possibile definire la lunghezza focale della lente frontale usata per la sonda trasmittente e ricevente, la lunghezza d'onda del laser con cui si opera, la larghezza della banda di frequenza Doppler, etc.

Il software consente, oltre alla registrazione su memoria di massa dei dati acquisiti, il calcolo del valore medio, dello scarto quadratico medio, del kurtosis e dello skewness dei dati acquisiti.

E' possibile, inoltre, effettuare successive elaborazioni per ottenere i diagrammi delle serie temporali, gli istogrammi e gli spettri di potenza.

In particolare, si osserva che le misure sono state condotte con una lente frontale di lunghezza focale 310 mm. In tal caso, le dimensioni del volume di misura sono quelle riportate nella tab. II.

Tab. II.

Lunghezza d'onda [nm]	Dx [mm]	Dy [mm]	Dz [mm]
488.0	0.1429	0.1426	2.3322
514.5	0.1507	0.1504	2.4589

Le componenti verticali di velocità sono state misurate con i raggi di lunghezza d'onda 488.0 nm e le componenti orizzontali con quelli di lunghezza d'onda 514.5 nm.

La sonda trasmittente e ricevente è stata posizionata su un sistema di brandeggio, costituito da slitte che consentono di realizzare spostamenti orizzontali e verticali con un'accuratezza del ventesimo di millimetro.

2.3. Determinazione dell'onda incidente e di quella riflessa

Nel canale per moto ondoso è realizzato un profilo di spiaggia; per quanto la pendenza del fondo sia bassa e la lunghezza del canale sia particolarmente elevata (circa 45 m), non può essere trascurato il problema della riflessione al fine di una dettagliata descrizione del tipo di campo di moto ondoso che, di fatto, si riesce a realizzare.

In generale, si veda *Lamberti et al. (1988)*, in presenza di una struttura o di una spiaggia riflettente, può ritenersi che il profilo del moto ondoso $\eta(x,t)$, risulti dalla composizione lineare di un'onda incidente e di una riflessa che si propagano in direzioni opposte.

Per ricostruire gli spettri dell'onda incidente e riflessa si sono rilevati i profili del pelo libero in tre sezioni; i dati così ottenuti sono stati successivamente elaborati come proposto da *Lamberti et al. (1988)*. Per l'onda generata nell'ambito del presente lavoro e di seguito descritta, il coefficiente di riflessione definito come il rapporto tra il flusso dell'energia dell'onda riflessa ed il flusso dell'onda incidente, è contenuto entro valori del 9%. In fig. 3 si riportano gli spettri di densità di potenza dell'onda incidente e riflessa.

Considerato il modesto contributo dovuto alla riflessione nella valutazione dello spettro dell'onda incidente, specie in corrispondenza della frequenza di picco e delle sue armoniche, nel seguito si farà riferimento agli spettri calcolati nella sezione di misura, senza depurarli della componente della riflessione.

