

Esperimenti di laboratorio sulla circolazione indotta da strutture tracimabili e confronto con i modelli

Leonardo Damiani¹, Luca Martinelli², Lorenzo Cappietti³, Luigi Pratola¹, Carlo Lorenzoni⁴

¹ Dipartimento di Ingegneria delle Acque e di Chimica - Politecnico di Bari, via E. Orabona, 4 - 70010 Bari.

Tel.: +39 080 5963286, Fax: +39 080 5963414, E-mail: l.damiani@poliba.it, l.pratola@poliba.it

² Dipartimento di Ingegneria delle Strutture, dei Trasporti, delle Acque, del Rilevamento, del Territorio (DISTART) -

Università di Bologna, viale Risorgimento, 2 - 40136 Bologna. Tel.: +39 051 2093745,

Fax: +39 051 6448346, E-mail: luca.martinelli@mail.ing.unibo.it

³ Dipartimento di Ingegneria Civile (DIC) - Università di Firenze, via S. Marta, 3 - 50139 Firenze.

Tel.: +39 055 4796316, Fax: +39 055 495333, E-mail: cappietti@dicea.unifi.it

⁴ Istituto di idraulica e infrastrutture viarie - Università Politecnica delle Marche, via Breccie bianche - 60131 Ancona.

Tel.: +39-071-220-4529, Fax: +39-071-220-4528, E-mail: c.lorenzoni@univpm.it

Riassunto

Il presente articolo descrive le prove sperimentali realizzate su modello a fondo mobile presso il "Laboratorio di Ricerca e Sperimentazione per la Difesa delle Coste" (LIC) del Politecnico di Bari finanziate dal MIUR nell'ambito del progetto PRIN 2001 dal titolo "Idrodinamica e morfodinamica di spiagge protette da opere tracimabili". Le prove sono finalizzate allo studio dell'influenza delle barriere sulla morfodinamica costiera e sulla circolazione indotta nelle zone protette. I risultati ottenuti sono stati utilizzati in altre memorie prodotte nell'ambito dello stesso progetto.

Nel seguito, si è fissata l'attenzione sulle configurazioni di prova utilizzate e sulle modalità sperimentali, fornendo un database delle principali caratteristiche geometriche delle strutture utilizzate, nonché sui valori massimi e medi delle correnti misurate ai varchi.

Infine si riportano alcuni risultati significativi relativi al campo di moto rilevato in alcune configurazioni, nonché un confronto con simulazioni numeriche delle correnti ai varchi, rinviando, per un'analisi più dettagliata dei risultati, agli altri lavori prodotti nell'ambito dello stesso progetto di ricerca ed inclusi nel presente numero speciale.

Parole chiave: frangiflutto, cresta bassa, esperimento, vasca, fondo mobile, circolazione, corrente di ritorno.

Abstract

The paper describes the experimental investigations carried out in the mobile bed basin of the Bari Politecnics, Laboratorio di Ricerca e Sperimentazione per la Difesa delle Coste (LIC) del Politecnico di Bari, supported by MIUR, within the PRIN 2001 programme entitled "Hydrodynamics and morphodynamics of low crested structures".

The tests performed aimed at investigating the effect of Low Crested Structures (LCS) on the nearshore hydro-morphodynamics. The results obtained are described in detail at other papers produced within the same project. This note focuses on the test configurations and on the testing methods, providing a database with geometrical characteristics, incident wave field as well as the average and maximum rip current velocities measured for a total of 22 conditions.

The paper also presents the horizontal and vertical velocity distribution in some conditions and a brief comparison between measured and simulated velocity at the gaps; a more detailed analysis of the results is given by specific papers included in this special issue.

Keywords: breakwater, low crest, experiment, basin, mobile bed, circulation, rip current.

Introduzione

I processi erosivi, che sempre più spesso interessano la fascia costiera sabbiosa, possono essere fronteggiati con ripascimenti protetti da strutture parallele od ortogonali alla riva, che mirano a ridurre i fattori che causano la mobilità dei sedimenti. In particolare, l'impiego di barriere sommerse o a cresta bassa determina una certa riduzione dell'energia ondosa, garantendo nel contempo un sufficiente ricambio idrico, essenziale per salvaguardare la qualità delle acque.

In Italia, tale tipologia di difesa della spiaggia è alquanto diffusa (Lamberti e Tomasicchio, 1981; Briganti et al., 2002; Calabrese et al., 2003) e tipicamente le barriere sono intervallate da varchi che garantiscono l'accesso dei natanti e riducono il rischio di formazione di aree di ristagno durante i periodi di calma. Le suddette strutture, se da un lato riducono l'agitazione ondosa incidente, dall'altro producono un aumento del livello idrico nell'area protetta dovuto alla tracimazione, detto *piling up* (Ruol et al., 2005), che forza una circolazione anche molto intensa (Archetti et al. 2003), in grado di aggravare i processi erosivi in atto. Sono documentati diversi casi in cui l'efficacia delle barriere a berma bassa è risultata limitata per effetto di intense correnti di circolazione (Mancinelli et al., 2005).

Oltre a minare l'efficacia dell'opera, le correnti sono fonte di instabilità della struttura stessa. Nelle tradizionali barriere frangiflutti si registra una notevole escavazione al piede *off-shore* lungo il tronco delle opere (Aminti e Cappiotti, 2003) imputabile alla riflessione, che rende necessari massicci interventi di rifioritura con notevole aggravio dei costi. Per le barriere a cresta bassa, pur avendo riscontrato fenomeni di escavazione simili (anche se di minore entità) a quelli delle barriere tradizionali (Chiaia, Damiani e Petrillo, 1992), è possibile che si verifichino fenomeni localizzati di erosione, principalmente localizzati in prossimità delle testate (Aminti e Cappiotti, 2003; Aminti et al., 2005), dove si risente delle intense correnti di ritorno.

Oltre alla diretta azione sulla morfologia dei litorali, i fenomeni idrodinamici attorno alle barriere tracimabili hanno ripercussioni anche su questioni di carattere più generale, quali la sicurezza della balneazione; basti pensare, ad esempio, alla pericolosità delle violente ed intense correnti di ritorno nei varchi e delle vorticità ad esse legate che si generano in presenza di mareggiate.

Infine, si deve anche sottolineare l'importanza delle correnti a tergo delle barriere nel garantire una buona qualità delle acque, che potrebbe essere minata da un eccessivo ristagno.

Una migliore valutazione del campo di moto ed in particolare delle correnti ai varchi, consentirebbe una più corretta progettazione delle opere finalizzate a contrastare l'erosione dei litorali e nel contempo consentirebbe di minimizzare l'impatto ambientale ed il pericolo per la balneazione. Detta valutazione, però, risulta abbastanza complessa a causa dello stretto rapporto che lega le correnti alla portata di tracimazione, fenomeno fortemente non lineare a causa del possibile alternarsi di condizioni di emergenza e sommergenza della barriera durante il passaggio di una singola onda. Lo scenario complessivo è complicato dall'interazione fra tracimazione, correnti e *piling-up*, che impedisce di conoscere a priori la tracimazione se non si conosce il *piling-up*, a sua volta funzione della resistenza al moto delle correnti.

Di fronte all'estrema complessità che caratterizza tali fenomeni, la sperimentazione condotta su modelli fisici tridimensionali è da considerarsi un prezioso supporto allo studio e alla progettazione degli interventi, pur con i noti limiti che tali simulazioni comportano.

In quest'ottica si inseriscono le numerose prove sperimentali condotte su modelli fisici a fondo mobile realizzati nella vasca per modelli di dinamica costiera del "Laboratorio di Ricerca e Sperimentazione per la Difesa delle Coste" (LIC) del Politecnico di Bari, finanziate dal MIUR nell'ambito del PRIN 2001 "Idrodinamica e morfodinamica di spiagge protette da opere tracimabili", coordinato dal Prof. A. Lamberti dell'Università di Bologna. Le esperienze, condotte con numerose configurazioni di prova, si ponevano l'obiettivo generale di valutare sia l'evoluzione morfologica dei litorali protetti, che l'idrodinamica costiera nelle zone protette, con particolare riferimento ai varchi.

Le prime configurazioni indagate si riferiscono ad una situazione specifica e piuttosto complessa quale quella del modello di un tratto di litorale di Marina di Pisa (Petrillo, 2002) che, sebbene difficilmente confrontabile con altre situazioni reali, ha fornito interessanti informazioni di carattere generale utili alla comprensione dei fenomeni associati alle circolazioni. Da tale configurazione poi, si sono via via realizzate, con opportune modifiche alle strutture, altre configurazioni più schematiche e, pertanto, più facilmente associabili a situazioni più generali, i cui risultati appaiono particolarmente utili a validare le simulazioni numeriche. A tal proposito, ne verranno presentate alcune che evidenziano in particolare il legame fra corrente ai varchi e idrodinamica complessiva e che, nonostante le inevitabili differenze nelle condizioni al contorno assunte, ben si prestano ad un confronto con i risultati sperimentali ottenuti.

Saranno proposte simulazioni eseguite con il software commerciale MIKE 21 (usando il modulo *Parabolic Mild Slope*), di tipo *phase averaged*, mediato cioè sul periodo delle onde di interesse, e simulazioni eseguite con un modello basato sulle equazioni non lineari per acque basse (NLSWE), di tipo *phase*

resolving, che rappresentano cioè la fase dell'onda e pertanto si prestano ad una migliore descrizione della tracimazione.

La complessa interazione fra i diversi fenomeni che si presentano in condizioni di strutture tracimabili suggerisce comunque, in sede di progettazione definitiva, di far ricorso alla modellistica fisica che, nonostante le inevitabili approssimazioni legate agli effetti scala, fornisce risultati del tutto confrontabili con quelli riscontrabili in prototipo, specie per quanto attiene i processi idrodinamici. In fase di progettazione preliminare, invece, è fondamentale l'utilizzo di simulazioni numeriche con modelli sempre più affinati ed in grado di fornire un quadro sempre più affidabile della realtà.

L'obiettivo del presente articolo è quello di descrivere il campo delle correnti indotto dalla presenza di opere tracimabili, sia nelle componenti medie che nelle anomalie temporali. Dopo aver illustrato il complesso sperimentale e le modalità di prova, verranno riportate, in forma adimensionale, una serie di misure della velocità delle correnti medie e massime rilevate in prossimità dei varchi, nonché la distribuzione delle velocità lungo la verticale e trasversalmente al varco; verranno altresì proposte alcune osservazioni con traccianti.

Descrizione del modello

Il modello è stato realizzato nella vasca per studi di dinamica costiera del Laboratorio, avente una lunghezza di 90 m, larghezza di 50 m e profondità di 1,20 m (Damiani et al., 2002). La vasca è dotata di un generatore di moto ondoso in grado di generare stati ondosi con diverse caratteristiche, con un fronte d'onda di 28,8 m; tra il generatore e la retrostante parete della vasca è stata realizzata una scogliera per l'assorbimento di energia, necessaria ad impedire la riflessione prodotta dalla parete verso il generatore stesso.

Il modello occupa pertanto una zona della vasca larga 28,8 m, di lunghezza utile pari a circa 40 m, delimitata lateralmente da pareti costituite da lastre di acciaio fissate al fondo e sempre ortogonali al generatore, con funzioni di guida per il moto ondoso (l'angolo di incidenza del moto ondoso viene prodotto mediante la rotazione del generatore e delle guide rispetto alla spiaggia). Sui lati corti, il modello è delimitato dal generatore di moto ondoso da una parte, e da una basamento in calcestruzzo armato dall'altra. Al piede del basamento, lungo tutta la lunghezza dello stesso, è stata realizzata una canaletta di raccolta per le eventuali acque di *overtopping*, al di là della quale è ubicata un'ampia spiaggia emersa che rende minima l'influenza del basamento sui processi indagati.

Tutte le prove di seguito descritte, sono state effettuate su fondo mobile, costituito da sabbia silicea opportunamente vagliata e lavata, con fuso granulometrico molto stretto, D_{50} (diametro della maglia del setaccio che consente il passaggio del 50% in peso del materiale) pari a 0,185 mm (nel tempo un ulteriore dilavamento del materiale ha determinato un leggero aumento del D_{50}) e una velocità di caduta in acqua ferma $w=2,55$ cm/s, misurata sperimentalmente (Ranieri, 2000).

