

## Verifica sperimentale di strutture per la protezione al piede di un intervento di ripascimento

Michele Di Natale, Stefania Di Ronza, Caterina Eramo e Roberto Greco

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

### Riassunto

Nella presente memoria sono riportati i risultati dell'indagine sperimentale effettuata presso la vasca fornita di sistema ondogeno sita nel laboratorio della Seconda Università degli Studi di Napoli (SUN) a supporto delle soluzioni tecniche individuate per la protezione del ripascimento artificiale della spiaggia di Maronti nel Comune di Barano d'Ischia (NA). In particolare l'intervento di difesa della baia prevede la realizzazione di un ripascimento morbido protetto da un sistema di due scogliere sommerse distaccate e discontinue. Sono previste inoltre tre piattaforme in massi naturali, una posta a protezione del fondale in corrispondenza del varco centrale tra le barriere, le altre in prossimità delle testate più esterne.

Lo studio sperimentale condotto è stato finalizzato alla valutazione della stabilità del manufatto, dell'intensità della circolazione idrica a tergo delle opere e della stabilità del ripascimento in sabbia. I risultati ottenuti hanno mostrato che il sistema di difesa di scogliere risulta efficace ai fini della protezione del ripascimento, presentando quest'ultimo un grado di danneggiamento di modesta entità.

**Parole chiave:** ripascimento, scogliere sommerse, coefficiente di trasmissione, grado di danneggiamento, componente orizzontale e verticale di velocità.

### Abstract

*This report describes the results of the survey carried out in a wave basin situated in the laboratory of the Second University of Naples, in order to support the technical solutions found to protect the artificial nourishment of the "Maronti" beach located in the Municipality of Barano d'Ischia (NA). The bay protection foresees the realization of a soft nourishment project protected by a system composed of two separated and discontinuous submerged breakwaters. Furthermore, three platforms made of natural stone blocks have been planned, one placed to protect the sea-bottom, situated in the middle of the barriers, and the others close to the most external heads.*

*The aim of this experimental survey consists of assessing the stability of the construction, the water circulation over the works and stability of the sandy nourishment project. The results obtained proved that the breakwaters protection system turns to be efficient in protecting the nourishment, thus being characterized by a low level of damage.*

**Keywords:** nourishment, submerged breakwaters, transmission coefficient, damage level, horizontal and vertical velocity component.

## Introduzione

L'intervento di difesa della baia dei Maronti, nell'isola di Ischia, prevede la realizzazione di un ripascimento morbido protetto da un sistema di due scogliere sommerse distaccate e discontinue ubicate su fondali di 6 m (Piattella e Mancinelli, 2006). Dette scogliere hanno una lunghezza di 300 m ciascuna e sono costituite da un nucleo in massi naturali del peso di 1-3 t rivestito con due strati, sempre in massi naturali, da 3-5 t. Il livello di sommergenza è pari a 2.50 m. Sono previste inoltre tre piattaforme in massi naturali, ciascuna di lunghezza pari a circa 100 m, con livello di sommergenza di 3.65 m, una posta a protezione del fondale in corrispondenza del varco centrale tra le barriere, le altre in prossimità delle testate più esterne (Fig. 1).

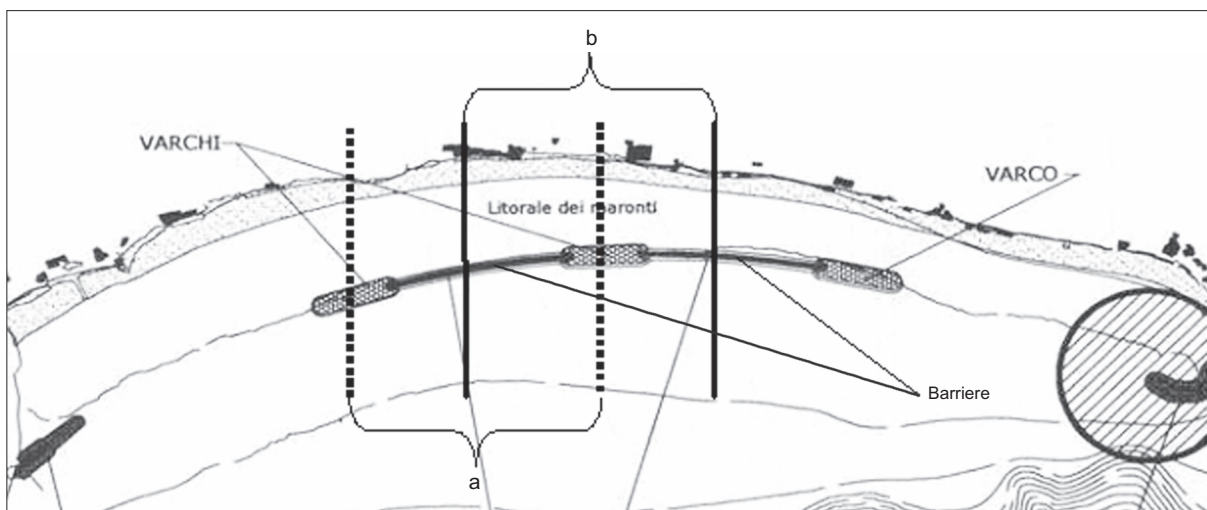


Figura 1 - Parti delle opere di difesa realizzate: (a) modello 1; (b) modello 2.

Con riferimento alle suddette opere, si è reso necessario effettuare una integrazione delle indagini a supporto delle soluzioni tecniche individuate, mediante la realizzazione di prove sperimentali su modello fisico tridimensionale. In particolare lo studio sperimentale è stato finalizzato all'esame dei seguenti aspetti:

- valutazione della stabilità del manufatto;
- valutazione dell'intensità della circolazione idrica a tergo delle opere;
- valutazione della stabilità del ripascimento in sabbia.

Nella presente memoria si riportano i risultati della su indicata indagine sperimentale ottenuti utilizzando la vasca del laboratorio di Idraulica della Seconda Università di Napoli (SUN). Il comportamento del sistema di difesa è stato studiato attraverso la realizzazione di due modelli in scala in similitudine di Froude. Le condizioni ondose assunte per le prove eseguite sono rappresentate da un'onda morfologica, definita come l'altezza d'onda cui corrisponde un flusso di energia annuo pari a quello risultante dalle varie direzioni di provenienza delle onde, e da un'onda di progetto, di altezza pari all'onda frangente sul fondale su cui verrà realizzata l'opera. I risultati dell'indagine sperimentale hanno evidenziato che il fattore di trasmissione dell'altezza d'onda di modellamento si attesta su valori più elevati rispetto a quelli riscontrati per l'onda di mareggiata. Per quanto concerne la stabilità del manufatto il grado di danneggiamento ad opera dell'onda di progetto è risultato di modesta entità. Le velocità residue a tergo del sistema di scogliere per entrambe le condizioni ondose sono contenute in limiti accettabili; il contributo alla circolazione idrica dovuto all'escursione dell'onda di marea è stato trascurato visto il valore dell'ampiezza troppo modesta, situazione tipica di molti paraggi delle coste italiane. La perdita di materiale in prossimità della linea di riva sembra rimanere contenuta all'interno del sistema di scogliere sommerse.

### Installazione sperimentale

La vasca fornita di sistema ondogeno disponibile presso la SUN (Fig. 2), ha dimensioni in pianta pari a 15.70 m x 12.45 m, ed è profonda 1m, con un fondo a pendenza costante (1:20) per un tratto di lunghezza pari a 10 m. Pendenze del fondo diverse dal valore di 1:20 possono essere realizzate modellando opportunamente lo spessore dello strato di sabbia che ricopre il fondo della vasca.

La generazione del moto ondoso 2-3D avviene mediante l'impiego di 30 battitori a pale del tipo a pistone; il sistema di generazione è dotato di assorbimento attivo della riflessione al battitore, implementato presso l'Hydraulics and Coastal Engineering Laboratory dell'Università di Aalborg (Frigaard e Christensen, 1994; Frigaard e Brorsen, 1995) ed opportunamente adattato alla suddetta vasca (Di Natale et al., 2004). Per la misura dinamica dei livelli idrici, la vasca è attrezzata con un sistema di sensori costituito da 20 sonde resistive mobili. La misura delle componenti di velocità media temporale è stata effettuata mediante un velocimetro 3D ad ultrasuoni (Acoustic Doppler Velocimeter - ADV) della Nortek, con frequenza di acquisizione pari a 25Hz. Il rilievo della batimetria, necessario alla valutazione delle variazioni morfodinamiche del fondale, è stato effettuato con uno scandaglio manuale.