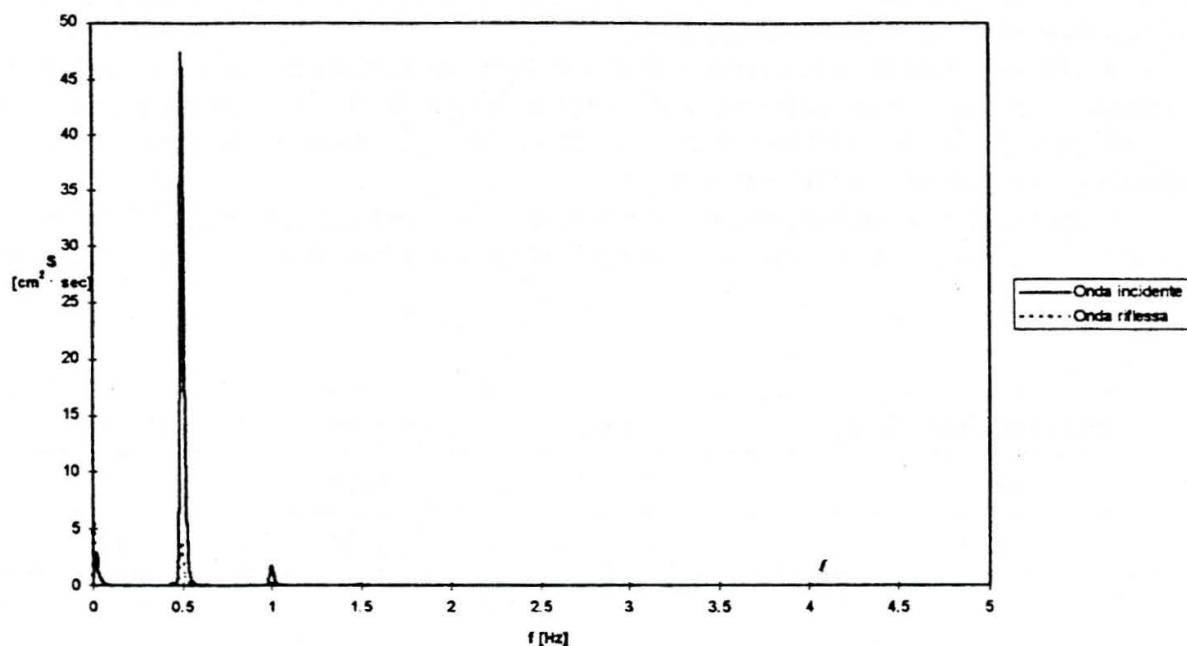


Fig. 3. Spettri di densità di potenza dell'onda incidente e riflessa.

3. RILIEVI ED ELABORAZIONI ESEGUITE

Per l'onda studiata, nelle tabb. III e IV sono riportate la profondità dell'acqua in canale (h), l'altezza d'onda (H), il periodo (T), la lunghezza d'onda (L), i parametri adimensionali H/L , h/L ,

Tab. III.

h [cm]	H [cm]	T [sec]	L [m]	H/L	h/L	$h/(gT^2)$	$H/(gT^2)$	$U=HL^2/h^3$
80	7.3	2	5.1	0.0143	0.1569	0.0204	0.00187	3.71

$h/(gT^2)$ e $H/(gT^2)$, il numero di Ursell (U) e le distanze dal fondo dei punti di misura (Z).

L'onda generata è stata analizzata nel dominio del tempo e delle frequenze. A tal riguardo, si ricorda che l'algoritmo che consente di avere una stima dello spettro di potenza di una serie storica di dati equamente intervallati, utilizzato in precedenti lavori (*Chiaia et al., 1990; Chiaia et al., 1991*), è noto come Fast Fourier Transform (FFT). Tale tecnica, tuttavia, è inapplicabile ad una serie storica caratterizzata da dati intervallati in modo irregolare. L'esigenza di disporre di un algoritmo che consenta di avere una stima dello spettro di potenza per dati di questo tipo nasce dal fatto che il processore di segnale del sistema LDA consente l'acquisizione dei valori di velocità delle particelle presenti nel

Tab. IV.

N. punto di misura	Distanza dal fondo Z [cm]
1	17.7
2	22.7
3	27.7
4	32.7
5	37.7
6	42.7
7	47.7
8	50.2

fluido in studio quando queste passano attraverso il volume di misura.

E' evidente allora che la misura sarà effettuata nell'ipotesi di passaggio della particella e di validazione del segnale rilevato. Ossia, è evidente che l'intervallo temporale tra due successive misurazioni non è costante.

In effetti, i dati che costituiscono una serie storica a intervalli temporali non costanti possono essere opportunamente convertiti in una serie storica a intervalli costanti attraverso tecniche di interpolazione. Tuttavia, questa metodologia potrebbe rimuovere alcune caratteristiche della grandezza acquisita e introdurre degli errori nella stima dello spettro di potenza. *Gaster e Roberts (1975)* proposero un algoritmo applicabile al caso di una serie di dati non equamente intervallati. Si ricorda che il teorema di Wiener-Khinchine consente di legare la trasformata di Fourier con la funzione di autocorrelazione di una serie di dati attraverso le due seguenti relazioni