Gli esperimenti possono essere considerati rappresentativi di situazioni reali in analogia di Froude con scala $1/20 \div 1/40$.

Con tale assunzione, il prototipo è caratterizzato da una altezza d'onda variabile fra 2 e 4 m, mentre il D_{50} assume valori variabili tra 0,5 e 1,5 mm. Il diametro dei sedimenti è stato valutato utilizzando il criterio di analogia di Dean (conservazione del parametro H/wT) che, seppur con numerose incertezze (Ranieri, 2002), viene frequentemente assunto per definire il rapporto di riduzione della sabbia nei modelli fisici per lo studio dei processi morfodinamici. Con tale assunzione, si può osservare che il fondo realizzato in vasca è rappresentativo di numerose spiagge italiane. Il materiale scelto, infatti, è leggermente più grossolano di alcune situazioni note (ad esempio Emilia Romagna e Veneto) e mediamente più fine di altre (ad esempio Marche).

Configurazioni di prova

Nella vasca sono state riprodotte diverse configurazioni di scogliere parallele tracimabili, utilizzando massi di calcare aventi un D_{n50} (diametro nominale mediano) pari a 4,5 cm e un peso compreso tra 1,85 e 3,33 N.

In Tabella 1 sono riportate le principali caratteristiche geometriche delle diverse configurazioni di prova, focalizzando l'attenzione sui valori del *freeboard* (altezza della cresta rispetto al l.m.m.).

Tabella 1 - Caratteristiche fisiche delle singole configurazioni.

Conf.	Caratteristiche trasversali				Profondità				Caratteristiche longitudinali			
	<i>freeboard</i>	Larghezza di berma in sommità	Distanza dell'asse delle barriere dalla linea di riva	Pendenza parametri barriere	Profondità al battionda d_0	Profondità media al piede delle barriere		Media della profondità ai varchi (in asse) d_3	n. segmenti/n. varchi	Lunghezza a dei segmenti	Larghezza dei varchi al piede	Protezione dei varchi (S/N)
						<i>off-shore</i> d_1	<i>on-shore</i> d_2					
[cm]	[cm]	[cm]		[cm]	[cm]	[cm]	[cm]		[cm]	[cm]		
C1	+ 4,7	8,3 - 10	200 - 330	1:2,5	82	22	5 - 9	12	5/4	630 - 900	32 - 38	S
C2	+ 6,7	8,3 - 10	200 - 330	1:2,5	80	20	3 - 7	10	5/4	630 - 900	32 - 38	S
C3	- 4,0	50 - 60	200 - 330	1:2,5	82	22	5 - 9	14	2/1	1500 - 1100	60	S
C4	-1,7	30	260 - 330	1:2	79	15 - 17	11 - 13	13 - 17	6/5	375	0 - 93 - 375	2S + 3N
C5	0	30	260 - 330	1:2	77,3	14 - 17	10 - 13	12 - 16	6/5	375	0 - 93 - 375	2S + 3N
C6	1,7	30	260 - 330	1:2	76,6	13 - 14	9 - 12	11 - 15	6/5	375	0 - 93 - 375	2S + 3N
C7	-1,5	30	285	1:2	79	12,5	12,5	12,5	3/2	400 - 405	70 - 75	N
C8	-1,5	30	285	1:2	79	12,5	12,5	-	setto isolato	380 - 400	-	-

Si deve sottolineare che, le barriere nelle configurazioni C1 e C2 sono decisamente emerse, nella C6 poco emerse, nella C5 sono a *freeboard* nullo, mentre nelle rimanenti sono sommerse. Il rapporto fra larghezza dei varchi e lunghezza delle barriere varia da 0 (caso bidimensionale) ad 1 (sequenza di barriere sostanzialmente isolate).

Come detto in precedenza, le configurazioni C1 e C2 (Fig.1-A), sono state realizzate in occasione della sperimentazione su modello fisico tridimensionale delle opere per la protezione del litorale di Marina di Pisa e, sebbene abbastanza complesse e poco generalizzabili, hanno fornito risultati piuttosto interessanti. Il litorale riprodotto in modello è caratterizzato dalla presenza di una scogliera radente e continua, lungo la strada litoranea e da un sistema di scogliere parallele emerse, ad asse irregolare, poste alla distanza di 80-100 m da riva, interrotte da varchi della larghezza di circa 15÷20 m. Il fondale presenta una pendenza media pari a 1:30 nella zona protetta, per poi subire una brusca variazione al piede delle scogliere parallele, dove è ben visibile una fossa di erosione dovuta all'azione contemporanea di una corrente *long-shore* e di una riflessione sulla barriera stessa; oltre la fossa, la pendenza del fondale si riduce fino a valori mediamente pari a 1:350. Nella configurazione C3 (Fig.1-B), è stata ridotta la quota di coronamento delle barriere, rendendole decisamente sommerse e sono stati chiusi i varchi 1, 2 e 4, lasciando aperto solo il n.3. La scelta di realizzare un unico varco, consente di concentrare nel suo intorno la formazione della corrente di ritorno complementare alla portata "pompatà" dalle onde a tergo delle barriere sommerse. In questo modo, i principali fenomeni idrodinamici e morfodinamici in vasca, sono concentrati in una porzione limitata del modello che, opportunamente strumentata, ha costituito la sezione di misura durante le prove.

Le configurazioni C4, C5 e C6 (Fig. 1-C), costituite da scogliere allineate ed intervallate da varchi di diversa lunghezza, sono ancora caratterizzate da barriere a cresta bassa, sebbene nella prima siano sommerse, nella seconda a *freeboard* nullo e nella terza emerse. La situazione indagata con tali configurazioni è rappresentativa di un possibile paragone in Emilia Romagna, costituito da una spiaggia avente pendenza al largo di 1:200.

L'assetto del modello è completato da una canaletta impermeabilizzata posta a tergo delle barriere ed ortogonale alle stesse. La canaletta divide il modello in due parti di uguale dimensione, disconnesse fra loro nella zona della spiaggia protetta e caratterizzate da una diversa estensione dei varchi: una situazione con varchi stretti e una con varchi larghi, idonei a rappresentare il caso di barriera isolata. I varchi larghi nel lato sinistro del modello risultano non protetti, mentre dei tre varchi della parte destra, i due laterali sono stati protetti con massi delle stesse dimensioni di quelli utilizzati per le scogliere. Per completezza di informazione, si deve ricordare che i test eseguiti sulle configurazioni di Figura 1-C sono stati caratterizzati da diversi valori di sommersenza, ottenuti variando il tirante idrico in vasca.

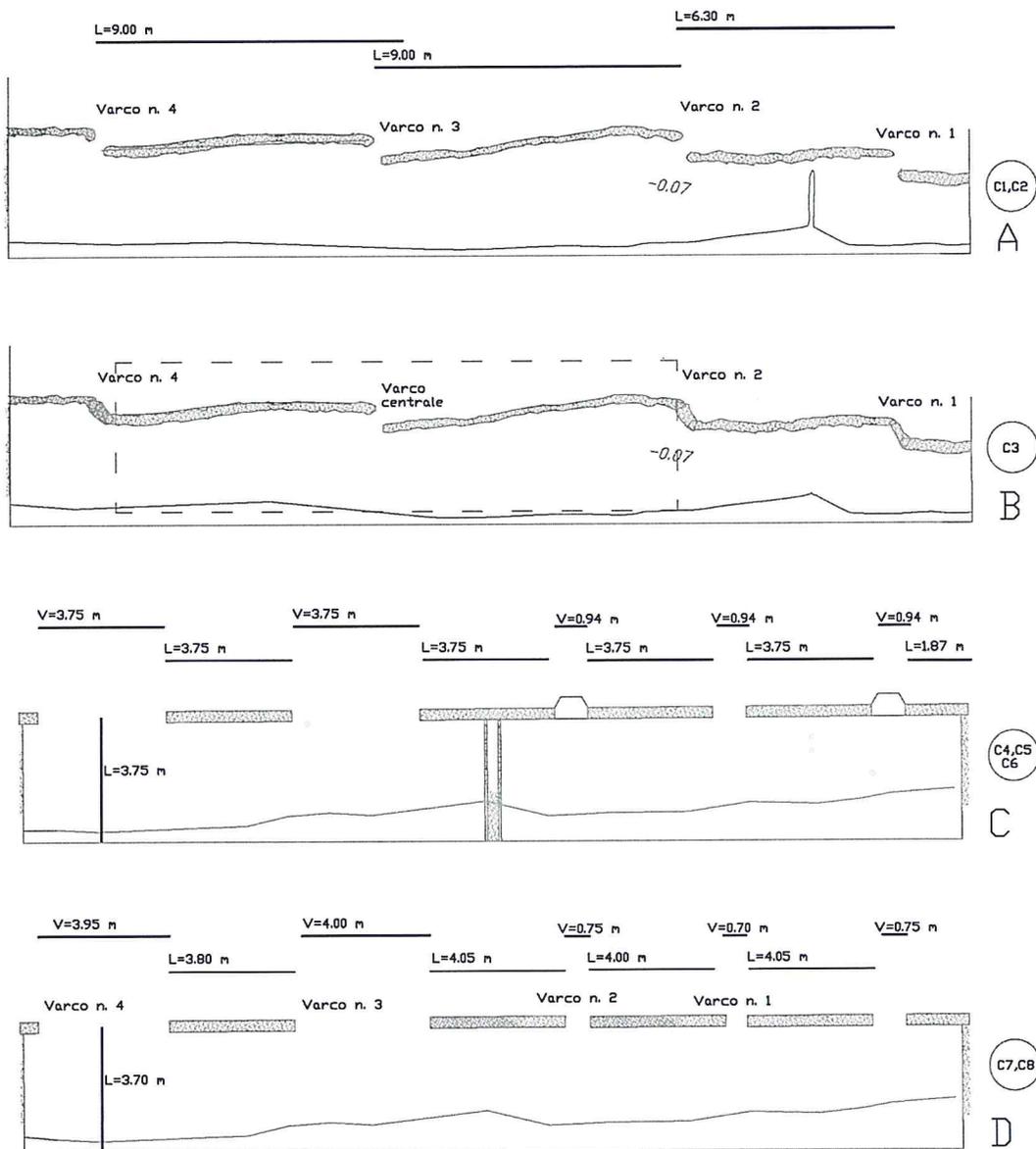


Figura 1 - Pianta delle strutture studiate nelle configurazioni C1÷C8.

Con le configurazioni C7 e C8 (Fig. 1-D), le prove sperimentali sono state effettuate rispettivamente su barriere multiple disposte in batteria e su barriere isolate, tutte comunque sommerse. Il profilo di spiaggia presenta una pendenza 1/20 lato terra e 1/10 lato mare fino alla linea batimetrica -0,22 m, proseguendo poi con pendenza 1/200 al largo di essa. Come per le C4, C5 e C6, le strutture sono allineate.

Attacchi ondosi

In Tabella 2 sono riportate le principali caratteristiche degli attacchi ondosi (la direzione di propagazione dell'onda è misurata in senso orario rispetto alla normale entrante alla linea di costa) utilizzati per le varie configurazioni di prova.

Tutti gli attacchi ondosi sono stati generati con movimento simultaneo (a sfasamento nullo) di tutte le pale che compongono il battionda, in modo da realizzare fronti d'onda paralleli al generatore.

Durante le prove vengono sempre utilizzate sonde per il controllo del moto ondoso al largo, che evidenziano un'altezza d'onda abbastanza costante lungo l'intero fronte generato, nonché la quasi totale assenza di componenti stazionarie al largo, pur in assenza di un sistema di assorbimento della riflessione sulle pale del battionda.

Tabella 2 - Caratteristiche dei test eseguiti.