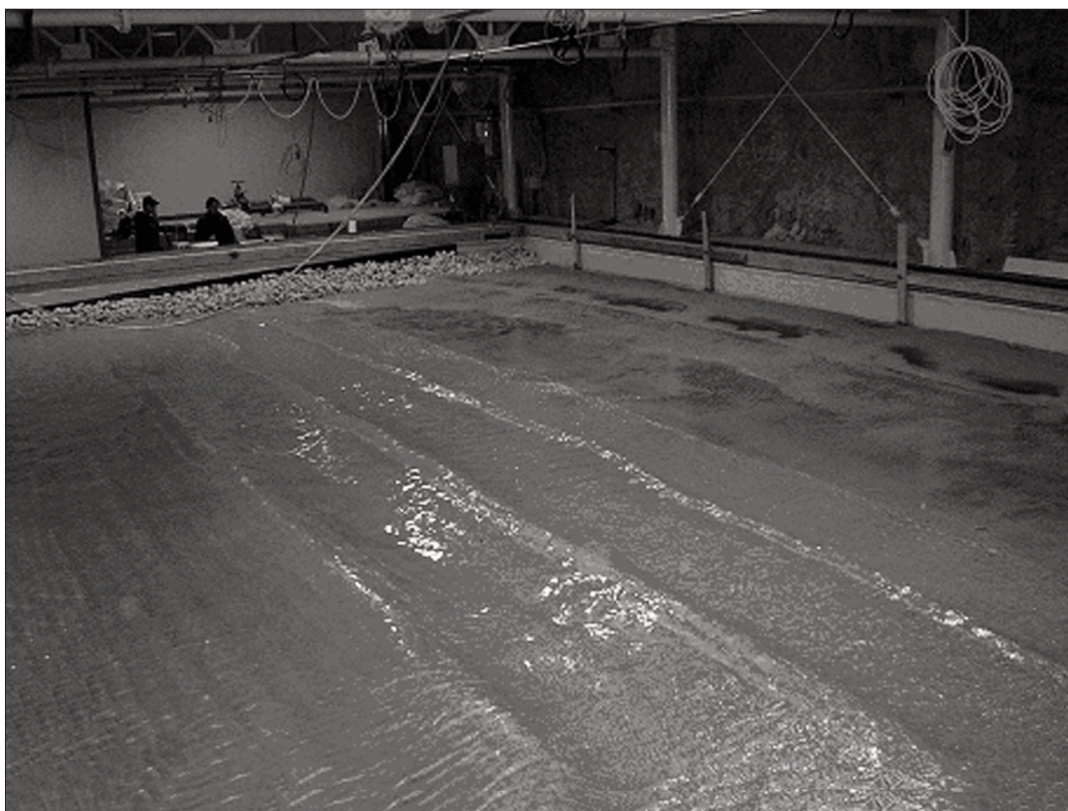


Figura 2 - Vasca ondogeno tridimensionale.

### Programma delle prove

#### *Realizzazione del modello fisico*

A causa del notevole sviluppo lineare dell'opera (circa 900 m), il suo comportamento è stato studiato attraverso la realizzazione di due modelli in scala 1:50 in similitudine di Froude (Hughes, 1993), indicati nel seguito come modello 1 e modello 2 (Fig. 1 e Fig. 3). In tal modo è stato possibile minimizzare le interferenze idrauliche dovute alle pareti laterali della vasca.

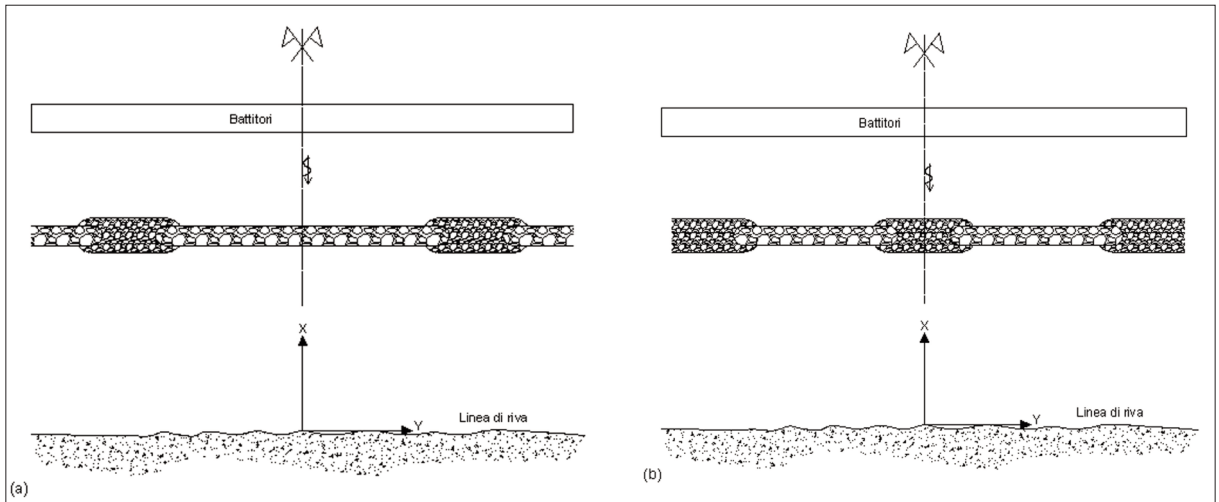


Figura 3 - Schema delle due configurazioni di modello: a) modello1; b) modello 2.

Nel modello 1, la scogliera è posizionata ortogonalmente all'asse di simmetria della vasca (Fig. 3a), mentre nel modello 2 il varco è posizionato a cavallo del suddetto asse di simmetria (Fig. 3b). Sulla base della schematizzazione fatta, il modello 1 risulta essere adatto a rappresentare le condizioni idrodinamiche che si stabiliscono a tergo di una scogliera sommersa; il modello 2, invece, permette di indagare le condizioni a tergo di un varco (Piattola e Mancinelli, 2006).

Il modello delle scogliere è stato realizzato con pietre calcaree a spigoli vivi, di dimensioni e peso determinate in base al rapporto di scala 1:50. Il peso degli elementi lapidei utilizzati per la realizzazione del modello è risultato compreso tra 8 g e 24 g, per quanto riguarda il nucleo della struttura e le protezioni al fondo nei varchi, tra 24 g e 40 g per la mantellata. La Figura 4 riporta lo schema delle sezioni realizzate nel modello per la scogliera e per la protezione dei varchi.

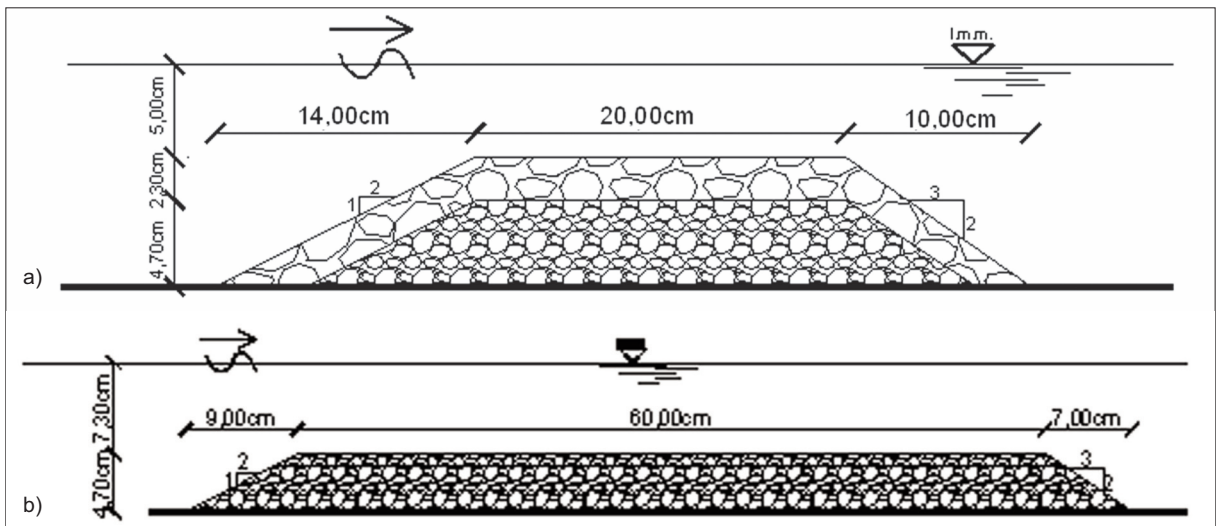


Figura 4 - Schema delle sezioni realizzate nel modello: a) scogliera sommersa; b) protezione del fondo dei varchi.

Per quanto riguarda la modellazione del ripascimento, è opportuno rilevare che, come è noto, lo studio su modello dell'evoluzione della morfobatimetria di un ripascimento artificiale rappresenta un problema molto complesso a causa dell'impossibilità di una perfetta scalatura dei sedimenti costituenti il ripascimento stesso (Kamphuis, 1972a; 1972b; 1975).

Inoltre, a causa della non linearità delle relazioni che, in regime turbolento, legano gli sforzi al fondo, responsabili della movimentazione dei sedimenti, alle caratteristiche del campo di moto, i risultati delle prove sperimentali sull'evoluzione della morfobatimetria possono essere interpretati solo in senso qualitativo; in particolare l'assetto assunto dalla batimetria in seguito all'azione ondosa può essere considerato rappresentativo della realtà, ma non è possibile trarre conclusioni attendibili riguardo agli aspetti dinamici del fenomeno di modellamento del fondale (portate solide, rapidità di erosione e/o sedimentazione, tempi di raggiungimento delle condizioni di equilibrio dinamico, pendenza di equilibrio ecc...). Ciò premesso, il ripascimento oggetto di studio sarà realizzato con sabbia di granulometria piuttosto uniforme, compresa tra 1.0 mm e 2.0 mm, ricavata da cave di prestito situate al largo della baia dei Maronti. Nel modello eseguito, il ripascimento è stato realizzato con sabbia silicea fine di diametro caratteristico pari a 0.2 mm che rappresenta il passante al 50% del fuso granulometrico prefissato (Di Natale et al., 2004). Tale scelta rappresenta il miglior compromesso tra le esigenze di scalatura geometrica dei sedimenti ottenuta secondo il criterio di scala proposto da Kamphuis (SM) e la necessità di evitare che i sedimenti scalati siano così piccoli da manifestare proprietà colloidali tali da renderne il comportamento assai diverso da quello dei sedimenti reali (Kamphuis, 1991, 2000). Il fondale è stato modellato in modo da realizzare una pendenza analoga a quella desunta dall'esame della batimetria della baia dei Maronti, mediamente pari al 5%.