$$S(f) = \int_{-\infty}^{\infty} R(\tau) \exp(-i2\pi f\tau) d\tau \quad (1)$$

$$R(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} S(f) \exp(i2\pi f\tau) df \quad (2)$$

avendo indicato con $R(\tau)$ la funzione di autocorrelazione e con $S(f)$ la funzione di densità spettrale di una serie di dati. In particolare con $S(f)$ si intende la funzione di densità spettrale simmetrica rispetto all'asse delle ordinate (*two-sided spectral density function*). Si osserva che, poichè si ipotizza che la serie storica è costituita da numeri reali, la funzione di densità spettrale può essere scritta come segue

$$S(f) = 2 \int_0^{\infty} R(\tau) \cos(2\pi f\tau) d\tau. \quad (3)$$

Poichè, inoltre, $S(f)$, come detto in precedenza, è simmetrica rispetto all'asse delle ordinate, di solito, si definisce una funzione di densità spettrale $G(f)$ nel solo dominio delle frequenze positive

$$G(f) = 4 \int_0^{\infty} R(\tau) \cos(2\pi f\tau) d\tau. \quad (4)$$

Gaster e Roberts (1975) sostituirono la (2) nella (4), ottenendo, dopo aver discretizzato le funzioni integrali:

$$G(f) = \frac{4}{\lambda^2 T} \sum_{j=1}^N \sum_{k=j+1}^N D(t_k - t_j) \cos[2\pi f(t_k - t_j)] U(t_j) U(t_k) \quad (5)$$

essendo $U(t)$ la grandezza acquisita nel tempo, λ la frequenza media di campionamento espressa in Hertz, T il tempo totale di acquisizione in secondi, e $D(t_k-t_j)$ la funzione rappresentativa di una finestra (per esempio, quella di Hanning). E' evidente che $D(t_k-t_j)=1$ nel caso in cui non si voglia far uso di finestre, il cui scopo, come è noto, è di eliminare l'errore nella stima dello spettro legato alla lunghezza finita della serie storica.

Casson *et al.* (1994) confrontarono i risultati della stima della funzione di densità spettrale, ricavata con la (5) relativa ad una serie di dati con andamento sinusoidale. Successivamente, essi ripeterono la prova per il caso di una funzione periodica costituita dalla somma di più sinusoidi a diversa frequenza. In entrambi i casi analizzati, gli autori rilevarono che i valori teorici delle potenze, alle diverse frequenze, coincidevano con quelli di calcolo, mentre l'area al di sotto della curva di densità spettrale calcolata coincideva con la varianza delle serie storiche analizzate con un errore massimo del 3%.

Resta da ricordare, tuttavia, che l'algoritmo presentato e utilizzato per l'analisi spettrale nell'ambito di questo lavoro, preferibile in termini di analisi degli errori, richiede dei tempi di CPU di gran lunga maggiori rispetto al metodo consistente nell'utilizzare una tecnica di interpolazione e, successivamente, l'algoritmo della FFT. Si osserva, a tal riguardo, che Casson *et al.* (1994) usarono un calcolatore Cray XM-P, noto per la sua velocità computazionale, a causa della natura "time-consuming" della duplice sommatoria presente nella relazione (5).

4. ANALISI DEL PROFILO DI SUPERFICIE E DELLE COMPONENTI ORIZZONTALI E VERTICALI DI VELOCITA'

Nel seguito si farà riferimento alla configurazione della tab. III. Come si evince dai valori riportati nella predetta tabella, il campo di moto ondoso, secondo il diagramma di Le Méhauté, è descritto dalla teoria di Stokes al II ordine.

Nelle figg. 4, 5 e 6 si riportano le serie temporali acquisite, arretrate per chiarezza grafica ai primi dieci secondi, del profilo di superficie e delle componenti orizzontali e verticali di velocità, relative, per brevità, al solo punto di misura posto a distanza 22.7 cm dal fondo. Nelle stesse figure si riportano gli andamenti secondo la teoria lineare di Airy e di Stokes al II ordine.