TEST ESEGUITI					
Conf.	Test	Attacchi ondosi inviati		Tipo di Spettro <i>R (regolare)</i> <i>J (Jonswap)</i>	Direzione di propagaz. dell'onda
		<i>H o Hs</i> [cm]	<i>T o Tp</i> [sec]		
C1	T1	10	1,28	J	0°
	T2	15	1,62	J	
	T3	13	1,53	J	
	T4	18	1,82	J	
C2	T1	5	0,94	J	0°
C3	T1	10	2,00	R	10°
	T2	10	2,00	R	
	T3	10	2,00	R	
	T4	10	2,00	R	
C4	T1 a,b	3,5	0,74	J	0°
	T2 a,b	5	0,89	J	
	T3 a,b,c	7,5	1,13	J	
	T4 a,b,c	7,5	1,03	J	
	T5 a,b,c	5	1,03	J	
C5	T1	5	0,89	J	0°
	T2	7,5	1,13	J	
	T3	5,5	1,03	J	
C6	T1	5	0,89	J	0°
	T2	7,5	1,03	J	
	T3	5,5	1,03	J	
C7	T1	5	1,83	R	0°
C8	T1	5	1,83	R	0°

Nei test in configurazione C1, C2, C4, C5 e C6 sono stati generati attacchi ondosi irregolari con spettro di tipo JONSWAP con fattore di picco $\gamma=3,3$ e perpendicolari alla spiaggia (0°), mentre i test in configurazione C3, C7 e C8 sono caratterizzati da onde regolari, inclinate di +10° per la prima ed ortogonali alla spiaggia per le altre.

In particolare nelle C4, C5 e C6 è stata simulata, attraverso una sequenza di 5 o 3 test (T1+T5 o T1+T3), una singola mareggiata frazionata in diversi intervalli, ciascuno con altezza e periodo stazionario. In linea di massima si è scelto una stessa ripidità in fase montante e una ripidità decrescente in fase calante. Nell'ipotesi di mareggiate rappresentative per l'Adriatico Settentrionale, in funzione della scala modello utilizzata per interpretare i risultati, le ondatazioni prodotte durante i test in esame possono rappresentare eventi estremi, ovvero eventi ordinari.

I test delle configurazioni C7 e C8 sono caratterizzati da otto attacchi di tipo regolare e da uno irregolare, perpendicolari alla spiaggia (0°). In Tabella, per brevità, si è riportato, per ciascuna delle due configurazioni, uno solo degli attacchi ondosi regolari generati.

La durata dei singoli attacchi ondosi, non riportata in tabella, è stata scelta in funzione del tipo di prova e soprattutto dal tipo di rilievo da eseguire. Ovviamente, la durata delle mareggiate assume una notevole importanza nel caso di analisi di tipo morfodinamico, mentre per lo studio delle correnti sono sufficienti durate più brevi e tali da garantire il raggiungimento delle condizioni stazionarie.

Strumenti di misura

Per la conduzione delle presenti esperienze, ci si è avvalsi di sonde resistive per le misure di altezza d'onda, e di misuratori di velocità acustico *doppler* (ADV) di tipo *side looking* (bidimensionale) e *down looking* (tridimensionale) per il rilievo delle correnti, mentre per il rilievo delle profondità nella zona protetta sono stati impiegati profilatori di fondo automatici. La scelta del tipo di ADV da utilizzare è stata dettata essenzialmente dalle condizioni di misura riscontrate di volta in volta. Infatti, nel caso di ADV tridimensionale, il volume di misura è posto al di sotto dello strumento e ad una distanza da esso dell'ordine dei centimetri. La presenza di bassi fondali, quindi, rende problematico l'utilizzo del suddetto strumento. Al contrario, nel caso dell'ADV bidimensionale, il volume di misura è posto sullo stesso piano della sonda ed è quindi possibile misurare le componenti di velocità sul suddetto piano, anche in presenza di tiranti idrici molto ridotti. Le misure di velocità sono state effettuate in sequenza, ove non diversamente specificato, utilizzando un solo ADV bidimensionale, spostandolo di volta in volta sul punto da investigare.

Come meglio specificato in seguito, in numerose sezioni di misura, i rilievi di velocità sono stati eseguiti a diversi affondamenti, spostando verticalmente la sonda, montata su un supporto dotato di indicatore metrico. In tal modo, è stato possibile ricostruire la distribuzione di velocità lungo la verticale. Per ciascuna delle prove effettuate, si è messo a punto un programma di misure specifico, in funzione degli obiettivi da perseguire. Ovviamente, per tutte le prove è stato effettuato il controllo del moto ondoso generato, in più punti della vasca.

Per la C1, sono state effettuate misure di velocità ai varchi lungo le verticali e rilievi di fondo, al fine di analizzare l'evoluzione dei fondali.

Per la C2, per la quale si è generato un unico attacco con energia minore, sono state eseguite misure di correnti lungo un piano orizzontale, nella zona *on-shore* alle scogliere parallele, al fine di ottenere un piano vettoriale di velocità nell'area protetta.

Per la configurazione C3 si è optato per un più completo programma di misure al fine di validare i risultati sperimentali con modelli numerici *phase averaged*. Si sono pertanto condotte misure di moto ondoso e di correnti, oltre che di profondità, focalizzando l'attenzione su un unico tipo di attacco ondoso come descritto in Tabella 2. L'onda di prova è stata scelta tenendo conto della sommergezza della barriera, in modo che durante gli esperimenti la berma risultasse sempre sommersa. In questa condizione, l'applicazione di modelli numerici *phase averaged* è coerente e fornisce il valor medio sulla verticale e sul periodo del flusso di massa sopra la barriera. Nel caso in esame, si è avuto cura di effettuare il rilievo dei fondali con elevato grado di dettaglio, al fine di fornire al modello numerico un'accurata descrizione delle condizioni al contorno. Per le stesse ragioni, anche i rilievi del moto ondoso sono stati effettuati in numerosi punti, per descrivere con precisione la sua evoluzione. Infatti, per la simulazione di correnti indotte da moto ondoso con modelli basati sulla teoria del *radiation stress* (Longuet-Higgins, 1962), la qualità dei risultati è strettamente legata alla fedele rappresentazione delle condizioni al contorno ed in particolare ad una dettagliata descrizione del processo di frangimento.

La brusca diminuzione di profondità in corrispondenza delle barriere, induce un frangimento localizzato sulla berma, con conseguente rapida diminuzione di energia. Occorre dunque descrivere con sufficiente precisione il conseguente gradiente di altezza d'onda per valutare la bontà dei risultati dei modelli numerici utilizzati sia per l'evoluzione delle onde che per l'analisi dei processi idrodinamici indotti dall'interazione onde - strutture.

In definitiva, le acquisizioni di moto ondoso sono state eseguite con 12 sonde disposte nell'intorno del varco, sia nei fondali antistanti le barriere che nella zona protetta. Inoltre, una seconda serie di acquisizioni con le sonde di livello è stata realizzata con lo scopo di determinare il coefficiente di riflessione, trasmissione e dissipazione del moto ondoso caratteristico delle barriere in esame. I rilievi di corrente sono stati eseguiti lungo 74 verticali (Fig. 2), che coprono per intero l'area del modello investigato.

Per fondali minori di 6 cm è stata misurata la velocità solo nel punto posto a 3 cm sotto il pelo libero, mentre per fondali maggiori sono state fatte più misure su punti ad affondamento crescente con incremento di 3 cm.

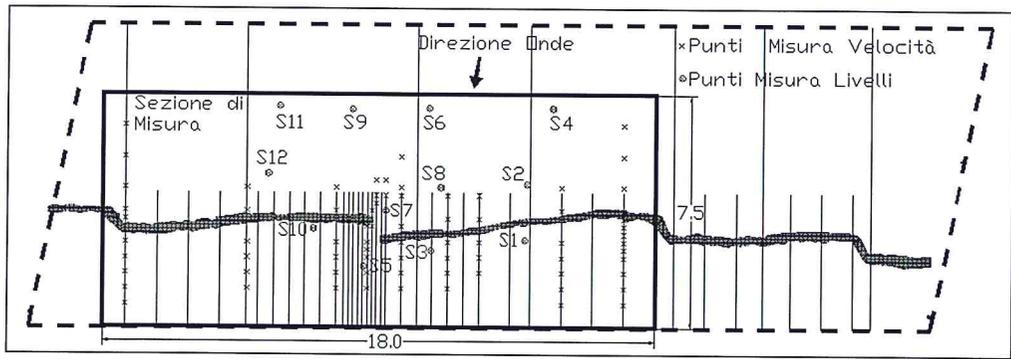


Figura 2 - Indicazione dei punti di misura delle velocità e dei livelli nella configurazione C3.

Con le configurazioni C4, C5 e C6 sono state utilizzate 18 sonde di livello e 4 ADV mediante i quali si sono monitorate le caratteristiche idrodinamiche, con diverse tipologie di prove:

- prove finalizzate alla valutazione delle portate ai varchi: sono state eseguite misure di velocità ai varchi, spostando di volta in volta un ADV in modo da ricostruire la distribuzione della velocità sia lungo le diverse verticali investigate, che lungo piani orizzontali ad eguale affondamento; un altro ADV è stato posizionato fra 2 sonde di livello sopra la barriera, per misurare la tracimazione ed un altro (di tipo *down looking*) in una nicchia ricavata all'interno della struttura entro la barriera, per valutarne la filtrazione. Sono state inoltre eseguite misure di livello in vari punti fissi (indicati in Fig. 3-A) tesi a valutare onde incidenti, trasmesse e livello medio dentro e fuori la struttura; maggiori dettagli sulle misure eseguite sono riportati in un apposito rapporto prodotto nell'ambito dello stesso progetto PRIN (Martinelli, 2003). Il complesso delle misure effettuate consente di tracciare un bilancio delle portate in ingresso ed in uscita dall'area protetta dalle scogliere, consentendo quindi una certa stima dell'errore;

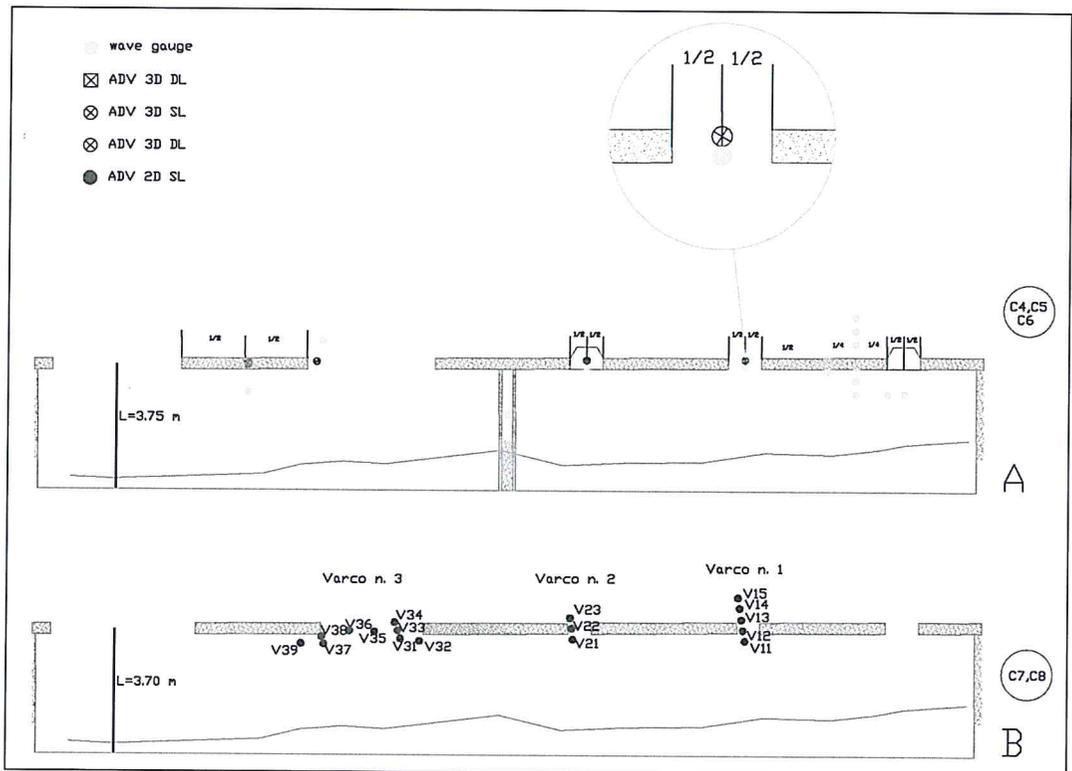


Figura 3 - Indicazione dei punti di misura delle velocità e dei livelli nelle configurazioni C4, C5, C6 (A) e C7, C8 (B).