### *Condizioni ondose di prova*

Le condizioni ondose assunte per le prove sperimentali sono le seguenti:

- onda morfologica, definita come l'altezza d'onda cui corrisponde un flusso di energia annuo pari a quello risultante dalle varie direzioni di provenienza delle onde, come stimato dallo studio meteorologico-marino;
- onda di progetto, di altezza pari all'onda frangente sul fondale su cui verrà realizzata l'opera (in base ai risultati dello studio meteorologico-marino effettuato, si tratta dell'onda con periodo di ritorno  $T_r=50$  anni).

Le altezze d'onda corrispondenti alle due condizioni ondose sopra descritte sono risultate rispettivamente pari a 1.92 m e a 4.00 m, corrispondenti a circa 4 cm e 8 cm nella scala del modello. Entrambe tali condizioni ondose sono state realizzate attraverso la generazione di onde pseudocasuali di assegnato spettro di tipo Jonswap.

### *Programma delle prove sperimentali*

Le prove sperimentali con l'onda morfologica sono state protratte per una durata sufficiente al raggiungimento di una configurazione in equilibrio dinamico della spiaggia. Precedenti esperienze condotte nella medesima installazione sperimentale con sabbia di analoga granulometria hanno portato a stimare tale durata in circa otto ore (Di Natale et al., 2005), corrispondenti nella scala dei tempi del prototipo a circa cinquantasei ore, durante le quali transitano 36000 onde (Tab. 1).

Per le prove con onda di progetto si è invece stabilita una durata di un'ora, che corrisponde nella scala dei tempi alla Froude alla durata di circa sette ore ed alla generazione di circa 3000 onde. Entrambi i suindicati parametri sono rappresentativi della durata di una mareggiata nel paraggio in esame (Tab. 1).

La Tabella 1 riassume la sequenza delle prove sperimentali eseguite. La sequenza temporale riprodotta è rappresentativa delle condizioni di equilibrio raggiunte dal fondo mobile dopo l'alternanza di stati di mare di modesta intensità e notevole durata e di notevole intensità e breve durata che caratterizzano, in un anno medio, il clima ondoso del paraggio in esame.

I risultati sperimentali relativi alle due configurazioni di modello analizzate sono stati rappresentati nel sistema di assi cartesiani orizzontali riportati nella Figura 3. L'asse verticale è stato assunto positivo verso il basso e con origine in corrispondenza del pelo libero della vasca.

Tabella 1 - Prove sperimentali eseguite.

Test	Condizione moto ondoso	Modello	$H_s$ prototipo [m]	$H_s$ modello [m]	$T_p$ prototipo [s]	$T_p$ modello [s]	DD (°N)	Angolo di attacco	Durata prova [ore]
1	Onda morfologica	1	1.92	0.04	5.75	0.8	200	90	8
2	Onda di progetto	1	4.0	0.08	8.66	1.2	200	90	1
3	Onda morfologica	1	1.92	0.04	5.75	0.8	200	90	8
4	Onda di progetto	1	4.0	0.08	8.66	1.2	192	98	1
5	Onda morfologica	2	1.92	0.04	5.75	0.8	200	90	8
6	Onda di progetto	2	4.0	0.08	8.66	1.2	200	90	1
7	Onda morfologica	2	1.92	0.04	5.75	0.8	192	90	8

## Risultati della sperimentazione

### *Analisi del comportamento idraulico delle scogliere sommerse*

Durante le prove sperimentali effettuate sul modello 1 (scogliera sommersa), sono stati misurati i coefficienti di trasmissione a tergo della scogliera. Per effettuare tale valutazione, sono state seguite due diverse procedure di analisi del segnale ondoso pseudocasuale acquisito a largo in assenza di opera e a tergo dell'opera, una nel dominio del tempo, l'altra nel dominio della frequenza. I valori ottenuti per le altezze d'onda incidente ( $H_s$ ) e trasmessa ( $H_t$ ), i corrispondenti periodi ed i conseguenti valori del coefficiente di trasmissione,  $K_{t1}$  e  $K_{t2}$ , sono risultati in buona sostanza coincidenti per le due analisi, come riassunto nella seguente Tabella 2.

Tabella 2 - Parametri relativi al comportamento idraulico della scogliera sommersa.

Test	Condizione moto ondoso	Angolo di attacco	$H_s$ target [cm]	T target [s]	$H_s$ (dom. freq) [cm]	$T_p$ (dom. freq.) [s]	$H_s$ (dom. tempo) [cm]	$T_s$ (dom. tempo) [s]	$H_t$ (dom. freq.) [cm]	$H_t$ (dom. tempo) [cm]	$K_{t1}$ (dom. freq.)	$K_{t2}$ (dom. tempo)
1	Onda morfologica	90°	4.0	0.8	3.8	0.79	3.6	0.74	3.6	3.3	0.95	0.92
2	Onda di progetto	90°	8.0	1.2	8.5	1.31	8.1	1.11	5.1	5.0	0.60	0.62

### *Analisi della stabilità delle scogliere sommerse (modello 1)*

Per analizzare la stabilità delle scogliere sotto l'azione della mareggiata estrema, sono state eseguite due prove sperimentali sulla sola configurazione di modello 1 (prove n. 2 e 4 di Tab. 1). In entrambe le prove l'altezza d'onda incidente è stata assunta pari a 8cm nella scala del modello. Gli angoli di attacco sono stati di 90° per la prima prova e di 98° per la seconda. Al fine di calcolare l'eventuale grado di danneggiamento della struttura, si è provveduto, in fase di realizzazione del modello, alla colorazione delle pietre costituenti le varie zone della struttura. In particolare, la mantellata è stata colorata in nero sul lato mare, in bianco sul lato terra; le zone di testata in giallo sul lato mare, in blu sul lato terra; gli strati di protezione del fondo in corrispondenza dei varchi in prossimità delle testate in verde sul lato mare, in rosso sul lato terra; la restante parte dello strato di protezione del fondo nei varchi è stata colorata in bianco. Al termine delle prove, sono state riscontrate le percentuali di danneggiamento riassunte nella Tabella 3.

Tabella 3 - Percentuali di danneggiamento del modello soggetto alle onde di mareggiata.

Onde di mareggiata H=8.0 cm	Lato struttura	Attacco 90°	Attacco 98°
Mantellata	Mare	2.3%	1.8%
	Terra	0.0%	0.0%
Testata destra	Mare	4.2%	5.8%
	Terra	6.9%	3.4%
Testata sinistra	Mare	4.6%	2.8%
	Terra	4.0%	3.0%
Testate destra e sinistra	Mare	4.4%	4.4%
	Terra	5.7%	3.3%
Varco in prossimità della testata destra	Mare	0.7%	0.0%
	Terra	0.4%	0.0%
Varco in prossimità della testata sinistra	Mare	0.7%	0.3%
	Terra	0.4%	0.2%

Le percentuali di danneggiamento sopra riportate sono state valutate contando il numero di massi dislocati e rapportandoli a quello totale di massi costituenti la zona in esame.

Si è assunto di considerare dislocati quei massi che avessero subito uno spostamento almeno pari al diametro caratteristico del masso stesso (Burchart et al., 2006).

Durante le prove sperimentali, sono state eseguite anche misure dell'escavazione al piede della struttura dal lato mare in corrispondenza dei punti riportati in Figura 5 rispettivamente, per la sequenza onda morfologica-onda di progetto, al termine della mareggiata con attacco 90° e relativamente al caso di sola onda di progetto con attacco 98°, al termine della stessa. I risultati ottenuti, riassunti nella Tabella 4, denotano la formazione in alcuni punti, di escavazioni prossime al metro nel prototipo.

Tabella 4 - Escavazioni rilevate al piede della scogliera sommersa al termine della mareggiata estrema.