Dalla fig. 4 si osserva, innanzitutto, come l'onda generata nel canale presenti una dissimetria rispetto al livello medio, tipica delle onde non lineari. Questa dissimetria, per l'onda analizzata, non è messa in evidenza dalla teoria di Stokes al II ordine, che fornisce risultati pressochè coincidenti con la teoria di Airy.

Per quanto riguarda le componenti orizzontali di velocità, entrambe le teorie di confronto utilizzate sovrastimano i valori sperimentali in corrispondenza delle creste. Ciò non si verifica per le componenti verticali di velocità.

Anche per le componenti di velocità dell'onda analizzata, le teorie di Airy e di Stokes al II ordine forniscono risultati assai simili fra loro, discostandosi leggermente solo in corrispondenza dei valori massimi e minimi.

Sulla base di quanto detto si deve osservare che la teoria di Airy, a fronte di risultati del tutto confrontabili con la teoria di Stokes al II ordine, si lascia preferire per la maggiore semplicità delle equazioni del profilo di superficie e delle componenti orizzontali e verticali di velocità.

Si osserva che tale conclusione consente di estendere, ai fini progettuali, il campo di validità della teoria di Airy per la descrizione del moto ondoso.

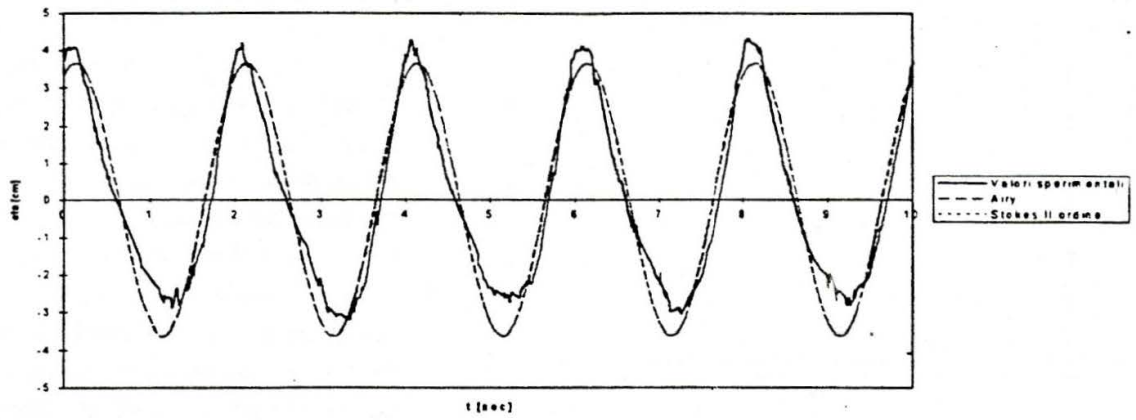


Fig. 4. Profilo di superficie.

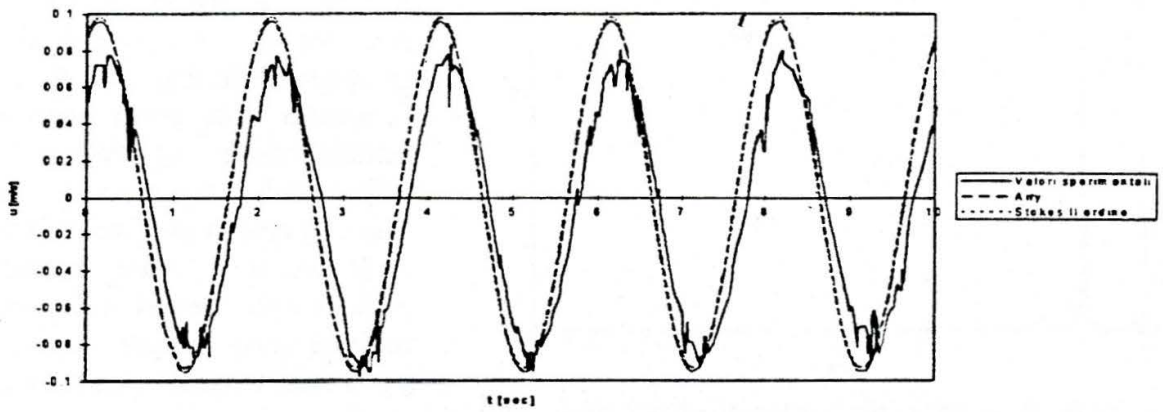


Fig. 5. Rilievi della componente orizzontale di velocità (punto di misura a distanza 22.7 cm dal fondo).