- prove finalizzate alla valutazione del *piling-up* e delle correnti: rilievo sincrono di onde e velocità nei punti indicati in Figura 3-A, al fine di esaminare il diverso *piling-up* indotto dalle onde incidenti nelle aree caratterizzate da un diverso rapporto fra larghezza dei varchi e lunghezza delle barriere. La durata delle prove è stata almeno di 20 min, in modo da garantire il raggiungimento di condizioni stazionarie ed il passaggio di un congruo numero di gruppi d'onda;
- prove finalizzate alla valutazione dell'erosione: caratterizzate da un unico attacco ondoso della durata di circa 12h, rappresentativo, in scala 1:40 ed in analogia di Froude, di oltre 3 giorni di mareggiata. I rilievi batimetrici sono stati eseguiti ogni 2 ore, interrompendo la mareggiata per il tempo strettamente necessario per le misure.

Con le configurazioni C7 e C8 sono state effettuate misure di livello sotto l'azione delle nove ondate prese in esame, in condizioni stazionarie e parzialmente in quelle transitorie. Durante i cicli ondosi regolari agenti nelle condizioni stazionarie, sono state effettuate misure di velocità in vari punti planimetrici ubicati in corrispondenza dei varchi (Fig. 3-B) ed attorno alle testate delle barriere sommerse; in detti punti, le misure sono state effettuate lungo le verticali alle quote -3 cm, -6 cm, -9 cm e -12 cm.

Nell'ambito delle stesse configurazioni C7 e C8, sono stati compiuti numerosi e ripetuti cicli di prove di rilascio di traccianti fisici galleggianti. Tali prove sono state filmate con una videocamera posta su un treppiede in posizioni fisse, in modo da inquadrare la zona del modello da investigare e da poter confrontare i risultati ottenuti nei diversi cicli di prova. I filmati disponibili hanno consentito di ottenere una rappresentazione lagrangiana del campo di moto negli specchi d'acqua circostanti le scogliere.

Come traccianti sono state utilizzate sferette di legno di faggio del diametro di 25-30-42 mm, verniciate con smalto bianco per garantire loro una più efficace visibilità nelle riprese.

L'assenza di un carro ponte ha impedito di effettuare riprese dall'alto della zona di indagine; pertanto, per interpretare planimetricamente l'andamento delle traiettorie dei traccianti galleggianti, utile anche nei successivi confronti con i risultati delle simulazioni numeriche, è stato necessario ortorettificare le singole immagini, ovviamente distorte dalla prospettiva delle riprese effettuate dalla zona pedonale retrostante la spiaggia emersa. A tal fine è stata utilizzata una tecnica topografica di interpretazione delle immagini, che consiste nel raddrizzamento in un riferimento cartesiano dei singoli fotogrammi ripresi. La tecnica utilizzata richiede la presenza, nell'area del modello inquadrata, di una serie di riferimenti in posizioni note e/o allineamenti in due direzioni ortogonali sul piano orizzontale, a cui riferirsi nella conversione delle immagini riprese. A tal fine è stata allestita una struttura indipendente esterna, configurata come un reticolo planimetrico di maglia 50 cm x 50 cm. Essa è costituita da un contorno rigido di 6 m x 6 m di profilati di alluminio fra i quali è stato disteso un cordino bianco, ben visibile, in modo da formare il reticolo di linee della maglia richiesta. Sul contorno erano anche aggiunte altre tacche di riferimento ad un interesse ancora più fitto. La struttura reticolare, dopo opportune operazioni di livellamento, è stata inquadrata dalla telecamera posta nelle stesse posizioni utilizzate durante le prove, fornendo così le immagini di riferimento indispensabili per l'interpretazione delle prove di rilascio dei traccianti. La struttura, ovviamente, veniva rimossa durante i test.

In molti dei casi esaminati, ove ciò non interferiva con l'analisi di processi morfodinamici, si è provveduto a ripetere i test e le misure, in modo da verificare a campione la corretta risposta del sistema e la ripetibilità delle prove. Le misure delle grandezze idrodinamiche sono sempre state effettuate una volta raggiunte condizioni di regime in vasca.

Descrizione dei risultati

Il complesso dei risultati idrodinamici ottenuti nel corso delle diverse esperienze, ha consentito di analizzare nel dettaglio numerosi processi idrodinamici determinanti nell'analisi dell'efficacia delle barriere frangiflutti indagate nel presente lavoro. Pur rinviando agli specifici lavori l'esame approfondito di tali aspetti, si è ritenuto utile illustrare alcuni dei principali risultati ottenuti, relativi a tre aspetti influenzati dalla presenza di strutture tracimabili: la descrizione del campo di velocità, la valutazione delle correnti massime nei punti critici e la distribuzione verticale delle velocità in tali punti.

Nel seguito, si indicheranno con V_x le componenti di velocità ortogonali alla spiaggia (positive se dirette verso la spiaggia) e con V_y le componenti parallele alla spiaggia (positive se dirette da sinistra verso destra per un osservatore posto di spalle alla spiaggia). Le direzioni, quindi, sono valutate in senso orario a partire dalla normale entrante alla spiaggia, con lo stesso riferimento assunto per il moto ondoso.

Misura delle velocità massime

Una sintesi dei risultati ottenuti nei diversi test effettuati è riportata in Tabella 3, ove sono indicate le principali caratteristiche delle correnti misurate ai varchi.

In particolare la tabella riporta i valori massimi e medi delle velocità rilevate, nonché le rispettive direzioni. Le velocità medie e le relative direzioni sono state ricavate mediando i valori medi di velocità per ciascuna delle verticali indagate.

Il valore della velocità massima è ottenuto filtrando eventuali picchi isolati, (interpretati come errori di misura). Poiché inoltre la velocità è variabile lungo ciascuna verticale, si è ritenuto utile indicare la quota in cui essa viene misurata.

Le varie configurazioni presentate ricoprono un ampio range di situazioni reali, e pertanto la Tabella risponde all'esigenza pratica di valutare l'ordine di grandezza delle correnti ai varchi che, come già detto, costituiscono un importante elemento di analisi per stimare l'efficacia dell'opera.

E' evidente comunque che la Tabella va interpretata con molta cautela, facendo riferimento al tipo di configurazione e di onda generata ed al punto di rilievo ed alle condizioni presenti all'atto della prova. I dati riportati in tabella, ben si prestano a successive analisi tese a valutare l'influenza delle diverse condizioni di prova sui valori di velocità medi e massimi delle correnti ai varchi. Pur senza entrare nel merito di tali analisi, pare interessante osservare l'influenza dell'altezza d'onda sulle velocità medie delle correnti, mentre, come è lecito attendersi, le velocità massime risultano maggiormente influenzate dalla configurazione geometrica dei varchi.

Tabella 3 - Analisi delle velocità misurate ai varchi.

Configurazione	Prova	Velocità misurate ai varchi				
		V_{max}			V_{med}	
		Direzione [°]	Affondamento [cm]	Intensità [cm/s]	Direzione [°]	Intensità [cm/s]
C1	T1	221	8	24	230	21
	T2	230	4	39	228	33
	T3	212	4	36	223	34
	T4	212	8	41	214	40
C3	T1	151	3	65	165	21
	T2	151	6	51	169	19
	T3	162	9	51	174	15
	T4	171	12	48	190	10
C4	T1	180	8	25	180	6
	T2	180	8	34	180	9
	T3	180	8	46	180	14
	T4	180	8	49	180	15
	T5	180	8	25	180	7
C5	T1	180	8	40	180	8
	T2	180	10	45	180	10
	T3	180	10	31	180	7
C6	T1	180	8	26	180	2
	T2	180	8	33	180	5
	T3	180	8	25	180	1
C7	T1	169	6	44	154	12
C8	T1	11	3	40	112	7

Inerzia del sistema delle correnti

Le strutture caratterizzate da una quota della cresta prossima al pelo libero, sommersa od emersa di una quantità dello stesso ordine di grandezza del *piling-up*, condizionano sensibilmente la geometria in cui si sviluppa il sistema delle correnti durante l'attacco ondososo.

Durante un attacco ondoso, tipicamente stazionario e con uno spettro caratterizzato da una frequenza di picco, si susseguono nel tempo gruppi d'onda di intensità diversa (pur se statisticamente uguali) e strutture a sommergenza nulla risultano, durante la mareggiata, a volte completamente emerse ed a volte completamente sommerse.

È pertanto doveroso considerare l'ipotesi che la risposta alla forzante possa non essere stazionaria a causa della notevole variabilità di condizioni in cui opera il sistema.

Per stabilire quanto il sistema (lineare) vari nel tempo, è stata studiata l'evoluzione della risposta impulsiva ovvero della funzione di trasferimento fra *piling-up* e correnti in uscita dal varco: tali grandezze, ritenute rappresentative rispettivamente della forzante e della risposta del sistema, sono desumibili dalla misura del livello dietro le barriere e della velocità al varco, selezionando frequenze molto inferiori alla frequenza dell'onda.

Le prove più significative per l'analisi sono quelle in cui l'onda incidente è maggiore, così da minimizzare l'effetto degli errori di misura (il segnale misurato risulta più intenso differenziandosi meglio dal rumore di fondo), e quelle per le quali la barriera ha quota di sommità prossima al pelo libero, così da evidenziare maggiormente eventuali comportamenti irregolari del sistema, che per ipotesi sono associati alla discontinuità concettuale che separa le opere emerse da quelle sommerse.

È stato pertanto scelto il test C5-T2, più rispondente ai suddetti criteri e caratterizzato da sommergenza nulla, altezza d'onda incidente sulle barriere $H_s=4,1$ cm (valore di target al largo $=7,5$ cm), periodo di picco $T_p=1,13$ sec e *piling-up* medio di 2 mm circa. La prova ha una durata complessiva di 20 minuti.

Per giudicare la stazionarietà del sistema, sono state studiate nel dominio della frequenza la funzione di trasferimento (rapporto fra co-spettro e spettro di ingresso misurati) e la funzione di coerenza (rapporto fra quadrato del modulo del co-spettro e il prodotto degli spettri); quest'ultima fornisce un indice della linearità del processo: essa risulta tanto più vicina ad 1 quanto più lo sfasamento fra ingresso e uscita a ciascuna frequenza è costante (il rumore nei segnali è un elemento che riduce il valore di coerenza misurata). Le analisi sono state condotte escludendo i primi cinque minuti del test, in modo da avere la certezza di aver raggiunto condizioni di regime della forzante.

La Figura 4 riporta l'andamento di entrambe le funzioni riferite allo stesso intervallo di frequenza. Si osserva innanzitutto che i valori di coerenza prossimi a zero in alcune aree del grafico garantiscono la significatività dei picchi presenti nel grafico.

La coerenza del picco alle frequenze maggiori (circa 0,9 Hz) è dovuta al fatto che le onde sono monodirezionali e investono il misuratore di velocità e di livello con sfasamento costante. Si notano inoltre picchi abbastanza coerenti (a frequenze all'incirca pari a 0,03, 0,17 e 0,33 Hz), interpretabili come la effettiva risposta delle correnti al *piling-up*, che ha una periodicità legata alle onde di gruppo, il cui periodo risulta pari a 3, 6 e 33 sec; il periodo più lungo potrebbe essere interpretato anche come il periodo di risonanza del bacino.

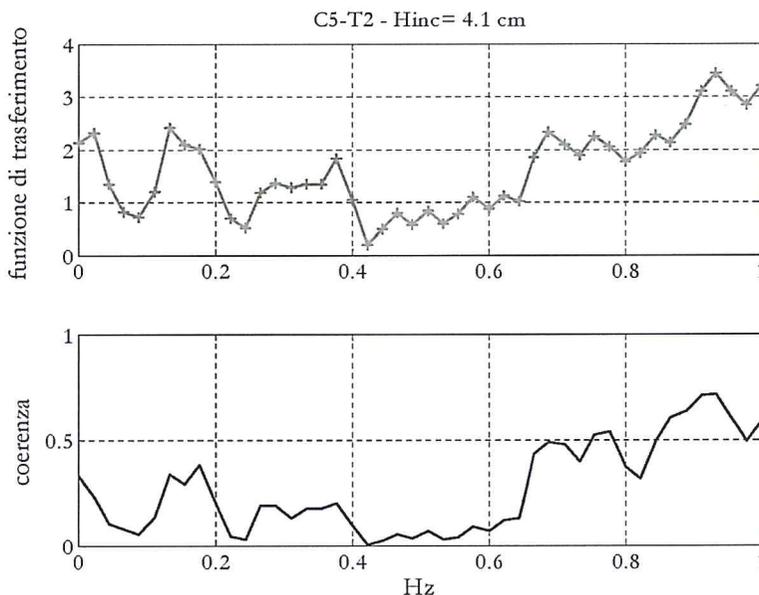


Figura 4 - Funzione di trasferimento fra livelli a tergo della struttura e velocità in uscita dal varco.