Coordinate punto di misura [m]	Attacco 90°		Attacco 98°	
	Modello [cm]	Prototipo [cm]	Modello [cm]	Prototipo [cm]
(X <sub>1</sub> =0.00, Y <sub>4</sub> =2.30)	+0.3	+15	-0.7	-35
(X <sub>2</sub> =0.50, Y <sub>4</sub> =2.30)	-1.0	-50	-0.4	-20
(X <sub>3</sub> =1.50, Y <sub>4</sub> =2.30)	-1.0	-50	-0.2	-10
(X <sub>4</sub> =2.50, Y <sub>4</sub> =2.30)	-1.3	-65	+0.6	+30
(X <sub>1</sub> =0.00, Y <sub>3</sub> =2.35)	-0.7	-35	-0.5	-25
(X <sub>2</sub> =0.50, Y <sub>3</sub> =2.35)	-1.9	-95	-0.7	-35
(X <sub>3</sub> =1.50, Y <sub>3</sub> =2.35)	-0.3	-15	-0.8	-40
(X <sub>4</sub> =2.50, Y <sub>3</sub> =2.35)	-1.6	-80	0.0	0
(X <sub>5</sub> =2.90, Y <sub>2</sub> =2.45)	-0.9	-45	+0.3	+15
(X <sub>6</sub> =3.90, Y <sub>2</sub> =2.45)	-1.5	-75	+0.3	+15
(X <sub>5</sub> =2.90, Y <sub>1</sub> =2.50)	-1.0	-50	+0.4	+20
(X <sub>6</sub> =3.90, Y <sub>1</sub> =2.50)	-1.7	-85	+0.2	+10

**Analisi della circolazione idrodinamica**

L'analisi della circolazione idrodinamica a tergo delle opere a difesa del ripascimento è stata condotta per entrambe le condizioni ondose e configurazioni realizzate in vasca. In particolare, durante le prove con onda di modellamento ed incidenza ortogonale, sono state effettuate misure di velocità media temporale in corrispondenza dei nodi del reticolo riportato in Figura 6 ed ad una profondità di 0.04 m dal pelo libero. Le coordinate dei punti di misura sono riportate nella Tabella 5.

**Modello 1 (onda morfologica)**

La Figura 7(a) riporta la mappa dei vettori velocità nel piano orizzontale insieme alla rappresentazione per curve di livello del modulo del medesimo vettore. L'andamento dei vettori denota l'attivarsi di una circolazione diretta dai varchi verso le zone a tergo delle scogliere sommerse, con valori massimi della velocità di circa 1.5 cm/s, corrispondenti, nel prototipo, a circa 10.0 cm/s. La circolazione idrica a tergo dell'opera è caratterizzata da una non trascurabile tridimensionalità, come mostrato dal grafico rappresentato in Figura 7(b), in cui sono riportati, per curve di livello, i valori della componente verticale della velocità media temporale, assunta positiva verso l'alto. In questo caso le velocità risultano prevalentemente dirette verso il basso, con valori massimi dell'ordine di 0.2 cm/s, corrispondenti a circa 1.5 cm/s nel prototipo.

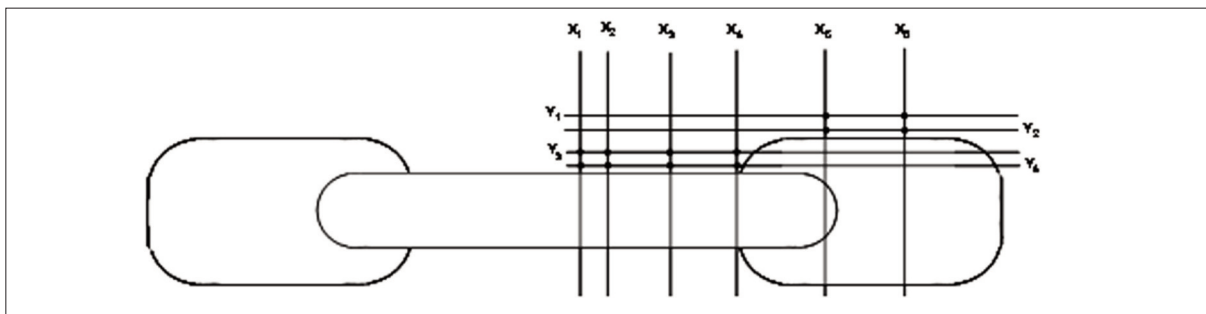


Figura 5 - Schema del modello 1 con l'indicazione dei punti in cui è stata misurata l'escavazione.

Tabella 5 - Coordinate dei punti di misura della velocità.

Modello 1			Modello 2		
Punto di misura	x [m]	y [m]	Punto di misura	x [m]	y [m]
A <sub>1</sub>	0.00		T <sub>1</sub>	0.00	
A <sub>2</sub>	1.00		T <sub>2</sub>	0.75	
A <sub>3</sub>	2.00		T <sub>3</sub>	1.50	
A <sub>4</sub>	-1.00		T <sub>4</sub>	-0.50	
A <sub>5</sub>	-2.00		T <sub>5</sub>	-1.50	
A <sub>6</sub>	0.50		T <sub>6</sub>	0.38	
A <sub>7</sub>	1.50		T <sub>7</sub>	1.12	
A <sub>8</sub>	-0.50		T <sub>8</sub>	-0.25	
A <sub>9</sub>	-1.50		T <sub>9</sub>	-1.00	
S <sub>1</sub>		1.72	L <sub>1</sub>		1.72
S <sub>2</sub>		1.52	L <sub>2</sub>		1.52
S <sub>3</sub>		1.31	L <sub>3</sub>		1.31
D	3.00	1.58	P	0.80	2.17
			Q	0.80	1.77



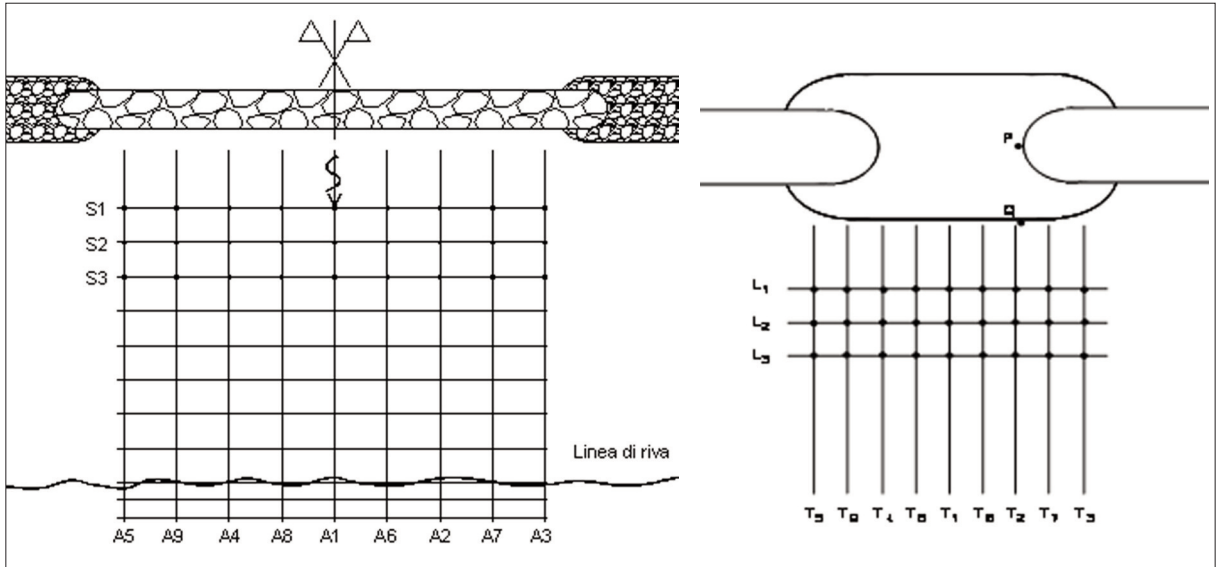


Figura 6 - Ubicazione dei punti in cui è stata effettuata la misura delle componenti della velocità media temporale: modello 1, a sinistra; modello 2, a destra.