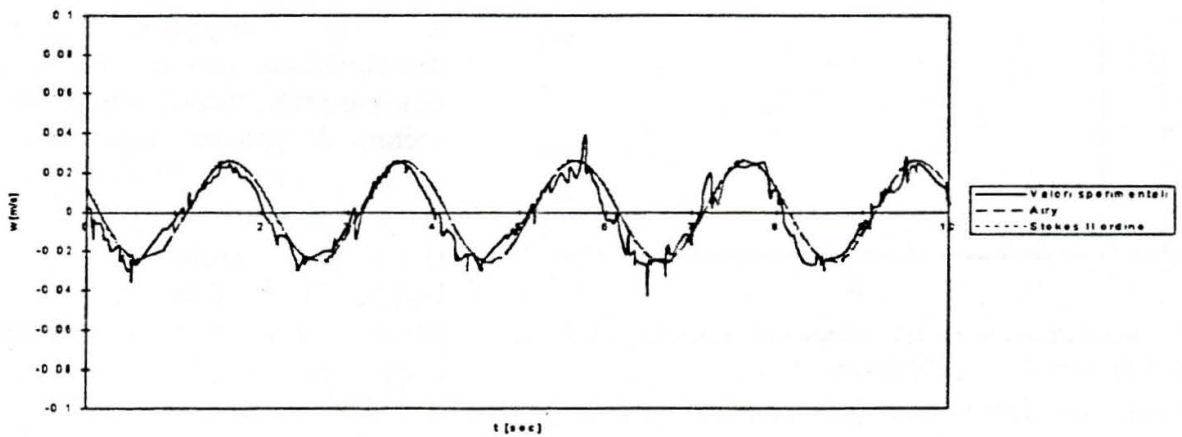


Fig. 6. Rilievi della componente verticale di velocità (punto di misura a distanza 22.7 cm dal fondo).

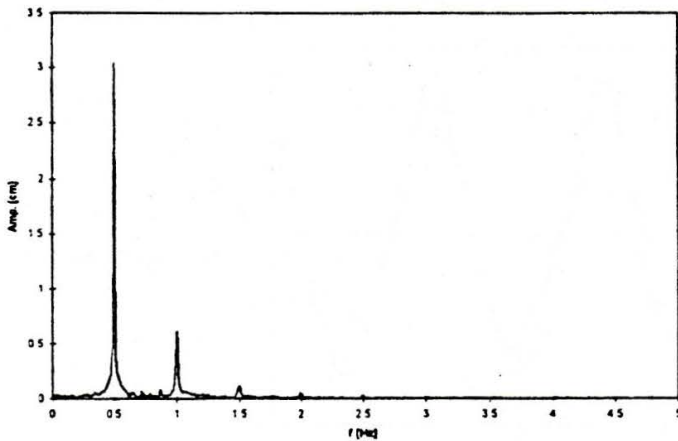


Fig. 7. Spettro di ampiezza del profilo di superficie.

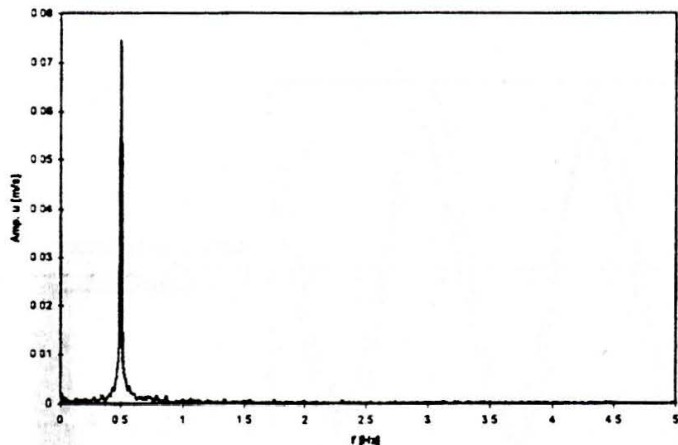


Fig. 8. Spettro di ampiezza delle componenti orizzontali di velocità (punto a distanza 22.7 cm dal fondo).