È stata successivamente analizzata la funzione di trasferimento nel tempo. L'analisi, che non è riportata per brevità, è sostanzialmente una serie di funzioni di trasferimento (come Fig. 4) relative ad intervalli di tempo diversi. Non sono state riscontrate variazioni della funzione di trasferimento con il gruppo d'onda, probabilmente mascherate dalla variabilità intrinseca al problema e/o dagli errori di misura. Si osserva che è necessario attendere un transitorio di alcuni periodi di oscillazione della forzante prima che il sistema risponda ad essa. Quando ciò avviene, il ritardo di fase presenta una certa sistematicità (la coerenza non è troppo bassa). Le analisi condotte, in definitiva, consentono di apprezzare la risposta impulsiva media del sistema.

La distribuzione verticale della velocità

La complessa geometria delle aree costiere, specie in presenza di opere di protezione, rende complessa la definizione analitica della distribuzione verticale delle velocità delle correnti ai varchi. Risulta pertanto problematica la correlazione di misure di velocità puntuali effettuate in corrispondenza della superficie libera o comunque in punti posti a profondità specifiche, con la portata lungo la verticale indagata. In definitiva, non è possibile valutare a priori se la velocità in superficie è sostanzialmente uguale o apprezzabilmente minore rispetto al valore massimo lungo la verticale, oppure quale sia la velocità in prossimità del fondo. Al fine di valutare la distribuzione locale della velocità, sono state eseguite misure su numerose verticali a diverse profondità.

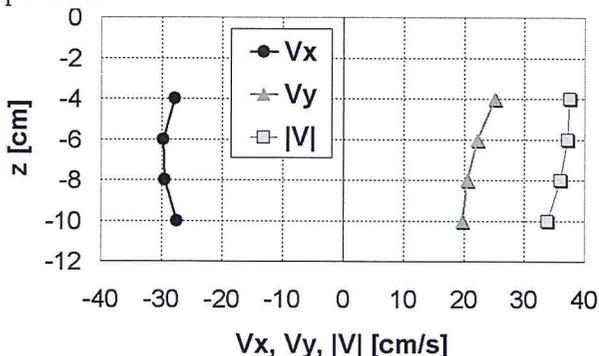


Figura 5 - Profilo verticale del modulo di velocità |V| nel varco n. 3 - Configurazione C1, test T4.

A titolo di esempio, nella Figura 5 è riportato l'andamento delle componenti medie di velocità V_x e V_y lungo la verticale ubicata nella mezzeria del varco n. 3 durante il test T4 della configurazione C1 (Fig. 1-A), nonché i valori del modulo di velocità $|V|$. Si può osservare che l'intensità della corrente decresce verso il fondo, pur con valori non molto discosti fra loro. L'analisi delle componenti V_x e V_y mostra che, procedendo verso il fondo, il vettore velocità subisce una rotazione graduale di $+6^\circ$, mantenendo comunque una direzione sub ortogonale alla congiungente le testate delle barriere contigue.

Un'analisi dettagliata dei dati rilevati, consente di indagare sulla natura delle correnti e sul livello di turbolenza nei diversi punti investigati. A titolo di esempio, nella Figura 6 si riporta un tipico andamento temporale delle velocità istantanee rilevate (componente V_x). A conferma delle considerazioni svolte nel paragrafo precedente, la Figura evidenzia la natura impulsiva delle correnti, correlabile alla forzante che le ha generate. Il segnale può essere ancora trattato utilizzando tecniche già collaudate (Damiani e Mossa, 1997) che consentono di estrapolare i valori delle fluttuazioni di velocità legate al livello di turbolenza e quelli delle componenti di oscillazione legate al periodo proprio del fenomeno, entrambe riportate in Figura.

Ovviamente, la stessa analisi, ripetuta per tutti i punti indagati, consente di indagare sui livelli di turbolenza nelle diverse zone del modello.

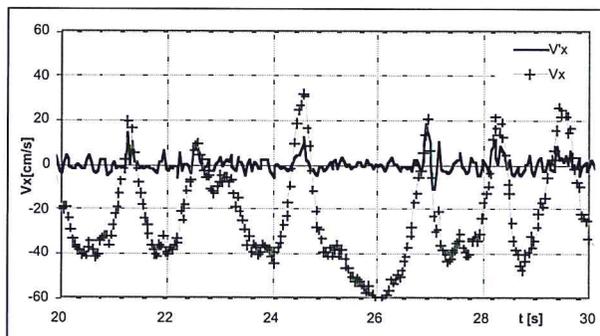


Figura 6 - Esempio di misura della componente V_x e andamento della sua componente turbolenta.

La Figura 7 è relativa alla configurazione C7 durante il test T1; essa illustra i profili dei moduli di velocità media lungo le verticali indagate in corrispondenza del varco n. 1 di Figura 3-B, nonché la direzione media della corrente in ciascun punto di misura.

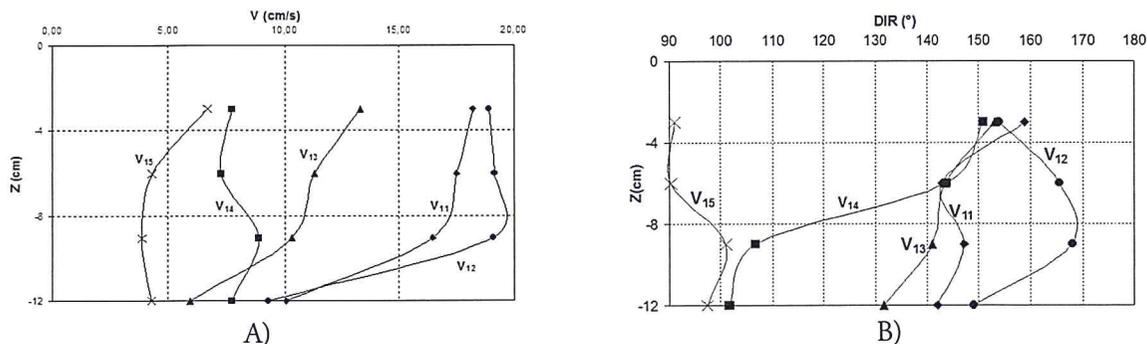


Figura 7 - Profilo verticale dei moduli di velocità e di direzione della corrente, mediati nel tempo, rilevati a diverse quote nel varco varco n.1 della configurazione C7 durante il test T1.

Si osserva che, nella prova presentata, le velocità medie nel tempo risultano tutte dirette verso il largo, cioè in uscita dalla zona protetta attraverso il varco.

In alcuni casi si evidenzia una notevole variazione di velocità lungo le verticali, denotando una non trascurabile influenza dell'attrito al fondo sulle caratteristiche della circolazione. Inoltre, così come già evidenziato in precedenza, si osserva una notevole rotazione delle correnti lungo tutte le verticali indagate. Si deve altresì rilevare che, per le verticali su indicate, la componente V_x assume valori abbastanza elevati, per poi decrescere verso l'esterno del varco, fino a raggiungere valori del tutto trascurabili a breve distanza da esso (verticale V15), dove la velocità assume direzioni essenzialmente longitudinali alla linea di riva. In definitiva, l'intensa corrente in uscita dalla zona protetta (*rip current*), assume una direzione sub ortogonale ai varchi, per poi rallentare decisamente e subire una notevole rotazione subito al largo come evidenziato dalla Figura 7-B.

Per completezza di informazione, si deve sottolineare che i risultati su descritti potrebbero subire l'influenza di una corrente di deriva sempre presente in vasca, nonché dalle particolari condizioni al contorno da assumere per l'interpretazione dei risultati.

Il campo di moto piano indotto da strutture tracimabili

Come più volte ripetuto, la circolazione a tergo delle barriere frangiflutti assume un ruolo essenziale nel definire l'efficacia delle stesse. Ad influenzare il campo di moto contribuisce, oltre all'intensità delle mareggiate incidenti, la geometria delle strutture. Infatti, la circolazione indotta è profondamente differente se si è in presenza di barriere tracimabili o meno. Essa inoltre è influenzata dalla forma e dalle dimensioni dei varchi, ove, come evidenziato in recenti contributi scientifici (Haller, 2002; Cappiotti et al., 2004; Balzano, 2005), si formano correnti estremamente intense dirette verso il largo, che contribuiscono alla formazione di fosse di erosione localizzate e possono causare un serio pericolo per la balneazione.

In tutte le configurazioni analizzate nel presente lavoro, le scogliere sono sormontate dal moto ondosso e la portata che tracima ritorna verso il largo essenzialmente attraverso i varchi, dove sono stati rilevati i valori più alti di velocità. Anche negli esperimenti condotti nella configurazione C2, caratterizzata dal maggiore livello di cresta e da una modesta altezza d'onda, sono stati osservati considerevoli episodi di tracimazione delle onde sopra la barriera, che hanno generato forti correnti di ritorno nei varchi. Il campo vettoriale delle velocità medie nel periodo, con tale configurazione, è riportato in Figura 8. Nonostante la direzione di propagazione del moto ondosso sia ortogonale alla linea di costa, la componente litoranea della velocità in prossimità dei varchi (V_y) è risultata notevole e diretta verso la destra dell'osservatore posto con fronte al mare, con una velocità che ha raggiunto anche i 25 cm/s. Tale circostanza è dovuta alla forma dei varchi che forzano la corrente a ruotare e a disporsi in direzione sub-ortogonale ai varchi stessi.

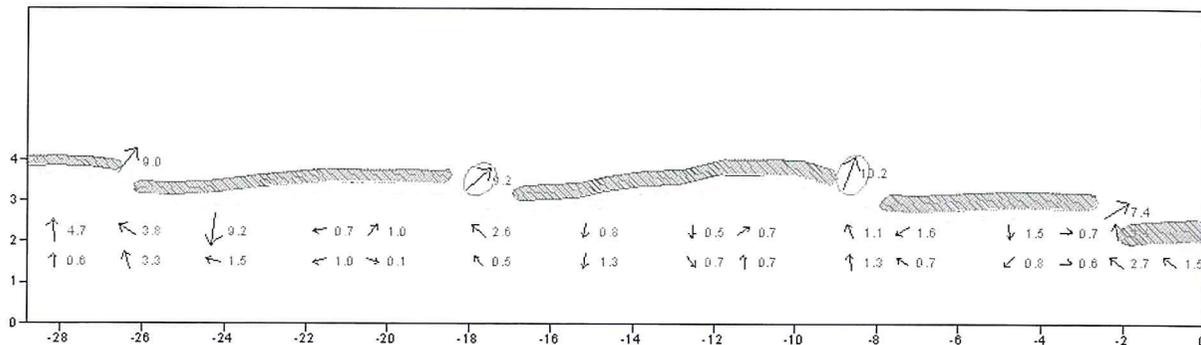


Figura 8 - Piano vettoriale di velocità nella configurazione C2.

Negli esperimenti del test T4 della configurazione C1, con livello di berma minore rispetto alla configurazione precedentemente analizzata e con intensità della mareggiata sensibilmente maggiore, si sono verificate continue tracimazioni di moto ondoso, che hanno generato persistenti correnti di ritorno ai varchi. La componente *cross-shore* della velocità istantanea (V_x) in corrispondenza dei varchi n. 2 e 3 (Fig. 1-A), ha raggiunto valori massimi di circa 27 cm/s. In assoluto, il valore più elevato di V_x è stato rilevato nel punto di mezzeria del varco n. 4 pari a circa 35 cm/s. In questi varchi sono state osservate consistenti fosse di erosione che testimoniano ancora una volta come la formazione dello scavo sia associata a forti correnti che si istaurano nel varco.