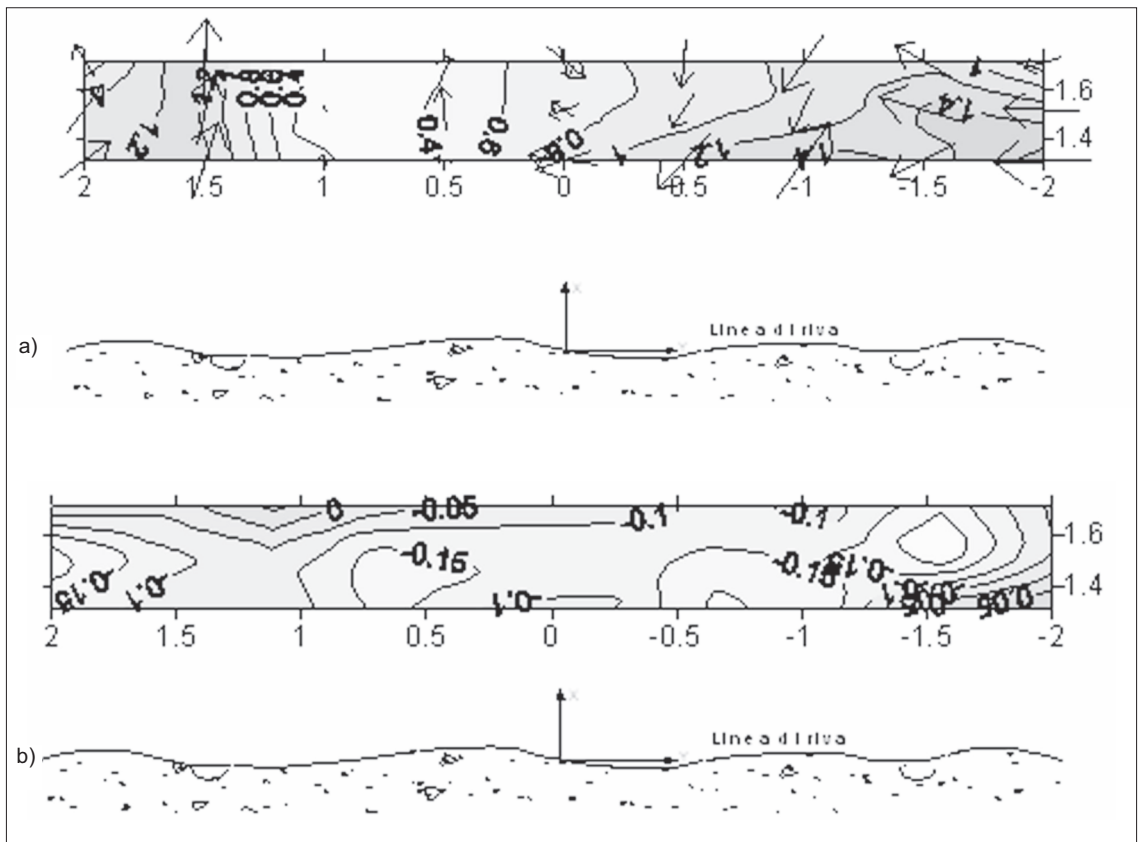


Figura 7 - Circolazione idrica a tergo della scogliera sommersa (modello 1): a) circolazione orizzontale [cm/s]; b) componente verticale, assunta positiva verso l'alto [cm/s].

### Modello 2 (onda morfologica)

La Figura 8(a), relativa alle misure effettuate con la configurazione di modello 2, riporta la mappa dei vettori velocità nel piano orizzontale insieme alla rappresentazione per curve di livello del modulo del medesimo vettore. In prossimità del varco, le velocità raggiungono circa i 3 cm/s, corrispondenti a poco più di 20 cm/s nel prototipo. L'orientamento dei vettori mostra lo stabilirsi di un macrovortice ad asse verticale che da un lato immette acqua dal largo attraverso il varco, dall'altro la preleva dall'interno del varco convogliandola verso il largo (Brocchini et al., 2004).

Sempre con riferimento alle prove sul modello 2, in Figura 8(b) sono riportati, per curve di livello, i valori della componente verticale della velocità media temporale, assunta positiva verso l'alto. I risultati ottenuti confermano come anche a tergo del varco il campo di moto denoti una spiccata tridimensionalità, soprattutto in prossimità delle testate delle scogliere sommerse.

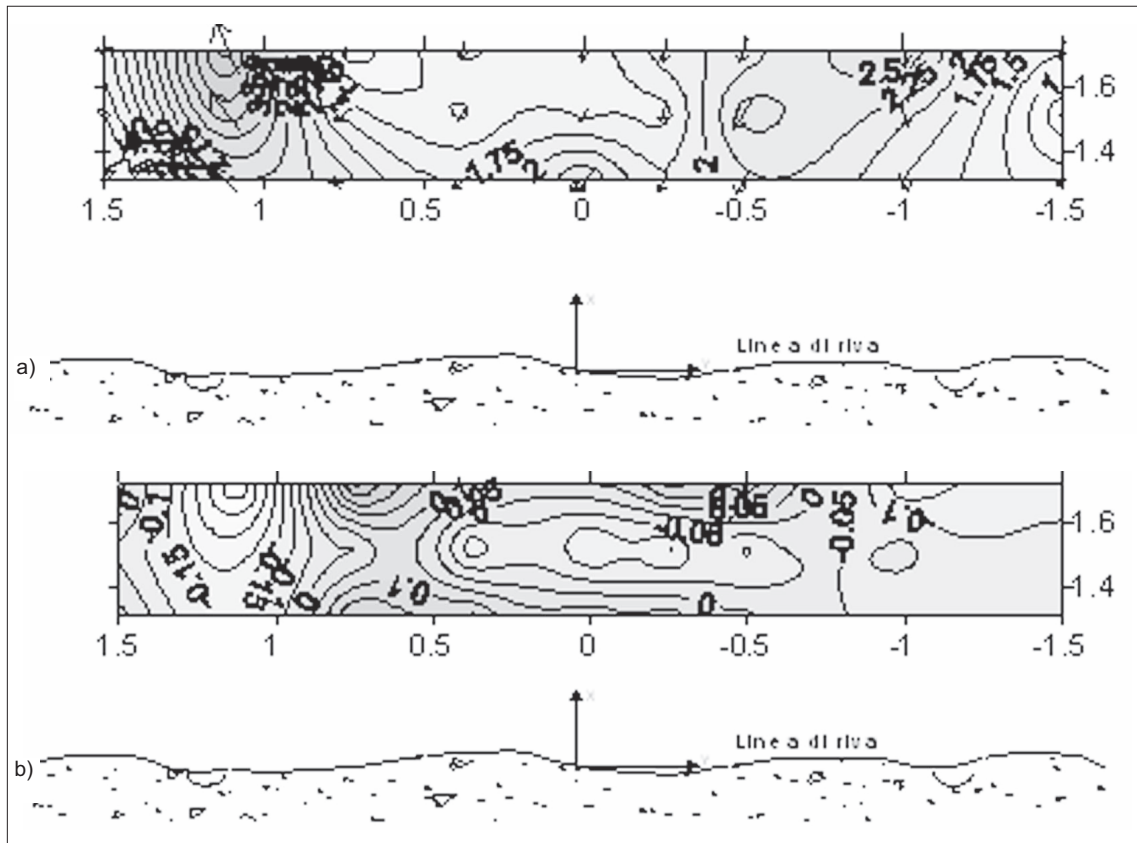


Figura 8 - Circolazione idrica a tergo del varco tra le scogliere sommerse (modello 2): a), circolazione orizzontale [cm/s]; b), componente verticale, assunta positiva verso l'alto [cm/s].

### Modello 1 (onda di progetto)

Al fine di porre in evidenza l'eventualità che, durante le mareggiate estreme, possano instaurarsi intense correnti in corrispondenza dei varchi, durante le prove sperimentali con altezza d'onda  $H=0.08$  cm, sono state eseguite le misure della velocità nel punto D della Figura 6(a) (modello 1) e nei punti P e Q della Figura 6(b) (modello 2).

La Tabella 6 riassume i risultati ottenuti. Tali risultati mostrano come le velocità si mantengano contenute entro valori ammissibili. L'asimmetria delle velocità è essenzialmente dovuta all'impossibilità di riprodurre simmetricamente il profilo del fondo rispetto all'asse trasversale del sistema sperimentale.

Tabella 6 - Vettori velocità nel piano orizzontale rilevati in prossimità del varco durante le prove con onda di mareggiata ( $H=0.08$  m).

Punto di misura	Velocità in modello [cm/s]	Velocità nel prototipo [m/s]	Angolo nel piano XY [°]
D	6.60	0.47	202.3
P	4.71	0.33	70.4
Q	5.79	0.41	36.4

### *Analisi della evoluzione della morfobatimetria a tergo delle opere*

Come già descritto precedentemente, per lo studio della evoluzione della morfobatimetria a tergo delle opere si è assunta la seguente sequenza temporale degli stati di mare:

- onda di modellamento ( $H=0.04$  m.), per una durata sufficiente al raggiungimento di condizioni di equilibrio dinamico del fondale;
- onda di progetto ( $H=0.08$  m.), per una durata  $d=1$ h, corrispondente, nella scala dei tempi del prototipo, alla durata di 7h, mediamente pari alla durata della parte più intensa di una mareggiata caratteristica del paraggio oggetto di studio;
- onda di modellamento, per una durata sufficiente al raggiungimento di condizioni di equilibrio dinamico del fondale.

La sequenza sopra descritta è stata stabilita per verificare se l'assetto assunto dal ripascimento per effetto del clima meteoromarin medio fosse modificato in modo irreversibile dall'azione di una mareggiata estrema, o se piuttosto il ripristino del clima marino medio conducesse ad una nuova configurazione di equilibrio non molto diversa da quella preesistente alla mareggiata.

A tal fine, durante l'azione della prima onda di modellamento, ad intervalli regolari (pari al tempo necessario al passaggio di 1000 onde) è stato eseguito il rilievo del fondale nei nodi della griglia riportati in Figura 9 e Tabella 7.