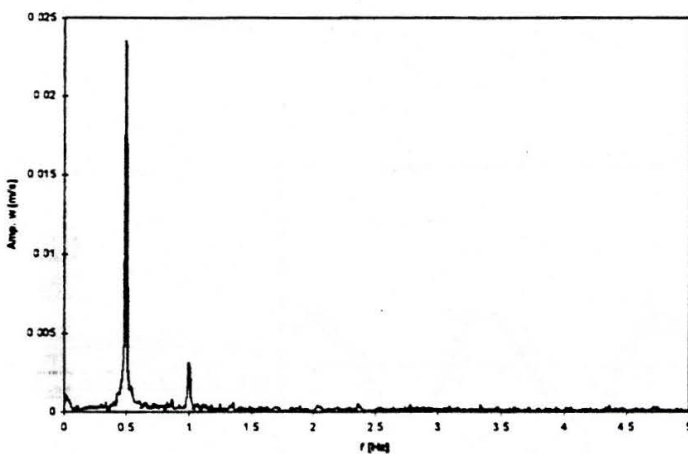


Fig. 9. Spettro di ampiezza delle componenti verticali di velocità (punto a distanza 22.7 cm dal fondo).

velocità, è possibile valutare le non linearità attraverso i rapporti tra l'energia in un intorno delle due armoniche superiori (E_2 ed E_3) e quella presente in un intorno della componente principale (E_1), come proposto da Guza e Thornton (1980) e Petrillo (1988).

5. ANALISI SPETTRALE

Le figg. 7, 8 e 9 riportano rispettivamente gli spettri di ampiezza delle elevazioni e delle componenti orizzontali e verticali di velocità valutate per le stesse serie storiche analizzate nel paragrafo precedente.

L'analisi spettrale delle componenti di velocità mette in evidenza significative diversità di comportamento. Infatti le componenti di velocità non sono affette nella stessa misura dalle non linearità. Per quanto attiene lo spettro di fig. 8, si osserva che l'ampiezza della prima armonica è molto piccola e si confonde con il rumore di fondo. Per gli spettri delle figg. 7 e 9, invece, l'ampiezza della prima armonica è particolarmente significativa. Tali differenze di comportamento sono in linea con quanto previsto dalla teoria di Stokes al II ordine, secondo la quale le non linearità della velocità verticale sono sempre maggiori di quelle della velocità orizzontale (figg. 1 e 2).

Ai fini dell'analisi delle non linearità dell'intero campo di moto, è stata calcolata l'energia presente nell'intorno delle frequenze $f_p=0.5$ Hz, $2f_p=1$ Hz e $3f_p=1.5$ Hz.

I contenuti energetici intorno a tali frequenze, indicati rispettivamente con E_1 , E_2 ed E_3 , possono essere ricavati integrando lo spettro di potenza negli intervalli $(0.9f_p) < f < (1.1f_p)$, $(0.9 \times 2f_p) < f < (1.1 \times 2f_p)$ e $(0.9 \times 3f_p) < f < (1.1 \times 3f_p)$ (Petrillo, 1988).

Utilizzando, pertanto, gli spettri di potenza del profilo dell'onda e delle componenti orizzontali e verticali di

Nelle figg. 10 e 11 si riportano i valori sperimentali di E_2/E_1 relativi alle componenti orizzontali e verticali di velocità, rispettivamente, in funzione della distanza dal fondo Z adimensionalizzata con la profondità h .