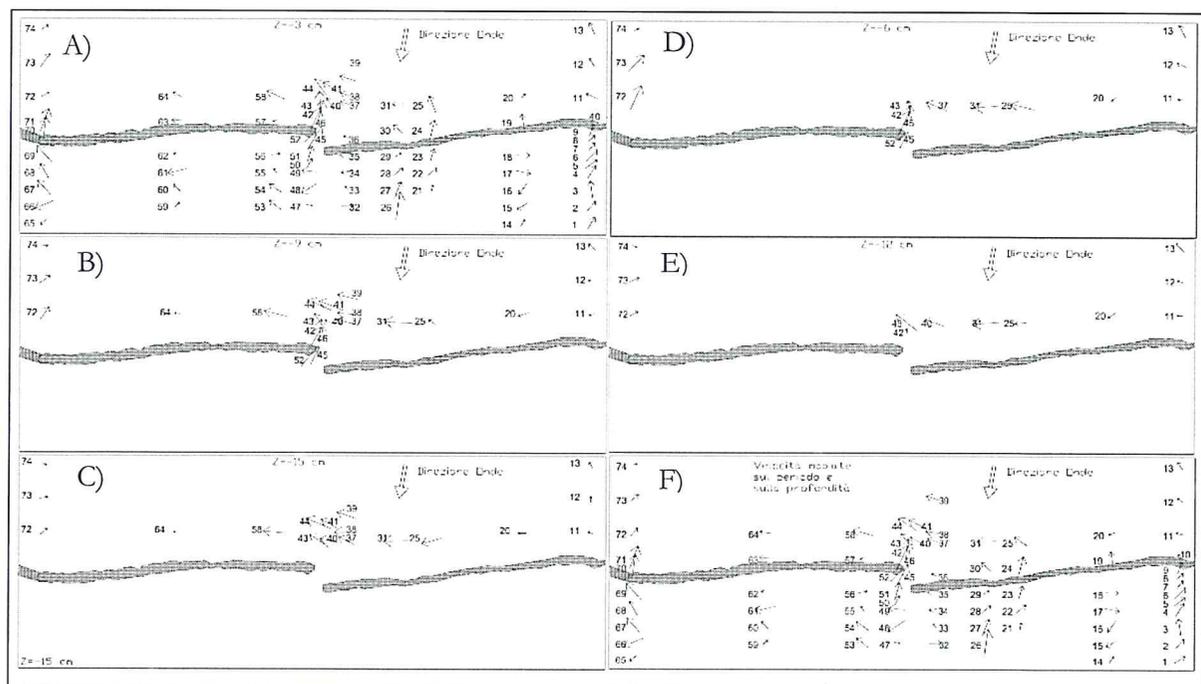


Figura 9 - Risultati degli esperimenti nella configurazione di barriera C3. Campi vettoriali delle velocità mediate nel periodo e misurate su piani di profondità di -3 cm (A), -6 cm (B), -9 cm (C), -12 cm (D), -15 cm (E) e campo vettoriale delle velocità mediate nel periodo e nella verticale (F).

Le misure di velocità effettuate nella configurazione C3 sulle verticali di Figura 2, effettuate a diversi affondamenti, hanno consentito di costruire il campo di velocità medie su piani paralleli posti a diverse profondità (Fig. 9-A, 9-E) distanziati fra loro di 3 cm, oltre che il campo di velocità medio nel periodo e sulla verticale (Fig. 9-F) (Cappietti et al., 2004a).

Si osserva che esternamente alla barriera e lontano dal varco, a conferma di quanto già precedentemente osservato, le direzioni delle velocità si discostano notevolmente dalla normale al varco. In particolare, per tutti gli affondamenti investigati, le velocità sono sempre dirette verso la sinistra di un osservatore con fronte verso il mare. Questa corrente litoranea è indotta dal relativo flusso di quantità di moto, anch'esso diretto verso sinistra e dovuto al moto ondoso incidente con fronte d'onda inclinato di 10° . In prossimità del varco invece, le velocità misurate mostrano, ad ogni profondità, una grossa componente in direzione ortogonale alla costa (Fig. 10); inoltre, la componente litoranea è diretta verso destra a dimostrazione che la corrente di *rip* è così intensa, da vincere il flusso di quantità di moto indotto in direzione opposta dal moto ondoso.

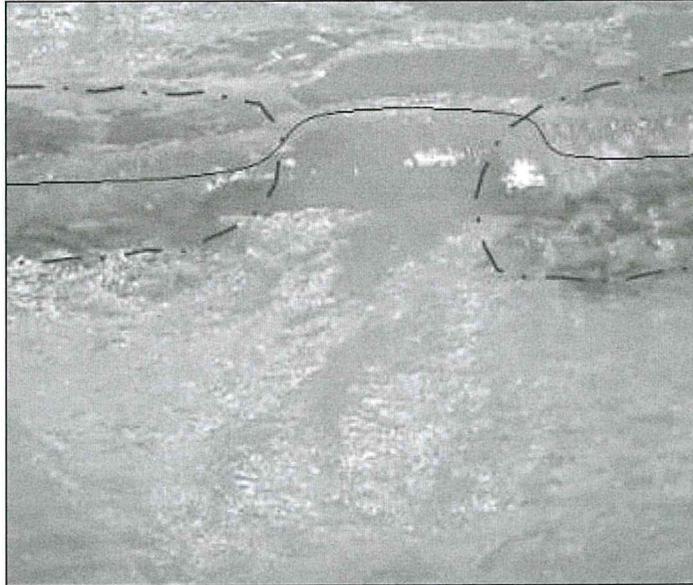


Figura 10 - Fronte d'onda attraverso un varco.

La forte corrente di ritorno che si istaura nel varco, interagisce con il moto ondoso incidente, modificandone apprezzabilmente le caratteristiche (Cappiotti, 2003). Nella fotografia riportata in Figura 10 è evidente l'effetto della corrente avversa al moto ondoso, che induce un rallentamento locale dei fronti d'onda e la focalizzazione dei raggi d'onda verso il varco, con un conseguente incremento dell'altezza. È ragionevole che questi effetti, risultanti dall'interazione onda-corrente, contribuiscano ad incrementare i processi erosivi localizzati rispetto alla sola presenza della corrente (Cappiotti et al., 2004).

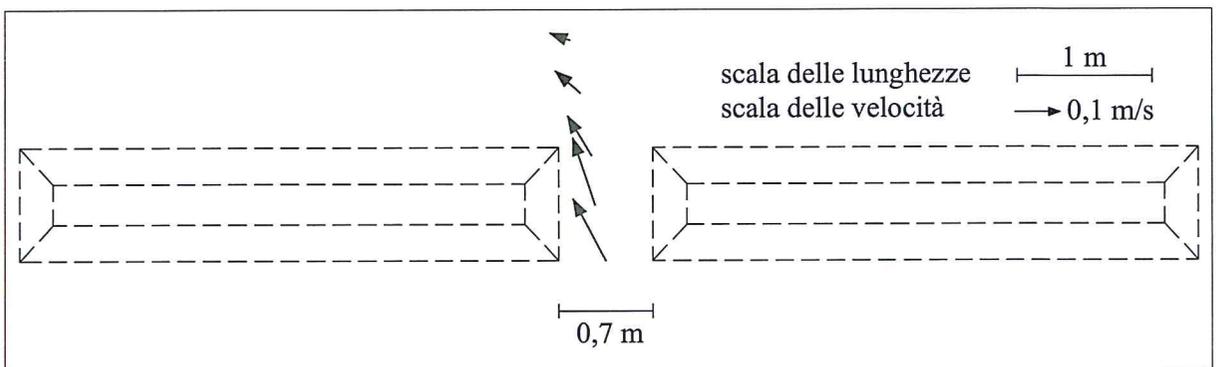


Figura 11 - Campo vettoriale della velocità di corrente, mediata nel tempo e sulla verticale, ottenuta dalle misure nel varco n. 1 durante il test C7-T1.

La formazione di una intensa corrente di ritorno ai varchi è testimoniata anche dai risultati ottenuti nel test T1 sulla configurazione C7 mostrati in Figura 11, dove sono rappresentati vettorialmente i dati correntometrici mediati nel tempo e sulle diverse verticali in corrispondenza del varco n.1. La Figura evidenzia ancora una volta la decisa rotazione della corrente in uscita dai varchi e la notevole riduzione della sua velocità.

Nella stessa configurazione C7 (oltre che nella C8), durante tutti gli attacchi ondosi generati, sono stati filmati i percorsi di sferette galleggianti, appositamente rilasciate in acqua per essere utilizzate come traccianti passivi del campo di correnti superficiale (Kennedy e Thomas, 2004).

Nella Figura 12 sono riportate le elaborazioni ottenute dai filmati, che hanno permesso di ricostruire l'evoluzione delle traiettorie dei traccianti (Lorenzoni et al., 2003) durante il test T1, sia in un varco ristretto della configurazione C7 che nella configurazione di scogliera sommersa isolata (C8). Da una prima analisi visiva, risultano chiaramente visibili e descritti i moti della circolazione idrodinamica generale, caratterizzati dagli intensi e concentrati flussi uscenti dai varchi della configurazione C7 e dagli ampi vortici attorno alla testata della struttura isolata (C8). In quest'ultimo caso, le traiettorie risultano disperdersi più a raggiera rispetto alla configurazione C7. Ad una analisi più approfondita e dettagliata delle traiettorie percorse dai traccianti, risultano riconoscibili anche ulteriori vortici di dimensioni minori, legati ad effetti di circolazione locale. Nella prima delle due configurazioni analizzate, essi si sovrappongono ai vortici di dimensioni maggiori prodotti dalla circolazione generale, intensificandone l'azione di trasporto di massa diretto verso il largo.

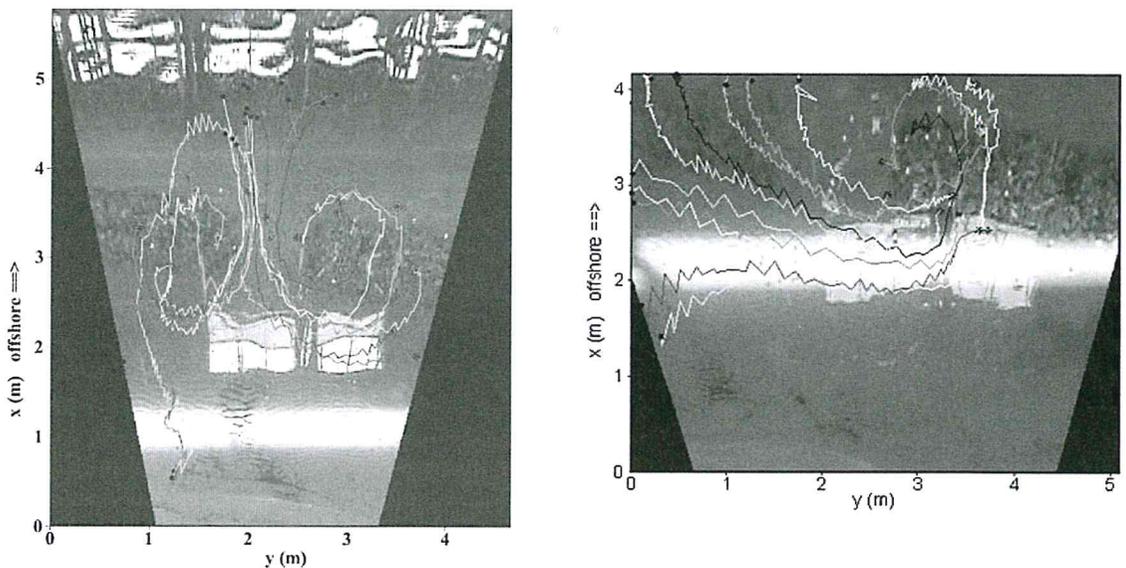


Figura 12 - Ricostruzione in planimetria dell'andamento temporale delle traiettorie dei traccianti galleggianti relative rispettivamente per il varco n. 2 durante la prova C7-T1 ed alla testata della barriera isolata durante la prova C8-T1.

Simulazioni numeriche

Gli esperimenti di laboratorio relativi al test T1, sia per la configurazione C7 che per la C8, sono stati confrontati con simulazioni numeriche effettuate con un modello matematico basato sulle equazioni NLSWE, in cui i valori idrodinamici risultano mediati sulla verticale (Brocchini et al., 2001; Balzano et al., 2005). Nelle simulazioni numeriche esaminate, le pareti di contorno sono state considerate perfettamente assorbenti (*open boundary*), il fondale ed il contorno delle strutture sommerse perfettamente rigidi e impermeabili, con un coefficiente di scabrezza di Chezy pari a 0,01. Nelle simulazioni numeriche sono state riprodotte separatamente due diverse configurazioni planimetriche, relative alle configurazioni C7 e C8, riproducendo le stesse condizioni geometriche delle barriere, con particolare attenzione alla sommergenza della berma e alla profondità del fondale di imbasamento utilizzate nel modello fisico.