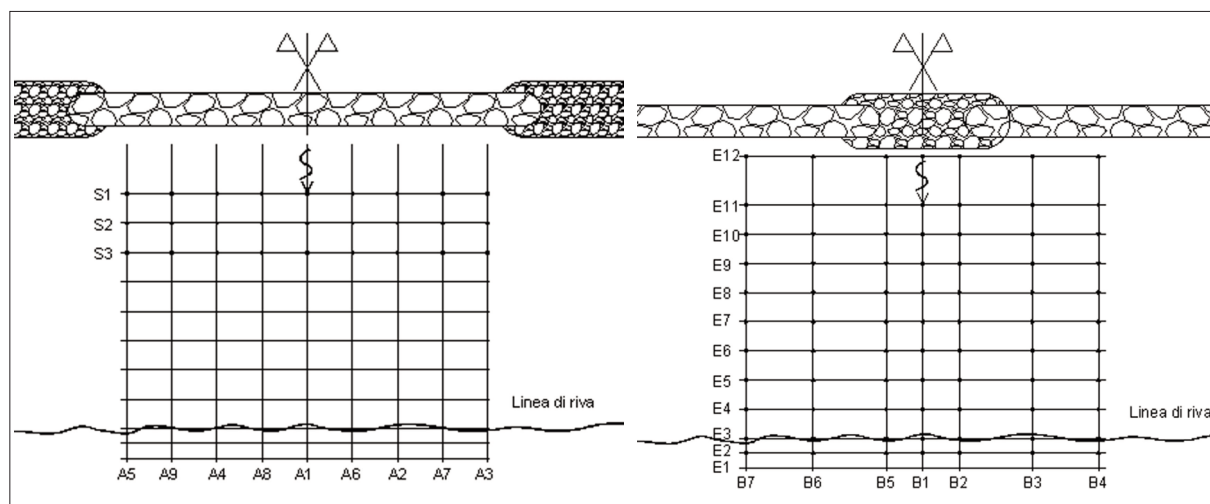


Figura 9 - Ubicazione dei punti in cui è stato effettuato il rilievo della quota del fondale: modello 1, a sinistra; modello 2, a destra.

La prova è stata protratta finché si continuavano a riscontrare significative variazioni della batimetria tra due rilievi successivi. Successivamente si è fatta agire la mareggiata di progetto per la durata di 1h e al termine di tale durata è stato eseguito il rilievo del fondale nei punti prefissati. Infine, durante l'azione della seconda onda di modellamento, è stata ripetuta la stessa procedura di rilievo della batimetria già seguita durante la prima prova.

**Modello 1**

Per quanto riguarda le prove effettuate con la prima configurazione (modello 1), il raggiungimento di condizioni di equilibrio del fondale è stato osservato, durante la prima prova, dopo un tempo di circa 390 minuti. I rilievi acquisiti a tergo della scogliera sommersa, lungo gli allineamenti indicati in Figura 9, mostrano chiaramente lo stabilirsi di un profilo di equilibrio caratterizzato da una pendenza compresa tra l'8% e il 9%, che si mantiene pressoché costante per una fascia di circa 1.0 m a partire dalla linea di riva. Più al largo la pendenza del fondale a tergo delle scogliere tende a ridursi fino a divenire pressoché orizzontale. La Figura 10 mostra i profili di equilibrio stabilitisi lungo i vari allineamenti.

L'assetto raggiunto dai profili trasversali lungo i vari allineamenti di misura, a seguito della prova con onda di mareggiata, è riportato nella Figura 11. Si evidenzia, come era da aspettarsi, la formazione di un profilo piuttosto ripido (pendenza di circa il 15%) nella zona di azione dei frangenti, estesa per circa 35 cm a partire dalla linea di riva. Questa ultima risulta però arretrata di circa 4 cm rispetto alla configurazione precedentemente stabilitasi. Il materiale asportato in prossimità della riva si ritrova accumulato più a largo, nella zona posta tra 40 e 120 cm di distanza dalla linea di riva. In tale zona tende a stabilirsi un profilo con pendenza di circa il 5%.

La successiva azione dell'onda di modellamento ha determinato un lento raggiungimento di una nuova configurazione di equilibrio dinamico. I profili trasversali riportati nella Figura 12 denotano la tendenza al ristabilirsi di una pendenza all'incirca del 10%, cioè pressoché analoga a quella antecedente la mareggiata, in prossimità della riva; inoltre si è manifestata l'erosione della zona di accumulo a modesta pendenza, tra 40 cm e 120 cm dalla linea di riva, formatasi durante la mareggiata

Tabella 7 - Coordinate dei punti di misura per il rilievo della batimetria del fondale.

Modello 1			Modello 2		
Punto di misura	x [m]	y [m]	Punto di misura	x [m]	y [m]
A <sub>1</sub>	0.00		B <sub>1</sub>	0.00	
A <sub>2</sub>	0.50		B <sub>2</sub>	0.50	
A <sub>3</sub>	1.50		B <sub>3</sub>	1.50	
A <sub>4</sub>	2.50		B <sub>4</sub>	2.50	
A <sub>5</sub>	-0.50		B <sub>5</sub>	-0.50	
A <sub>6</sub>	-1.50		B <sub>6</sub>	-1.50	
A <sub>7</sub>	-2.50		B <sub>7</sub>	-2.50	
F <sub>1</sub>		-0.20	E <sub>1</sub>		-0.20
F <sub>2</sub>		-0.10	E <sub>2</sub>		-0.10
F <sub>3</sub>		0.00	E <sub>3</sub>		0.00
F <sub>4</sub>		0.20	E <sub>4</sub>		0.20
F <sub>5</sub>		0.40	E <sub>5</sub>		0.40
F <sub>6</sub>		0.60	E <sub>6</sub>		0.60
F <sub>7</sub>		0.80	E <sub>7</sub>		0.80
F <sub>8</sub>		1.00	E <sub>8</sub>		1.00
F <sub>9</sub>		1.20	E <sub>7</sub>		1.20
F <sub>10</sub>		1.40	E <sub>10</sub>		1.40
F <sub>11</sub>		1.60	E <sub>11</sub>		1.60
F <sub>12</sub>		1.80	E <sub>12</sub>		1.74
			E <sub>13</sub>		1.80

Il materiale asportato da tale zona sembra solo in parte riposizionarsi più a riva, come mostra l'ulteriore arretramento di alcuni centimetri della linea di riva registrato lungo tutti gli allineamenti. Al termine del ciclo di prove si è pertanto registrato un arretramento medio della linea di riva pari a circa 7 cm, corrispondenti a circa 3.5 m nel prototipo. Il materiale asportato, tuttavia, sembra rimanere contenuto all'interno del sistema di scogliere sommerse. La Figura 13 mostra infine la variazione morfologica subita durante le prove dalla linea di riva.

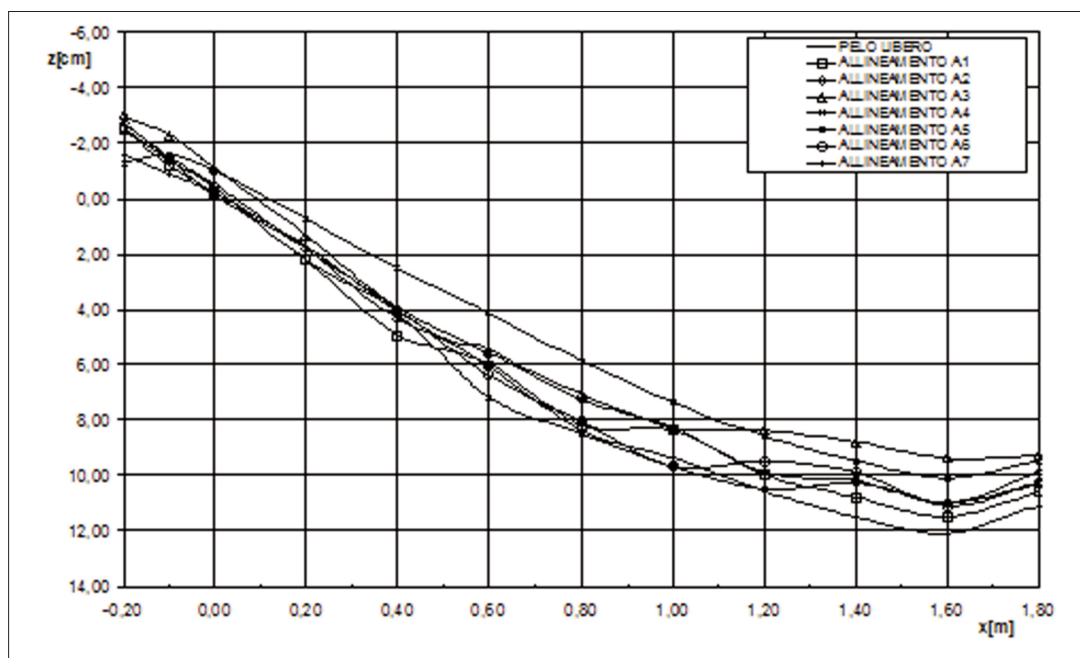


Figura 10 - Profili di equilibrio dinamico sotto l'azione della prima onda di modellamento (modello 1).