Da tali figure si osserva che i sopra menzionati rapporti relativi alla componente verticale di velocità (w) sono sempre più grandi dei corrispondenti rapporti per la componente orizzontale di velocità (u), in accordo con la teoria di Stokes al II ordine, i cui valori sono riportati nelle figg. 1 e 2. Inoltre, i diagrammi delle figg. 10 e 11 mettono in evidenza un andamento crescente del parametro E_2/E_1 in funzione della distanza dal fondo, in accordo con la stessa teoria. Infine, si osserva che i valori sperimentali di E_2/E_1 relativi alla componente verticale di velocità e alle elevazioni (per le quali $E_2/E_1=0.048$) sono sempre maggiori di quelli teorici ottenuti applicando le relazioni di Stokes al II ordine.

Tab. V.

	E_2/E_1	E_3/E_1
η	0.048	0.0043
u	0.0027	0.00070
w	0.037	0.0014

I valori medi di E_2/E_1 ed E_3/E_1 relativi alle componenti di velocità sono più piccoli dei corrispondenti valori relativi al profilo di superficie. Per quanto attiene i valori sperimentali di E_3/E_1 , essi sono stati sempre relativamente piccoli rispetto ad E_2/E_1 e non hanno evidenziato un andamento significativo in funzione della distanza dal fondo. In ogni caso anche i parametri E_3/E_1 sono risultati maggiori per le componenti verticali di velocità rispetto a quelle orizzontali.

6. CONCLUSIONI

Il presente studio si inserisce nell'ambito di una più ampia ricerca volta alla determinazione delle correlazioni tra le componenti di velocità e il profilo di superficie di un campo di moto ondoso, sia regolare che random.

Le tecniche di misura messe a punto nel laboratorio del Dipartimento di Ingegneria delle Acque del Politecnico di Bari permettono di determinare simultaneamente e con elevata

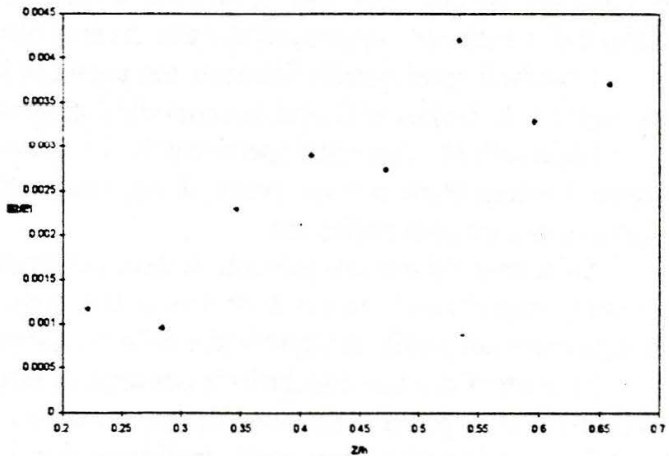


Fig. 10. E_2/E_1 della componente orizzontale di velocità.

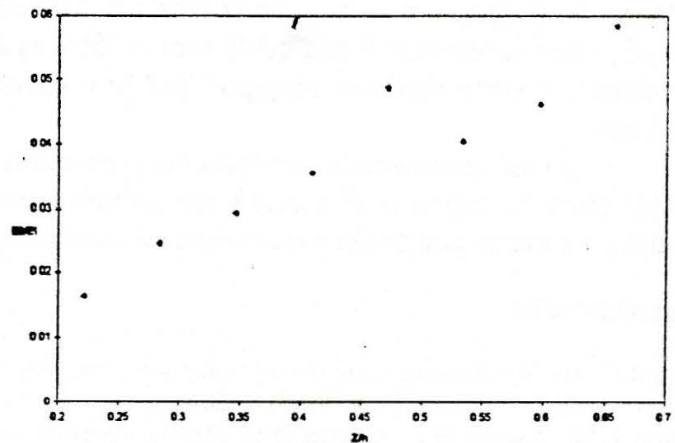


Fig. 11. E_2/E_1 della componente verticale di velocità.