Le Figure 13 e 14 mostrano le traiettorie di alcuni traccianti, ottenute dalle simulazioni numeriche rispettivamente per i varchi n. 1 della configurazione C7 e n. 3 della configurazione C8.

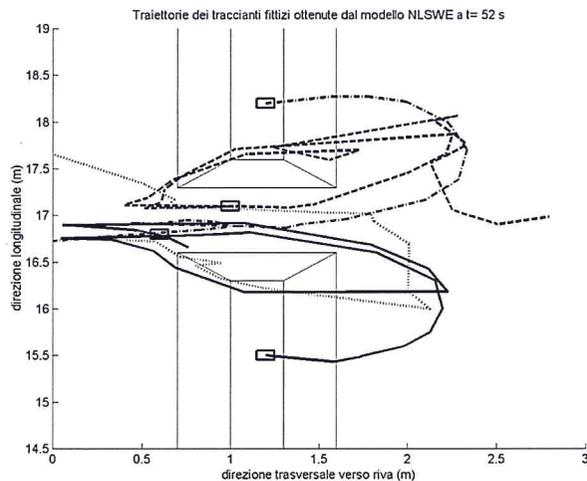


Figura 13 - Grafico delle posizioni iniziali (riquadri) e dell'andamento temporale delle traiettorie di alcuni traccianti passivi ottenute da simulazioni numeriche nel varco n. 1 di configurazione C7.

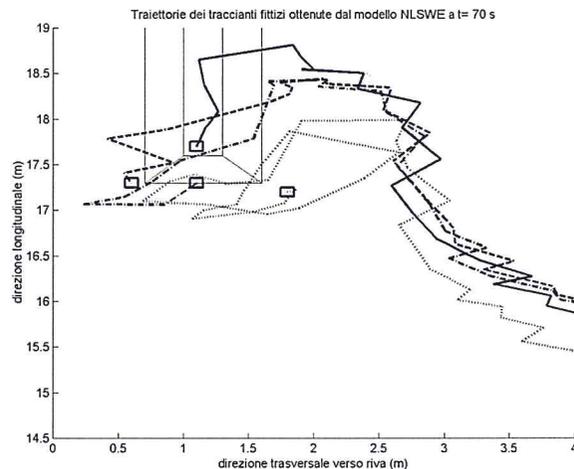


Figura 14 - Grafico delle posizioni iniziali (riquadri) e dell'andamento temporale delle traiettorie di alcuni traccianti passivi ottenute da simulazioni numeriche nel varco n. 3 di configurazione C8.

Dalle Figure risulta che le simulazioni numeriche forniscono un'apprezzabile descrizione qualitativa della circolazione osservata in vasca.

In particolare, i modelli matematici sembrano descrivere chiaramente la circolazione idrodinamica generale, caratterizzata da intense correnti in uscita dai varchi. Nel caso della scogliera isolata, risulta che i traccianti numerici tendono a rimanere confinati nella zona di riva, descrivendo un vortice completo intorno alla testata, piuttosto che disperdersi verso lo specchio di mare intermedio sottoflutto e verso il largo come osservato nel modello fisico.

Nella configurazione C7, inoltre, si possono notare con discreta evidenza, alcuni macrovortici locali che risultano sovrapporsi alla circolazione generale e che intensificano le correnti di ritorno (Brocchini et al., 2002).

Le differenze fra simulazioni numeriche e test di laboratorio possono essere anche attribuite alle differenti condizioni al contorno utilizzate, così come in seguito discusso.

Nella Tabella 4 vengono posti a confronto i valori di velocità media calcolati con il modello numerico basato sulle equazioni NLSWE e quelli misurati e mediati nel tempo e lungo le verticali indicate in Figura 3-B.

Tabella 4 - Confronto tra i valori delle velocità di corrente, trasversale (V_x) e longitudinale (V_y) alla riva, mediate nel tempo e sulla verticale, ottenuti dalle simulazioni numeriche e misurati nel modello fisico durante il test T1 (configurazioni C7 e C8).

Attacco ondoso T1 (H=5cm al largo, H=4.7cm alla profondità h=0.182 m)				
N° ADV	V_x - NLSWE [cm/s]	V_x - ADV [cm/s]	V_y - NLSWE [cm/s]	V_y - ADV [cm/s]
V11	-22	-15	0	-8
V12	-18	-17	0	-6
V13	-20	-10	0	6
V14	-12	-5	-1	-6
V15	-3	-2	-1	-5
V21	-23	-12	1	-4
V22	-21	-15	-1	-3
V23	-19	-16	-4	-3
V35	-12	-3	-1	-5
V36	-17	-6	-5	-7
V37	-5	-6	-17	-8
V38	-2	-5	-11	-8
V39	8	-1	-9	-3

Nella Figura 15 viene riportato il confronto grafico tra i valori della velocità ottenuti lungo il varco n.1 sia nel caso delle misure nel modello fisico che nelle corrispondenti simulazioni numeriche.

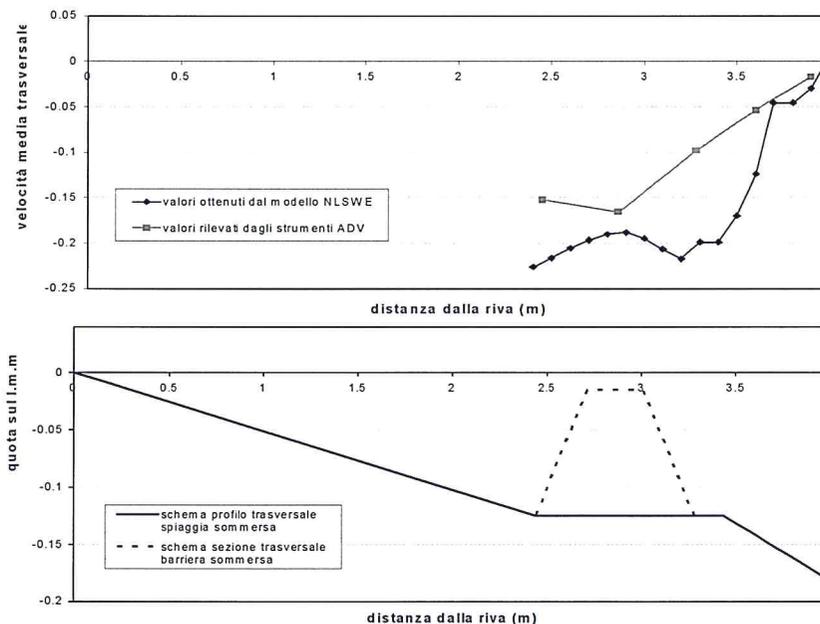


Figura 15 - Confronto tra le velocità di corrente trasversale misurate sul modello fisico e mediate nel tempo e sulla verticale e quelli ottenuti dalle simulazioni con il modello numerico NLSWE, lungo il varco n. 1 durante il test C7-T1.

Da una prima analisi dei risultati, si osserva che il modello numerico NLSWE sembra sovrastimare globalmente i valori correntometrici rilevati. Come già detto, tale differenza può essere attribuita alle particolari condizioni al contorno assunte. Infatti, nel modello numerico il fondale e le strutture sono schematizzate con superfici rigide, impermeabili e con un unico valore delle scabrezze. È quindi possibile ipotizzare che nelle simulazioni numeriche ven-

gano sottostimate le dissipazioni per attrito al fondo (e sulle strutture), che hanno una fondamentale influenza sulla intensità e sulle caratteristiche della circolazione idrodinamica nella regione costiera come quella considerata.

Si noti inoltre che le condizioni al contorno di pareti assorbenti adottate nelle simulazioni numeriche, sembrano essere le più idonee per riprodurre i fenomeni indagati, sebbene nel modello fisico le guide laterali siano costituite da lastre metalliche verticali altamente riflettenti. Si ritiene comunque che l'effetto di tale discrepanza risulti meno influente delle diverse condizioni assunte per l'attrito al fondo, sia per le condizioni di prova adottate in vasca (fron- te d'onda perpendicolare alle guide) che per l'ubicazione delle stazioni di misura (piuttosto distanti dalle guide).

Un altro possibile approccio matematico per la descrizione della circolazione idrodinamica intorno a strutture tracimabili, è fornito da modelli del tipo *phase averaged* (Balzano et al., 2005). Nel seguito si riportano i risultati di simulazioni numeriche di questo tipo, condotte per il test T4 della configurazione C4. E' stata scelta una barriera sommersa, poiché il modello numerico utilizzato non permette di simulare la complessa successione di tracimazioni che avvengono nel periodo dell'onda sopra strutture emerse; inoltre, le condizioni ondose utilizzate nella simulazione risultano sufficientemente intense da massimizzare il rapporto segnale-rumore presente nei dati sperimentali.

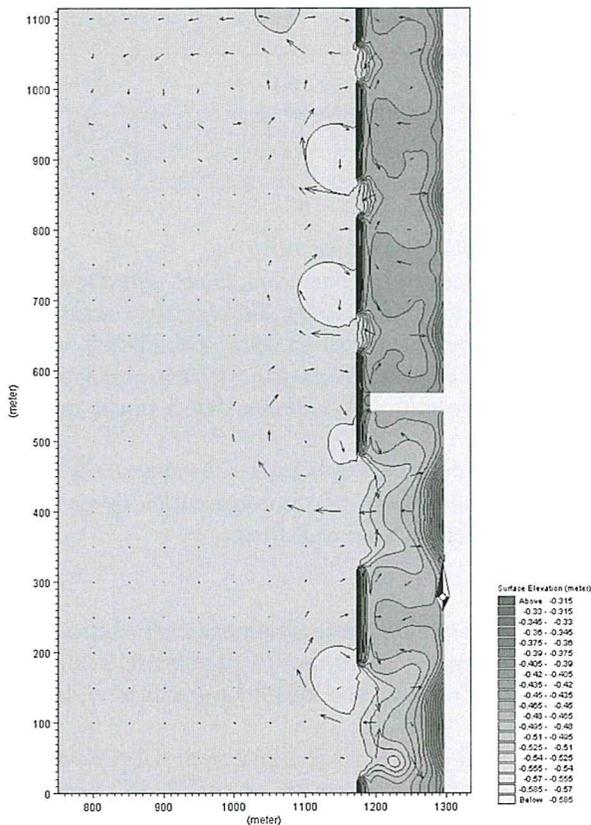


Figura 16-A - Batimetria e indicazione vettoriale delle direzioni e velocità delle correnti durante il test C4-T4.

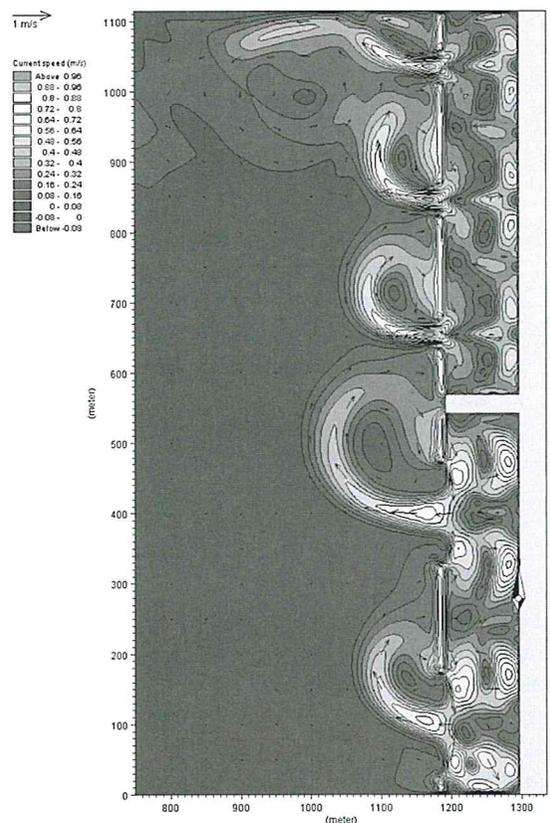


Figura 16-B - Intensità delle correnti con indicazione vettoriale delle loro direzioni durante il test C4-T4.