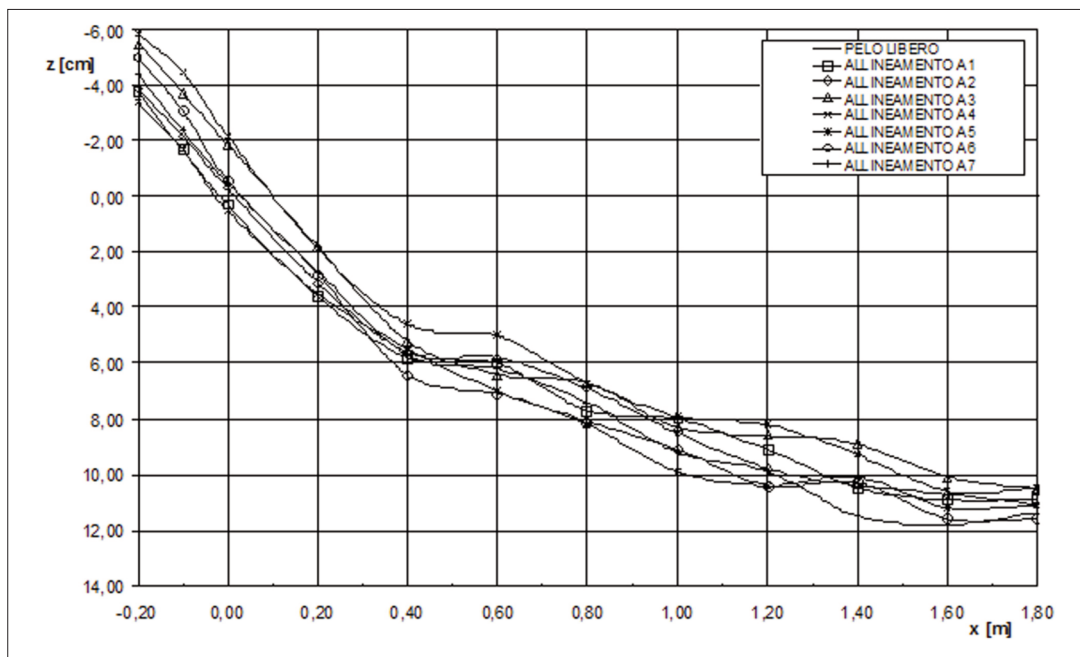


Figura 11 - Profili trasversali della spiaggia al termine della mareggiata (modello 1).

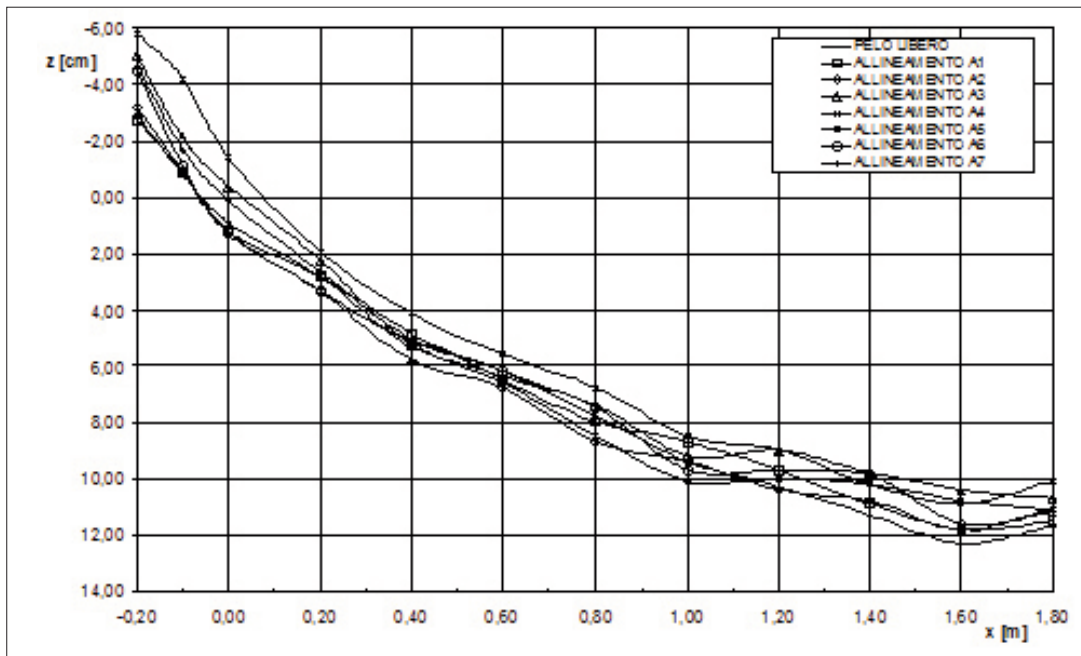


Figura 12 - Profili di equilibrio dinamico sotto l'azione della seconda onda di modellamento (modello 1).

**Modello 2**

Per quanto riguarda le prove effettuate sulla seconda configurazione del modello, relative all'analisi dell'evoluzione della batimetria in corrispondenza del varco tra le scogliere sommerse, i risultati ottenuti denotano un comportamento qualitativamente simile a quello riscontrato per il modello 1. I profili di spiaggia, acquisiti in seguito all'azione della prima onda di modellamento, lungo gli allineamenti indicati in Figura 9, mostrano che il profilo di equilibrio è caratterizzato da una pendenza di circa il 7%, leggermente inferiore a quella riscontrata a tergo delle scogliere, che si mantiene pressoché costante per una fascia di circa 1.4 m (70 m nel prototipo) a partire dalla linea di riva. Più al largo la pendenza del fondale a tergo delle scogliere tende invece a ridursi fino a divenire pressoché orizzontale.

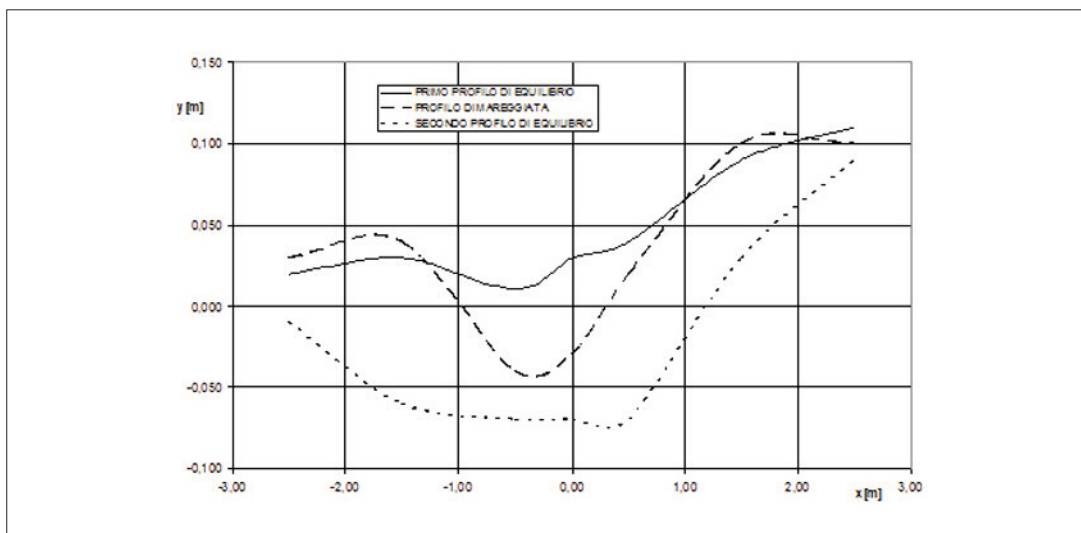


Figura 13 - Dinamica della linea di riva durante il ciclo di prove sul modello 1.

La Figura 14 mostra i profili di equilibrio stabilitisi lungo i vari allineamenti. L'assetto raggiunto dai profili di spiaggia lungo i vari allineamenti di misura, a seguito della prova con la mareggiata di progetto, è riportato nella Figura 15. Si evidenzia che anche in questo caso si stabilisce un profilo di spiaggia piuttosto ripido (con pendenza di circa il 17%) nella zona di azione dei frangenti, estesa per circa 20 cm (corrispondenti a circa 10 m nel prototipo) a partire dalla linea di riva. Questa ultima, dopo la mareggiata, risulta arretrata di circa 4 cm rispetto alla configurazione precedente nella zona corrispondente al centro del varco; ai lati si riscontra invece un consistente avanzamento della linea di riva (fino a 5 cm nella scala del modello), che torna invece ad arretrare di alcuni centimetri nelle zone poste a tergo delle testate delle scogliere. Il materiale che viene asportato nelle zone di arretramento della linea di riva si ritrova pertanto accumulato ai lati. Più al largo, il fondale tende ad assumere una pendenza costante e pari a circa il 6%.

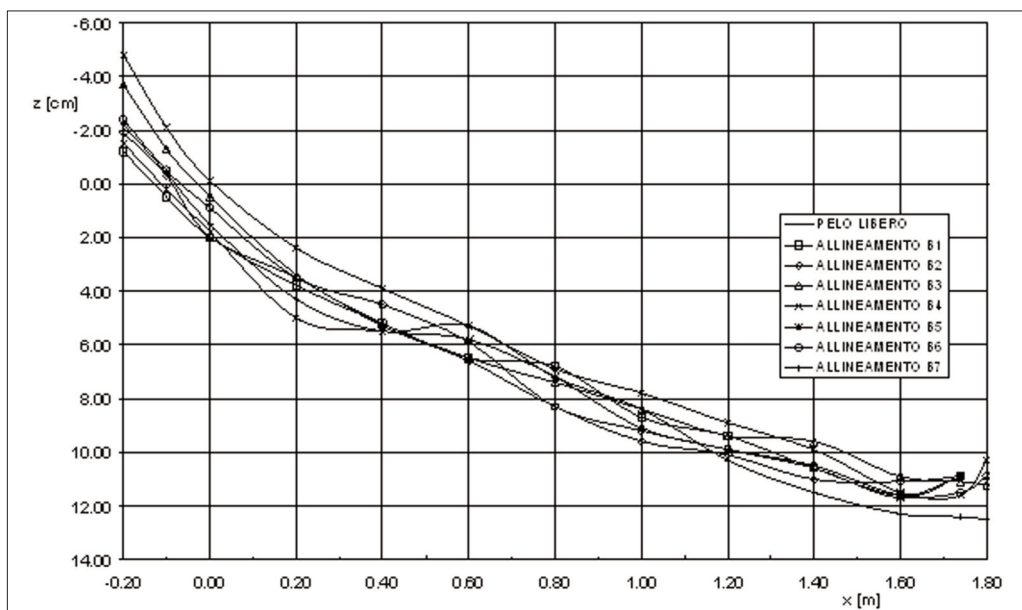


Figura 14 - Profili di equilibrio sotto l'azione della prima onda di modellamento (modello 2).