In tab. V si riportano i valori di E_2/E_1 ed E_3/E_1 per le elevazioni e i valori medi degli stessi parametri per le componenti orizzontale e verticale di velocità (u e w rispettivamente), relativi ai punti di misura riportati in tab. IV.

precisione il profilo di superficie e le componenti orizzontale e verticale di velocità di un'onda. Ciò consente di correlare correttamente le grandezze caratteristiche di un campo di moto ondoso e di verificare l'applicabilità delle diverse teorie che ne descrivono l'andamento.

I risultati sperimentali illustrati nel presente lavoro sono relativi ad un'onda che rientra nella regione di Stokes al II ordine secondo il diagramma di Le Méhauté.

Dal confronto con i dati sperimentali, si osserva che le teorie di Airy e di Stokes al II ordine, riescono a interpretare con un grado di approssimazione accettabile e comparabile tra di loro il campo di moto ondoso analizzato.

Sulla base dei risultati ottenuti, si deve osservare che la teoria di Airy, a fronte di risultati del tutto confrontabili con la teoria di Stokes al II ordine, si lascia preferire per la maggiore semplicità delle equazioni del profilo di superficie e delle componenti orizzontali e verticali di velocità.

Si osserva che tale conclusione consente di estendere, ai fini progettuali, il campo di validità della teoria di Airy per la descrizione del moto ondoso.

Le non linearità sono state analizzate con i parametri E_2/E_1 ed E_3/E_1 , in analogia con quanto proposto da Guza e Thornton (1980), Petrillo (1988) e Chiaia et al. (1990). In particolare, l'andamento di E_2/E_1 per le componenti di velocità è crescente in funzione della distanza dal fondo, in accordo con la teoria di Stokes al II ordine. Inoltre, i valori sperimentali di E_2/E_1 sono confrontabili con quelli teorici (Stokes al II ordine) per le componenti orizzontali di velocità, mentre risultano maggiori per le componenti verticali di velocità e per il profilo dell'onda.

L'analisi sperimentale condotta nel presente lavoro conferma quanto affermato da Dean (1970) circa la difficoltà di individuare un'unica teoria in grado di descrivere con la stessa precisione tutte le grandezze caratteristiche di un campo di moto ondoso.

BIBLIOGRAFIA

- Dean R.G. (1970), *Relative validities of water wave theories*, Jour. of Waterways and Harbors Division, Proc. of ASCE, Vol. 96, No. WW1, February.
- Casson L.W., Lawler D.F., Bogard D.G. (1994), *Spectral analysis of fluid flow in oscillating grid reactor*, ASCE, Jour. of Eng. Mech., Vol. 120, No. 2, February.
- Chiaia G., Damiani L., Petrillo A. (1990), *Wave spectra transformations*, Twenty-Second Coastal Engineering Conference, Delft, The Netherlands, July 2-6.
- Chiaia G., Damiani L., Petrillo A. (1991), *Wave spectra observations in surf-zone*, XXIV IAHR Congress, Madrid, 9-13 September.
- Gaster M., Roberts J.B. (1975), *Spectral analysis of randomly sampled signals*, J. Inst. Maths Applics, 15.
- Graw K.U. (1994), *Comparison of wave theories with velocity measurement*, Int. Symp.: Waves - Physical and Numerical Modelling, University of British Columbia, Vancouver, Canada, 21-24 August.
- Guza R.T., Thornton E.B. (1980), *Local and shoaled comparisons of sea surface elevations, pressures, and velocities*, Jour. of Geoph. Res., Vol. 85, No. C3, March 20.
- Lamberti A., Petrillo A., Ranieri M. (1988), *Sulla generazione ed il rilievo di onde casuali in canaletta bidimensionale*, Idrotecnica, n. 1, gennaio-febbraio.
- Petrillo A. (1988), *Evoluzione delle onde di mare su bassi fondali sabbiosi con pendenza variabile*, IX Congresso Nazionale AIMETA, Bari 7-8 ottobre.
- Ragone A. (1983), *Rilievo con anemometro laser Doppler delle caratteristiche cinematiche delle particelle in un processo di moto ondoso*, Simp. sull'Anemometria Laser Doppler nella Sperimentazione Idraulica, Roma, 17-18 ottobre.