La simulazione è stata condotta sulla batimetria di progetto scalata a dimensioni di prototipo (1:40), poiché il modulo d'onda commerciale utilizzato (MIKE 21 PMS, *Parabolic Mild Slope*) non permette simulazioni di moti ondosi su fondali minori di 5 cm. La batimetria adottata ha una maglia di 4 m x 4 m, in modo da rappresentare la barriera con tre punti di calcolo, al minimo della accuratezza per non allungare eccessivamente i tempi di calcolo. I risultati del modulo idrodinamico commerciale (MIKE 21 HD) riportati nelle Figure 16-A e 16-B evidenziano, rispettivamente, la distribuzione dei livelli e delle velocità con isolinee e scala di colore. La direzione e l'intensità della corrente è rappresentata in entrambe le figure tramite vettori.

I risultati della simulazione numerica sono confrontati in Tabella 5 con i valori di onda e corrente misurati e scalati in similitudine di Froude. I valori numerici di altezza d'onda e velocità della corrente sono in buon accordo con i valori sperimentali, mentre il *set-up* in modello è maggiore.

Tabella 5 - Confronto fra simulazione numerica e valori misurati, in scala di prototipo.

TEST tipo C4 T4		Modello Fisico [scala di prototipo, 1:40]			Simulazione numerica		
		Varchi stretti non protetti	Varchi stretti protetti	Struttura isolata	Varchi stretti non protetti	Varchi stretti protetti	Struttura isolata
Altezza d'onda al largo	[m]	2,24			2,25		
Onda incidente	[m]	1,97			1,97		
Onda trasmessa	[m]	0,98		1,04	0,89		0,89
Onda al varco	[m]		1,58	2,32	1,89	1,8	1,78
<i>Piling up</i>	[m]	0,05+0,015		0,005+ <i>setdown</i>	0,1		0,05
Velocità al varco	[m/sec]	-0,9	-0,88		-0,91	-0,87	-0,54
Velocità alle testate	[m/sec]			-0,14	-0,61	-0,61	-0,49

Nella valutazione complessiva del confronto occorre tenere conto dei seguenti fattori:

- le misure di corrente sono state eseguite in punti precisi e potrebbero non essere pienamente rappresentative della velocità media (in particolare la misura della velocità in prossimità della testata della barriera isolata);
- i valori di *piling-up* sono molto piccoli in rapporto all'altezza d'onda e soggetti ad errori di calibrazione. Per un confronto fra i valori misurati di *piling-up* ed i valori numerici, è inoltre necessario incrementare il *piling-up* dentro alle barriere con il *set-down* esterno alle barriere, valutato solo dietro alle barriere a varchi stretti e pari al 30% del *piling-up* (0,015 m);
- i risultati numerici sono inficiati dalla mancata rappresentazione della permeabilità e riflessione della struttura e della spiaggia. Inoltre, la calibrazione del modello idrodinamico che meglio riproduce il *piling-up* misurato non è stata impiegata perché comporta valori non realistici della scabrezza al fondo.

Conclusioni

Le esperienze effettuate su modello fisico in vasca, nonostante le inevitabili distorsioni legate all'effetto scala, rappresentano con sufficiente accuratezza i fenomeni che si osservano in prototipo. In particolare, le simulazioni illustrate nel presente lavoro hanno consentito di analizzare la circolazione idrodinamica indotta dall'interazione fra onde e barriere sommerse.

Il campo delle correnti, pur se generato da onde stazionarie, ha cicli di ripetizione dipendenti dal periodo del gruppo d'onda e, in maniera non dissimile dai modelli *phase-dependant*, è necessario attendere un transitorio di qualche periodo di oscillazione della forzante prima che il sistema risponda ad essa con un sistematico ritardo di fase.

In tutte le configurazioni analizzate, sono state evidenziate le intense correnti attraverso i varchi fra barriere contigue, prevalentemente dirette verso il largo, con direzione subortogonale ai varchi stessi. Le suddette correnti tendono a smorzarsi rapidamente subito al largo della barriera ed a ruotare, disponendosi subparallelamente alle scogliere. Ovviamente, a parità di moto ondosso incidente, una intensità maggiore della corrente si verifica in corrispondenza dei varchi più stretti, laddove il meccanismo di mutua interazione dei vortici risulta ovviamente più confinato.

Le prime simulazioni numeriche effettuate, hanno in genere mostrato un buon accordo con i risultati sperimentali da un punto di vista qualitativo, seppur con scostamenti, a volte consistenti, dal punto di vista quantitativo, legati essenzialmente alle condizioni al contorno adottate.

Ringraziamenti

La ricerca e le prove in canale descritte nel presente articolo sono state finanziate dal MIUR, nell'ambito del progetto PRIN 2001 "Idrodinamica e morfodinamica di spiagge protette da opere tracicabili" Prot. 2001082247. Si ringrazia Barbara Zanuttigh per le simulazioni numeriche eseguite con il MIKE 21 ed il confronto con i dati sperimentali e Luciano Soldini e Patrizia Carbonari per le simulazioni numeriche eseguite con il codice NLSWE ed il confronto con i dati sperimentali.

Bibliografia

- Aminti P.L. e Cappietti L. (2003) - *Sea Bottom Scour Near Gaps in Coastal Protection Structures*. Atti MedCoast 03 International Conference, 7-11 October, Ravenna, Italy.
- Aminti P.L., Clementi E., Lorenzoni C., Martinelli L. e Zanuttigh B. (2005) - *Esperimenti di laboratorio ed osservazioni di campo sulle modifiche indotte al fondo da opere tracicabili*, Studi costieri, n. 9.
- Archetti R., M. Tirindelli e A. Lamberti (2003) - *Field measurements of hydrodynamics around a beach defense system*. Proc. Coastal Structures 2003 ASCE.
- Balzano A., Cappietti L., Soldini L. e Zanuttigh B. (2005) - *Modellazione numerica della circolazione attorno ad opere tracicabili*. Studi costieri, numero speciale sulle strutture tracicabili.
- Battjes J. A. and Janssen J. P.F.M. (1978) - *Energy loss and set-up due to breaking of random waves*. Proc. Coastal Eng., New York, 16, ASCE ed.: 569-587.
- Briganti R., Soldati M., Contini P., Sidoti C., Franco L., Lamberti A. e Archetti R. (2002) - *Inventario delle opere di protezione costiera semisommerse parallele a costa, presenti in Italia*. Atti XXVIII Conv. Idraulica e Costruzioni Idrauliche, 4: 235-242.
- Brocchini M., Bernetti R., Mancinelli A. e Albertini G. (2001) - *An efficient solver for nearshore flows based on the WAF method*. Coastal Engineering., 43: 105-129.
- Brocchini M., Mancinelli A., Soldini L. e Bernetti R. (2002) - *Structure-generated macrovortices and their evolution in very shallow depths*. Proceedings of the 28th I.C.C.E., ASCE 1: 772-783.
- Calabrese M., Vicinanza D. e Buccino M. (2003) - *Low-crested and submerged breakwaters in presence of broken waves*. Atti Hydralab II, 8-1/23, Budapest, 22-23 maggio.
- Cappietti L. (2003) - *Laboratory Experiments on the Hydrodynamics of Waves on Adverse Currents*. Proc. Coastal Engineering 2003 - Sixth International Conference on Computer Modelling and Experimental Measurements of Seas and Coastal Regions, 23 - 25 June 2003 Cadiz, Spain.
- Cappietti L., Pratola L. e Rinaldi A. (2004a) - *Esperimenti sull'idrodinamica indotta da moto ondoso in presenza di barriere sommerse separate da un varco. Risultati preliminari*. Atti del XXIX Convegno di idraulica e Costruzioni idrauliche, Trento: 535-540.
- Cappietti L., Martinelli L. e Zanuttigh B. (2004b) - *Experimental analysis of piling-up and filtration in presence of low crested structures*. Atti del XXIX Convegno di idraulica e Costruzioni Idrauliche, Trento: 713-720.
- Chiaia G., Damiani L. e Petrillo A. (1992) - *Evolution of a beach with and without a submerged breakwater: Experimental investigation*. 23rd ICCE., Venezia, October 1992.
- Damiani L., A. F. Petrillo e G. Ranieri (2002) - *Il Laboratorio Di Ricerca e Sperimentazione per la Difesa Delle Coste - Politecnico Di Bari*. Studi Costieri, Vol. 5: 107-134.
- Damiani L. e M. Mossa (1997) - *Experimental Study on the Estimation Methods of Wave Orbital Velocity*. ISOPE '97, Honolulu, May 1997.
- Dean R. G., Chen R. e Browder A. E. (1997) - *Full scale monitoring study of a submerged breakwater, Palm Beach, Florida, US*. Coastal Engineering, 29 (3-4), 1997: 291-315.
- Dronen N., Karunarathna H., Fredsoe J., Sumer B.M. e Deigaard R. (2002) - *An experimental study of rip channel flow*. Coastal Engineering, Elsevier, 45: 223-238
- Haller C. H. (2002) - *Experimental study of nearshore dynamics on a barred beach with rip channels*. J. Geophys. Res., Vol. 107, N° C6.
- Kennedy A.B. e Thomas D.A. (2004) - *Drifter Measurements in a Laboratory Rip Current*. J. Geophys. Res. - Oceans, 109 (C8), doi:10.1029/2003JC001982.
- Lamberti A. e Tomasicchio U. (1981) - *Le barriere sommerse, possibili strutture a difesa della costa*. Porti, Mare e Territorio, Giuffrè Editore, Milano, anno III, n. 1, gennaio-marzo.

- Lorenzoni C., Soldini L., Mancinelli A., Piattella A. e Brocchini M. (2003) - *Macrovortici generati da barriere sommerse. Analisi fisica e numerica*. Atti della 2^a edizione delle Giornate di studio su "La difesa idraulica del territorio 2003" (D.I.T. 2003), Trieste, 10-12 settembre 2003.
- Lorenzoni C., Soldini L., Mancinelli A., Piattella A. e Brocchini M. (2004) - *La circolazione idrodinamica in presenza di barriere sommerse: un'analisi sperimentale*. Atti del 29° Convegno Nazionale di Idraulica e Costruzioni Idrauliche, Trento, 7-10 settembre 2004, Editoriale Bios, Volume 3: 573-580.
- Mancinelli A., Aminti P.L., Archetti R., Atzeni A., Canu V., Cappiotti L., Lorenzoni C. e Zanuttigh B. (2005) - *Opere di difesa realizzate con strutture sommerse ed a cresta bassa ad Alghero (SS), Perde Sali (CA), Marina di Massa (MS), Marina di Pisa (PI), Porto Recanati (MC), Marina di Montemarignano (AN), Lido di Dante (RA) e Pellestrina (VE)*. Studi costieri, n. 9.
- Martinelli L. (2003) - *Modello fisico presso il LIC di Bari dal 24 Marzo al 17 Aprile*. Progetto Cofin2001, Prot. 2001082247 "Idrodinamica e morfodinamica di spiagge protette da opere tracimabili", Report interno, Bologna, 35 pp.+2 Allegati.
- Mory M. e Hamm L. (1997) - *Wave height, setup and currents around a detached breakwater submitted to regular or random wave forcing*. Coastal Engineering, Elsevier, 31: 77-96.
- Petrillo A. F. (2002) - *Esecuzione della sperimentazione su modello fisico tridimensionale delle opere per la protezione del litorale di Marina di Pisa*. Rapporto finale.
- Ranieri G. (2000) - *La misura della velocità di caduta media di sedimenti naturali*. IDRA 2000 – XXVII Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche, Genova.
- Ranieri G. (2002) - *Una legge di distorsione per la correzione dell'effetto scala nei modelli fisici costieri*. 28° Convegno di Idraulica e Costruzioni idrauliche, Potenza.
- Ruol P., Martinelli L., Zanuttigh B., Cappiotti L., Vicinanza D. e Faedo A. (2005) - *Sui fenomeni di tracimazione, filtrazione e piling up per opere di difesa a cresta bassa*. Studi costieri, n. 9.

Manoscritto ricevuto il 25/06/2005, accettato il 15/10/2005.