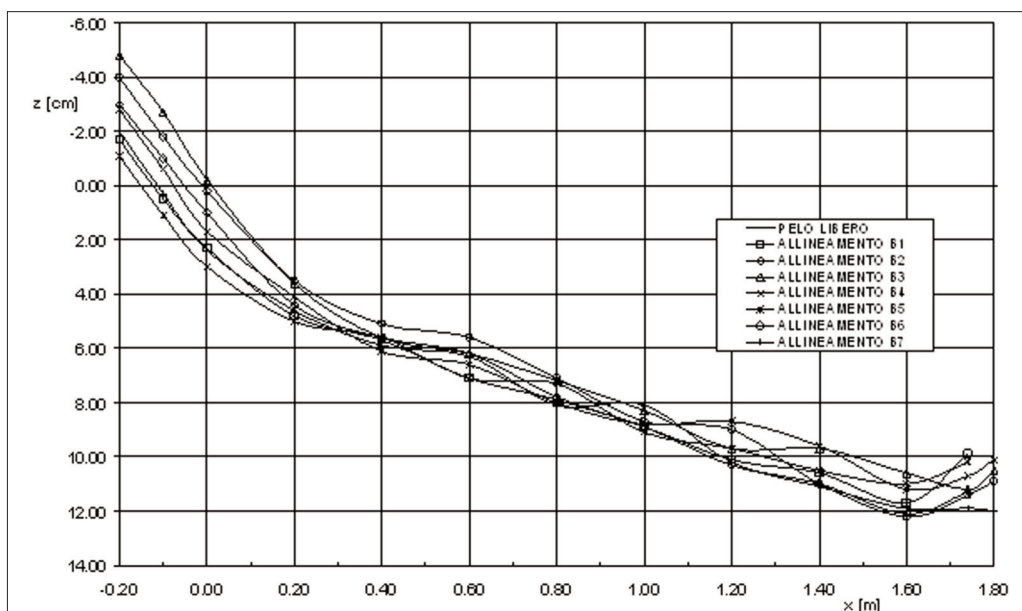


Figura 15 - Profili di spiaggia assunti al termine della mareggiata (modello 2).

L'azione della seconda onda di modellamento ha portato al raggiungimento di una nuova configurazione di equilibrio dinamico. I profili di spiaggia riportati nella Figura 16 denotano la tendenza al ristabilirsi di una pendenza quasi costante, pari all'incirca al 6%, di poco inferiore a quella antecedente la mareggiata, estesa all'intera zona compresa tra le opere e la linea di riva. Al termine del ciclo di prove si è registrato un modesto arretramento della linea di riva, in media pari a circa 2 cm, corrispondenti a circa 1.0 m nel prototipo. Nella sola zona in corrispondenza del centro del varco, l'arretramento della linea di riva raggiunge circa i 5 cm, corrispondenti a 2.5 m nel prototipo. Il materiale asportato sembra anche in questo caso rimanere contenuto all'interno del sistema di scogliere sommerse.

La Figura 17 mostra infine la variazione morfologica della linea di riva.

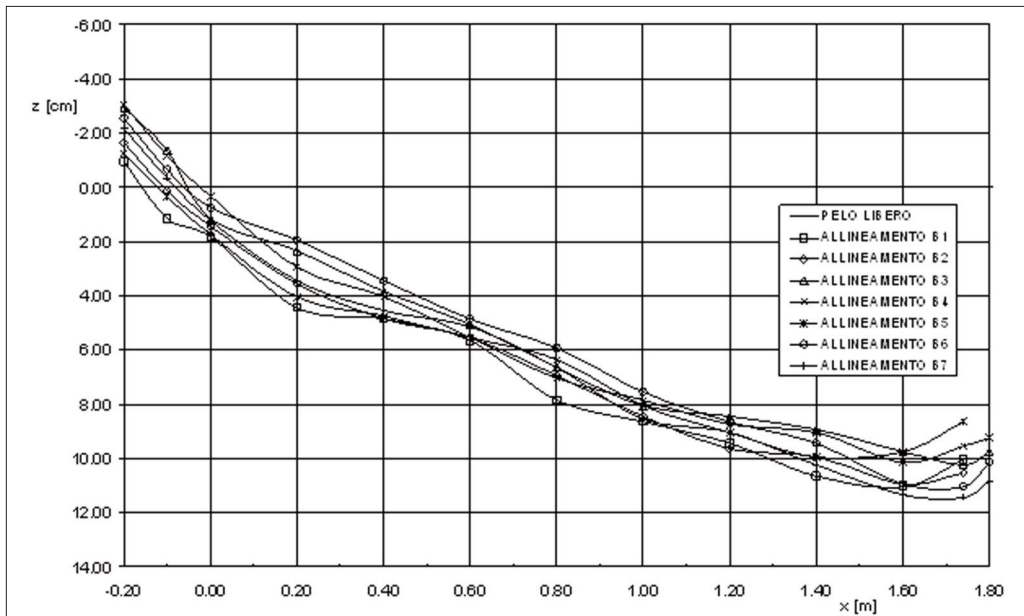


Figura 16 - Profili di equilibrio sotto l'azione della seconda onda di modellamento (modello 2).

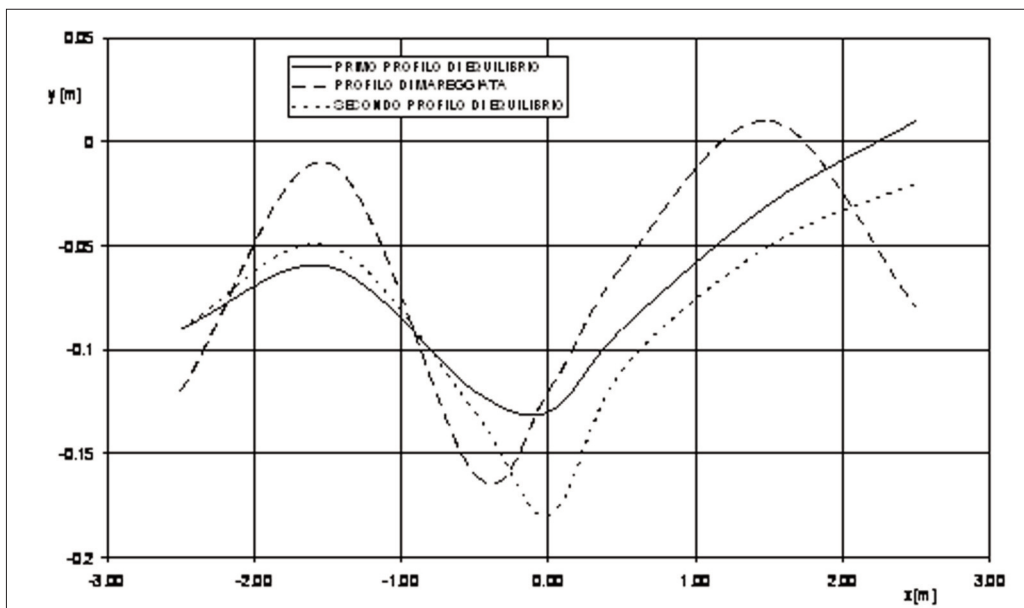


Figura 17 - Dinamica della linea di riva durante il ciclo di prove sul modello 2.



### Considerazioni conclusive

Le prove sperimentali su modello delle scogliere sommerse a protezione di un ripascimento artificiale della spiaggia dei Maronti, nel Comune di Barano d'Ischia, sono state finalizzate alle seguenti valutazioni:

- comportamento idraulico del manufatto;
- stabilità del manufatto;
- intensità della circolazione idrica a tergo delle opere;
- stabilità del ripascimento in sabbia.

La complessità e le notevoli dimensioni del sistema di opere in progetto, hanno consigliato l'esecuzione di prove su due distinte configurazioni (modello 1 e modello 2), rispettivamente rappresentative delle zone del ripascimento poste a tergo delle scogliere sommerse e di quelle poste in corrispondenza del varco previsto tra le due scogliere. I risultati ottenuti possono essere così riassunti:

a) valutazione del comportamento idraulico:

- il fattore di trasmissione dell'altezza d'onda a tergo del sistema di scogliere sommerse è pari a circa il 60% in corrispondenza della mareggiata di progetto, mentre assume valori superiori al 90% in corrispondenza dell'onda di modellamento;

b) valutazione della stabilità del manufatto:

- il grado di danneggiamento delle opere a seguito dell'azione della mareggiata di progetto, con periodo di ritorno di 50 anni è compreso tra 0.0% e 6.9%;
- in seguito alla suddetta mareggiata, si osservano escavazioni del fondale prossime a 1m di profondità nel prototipo localizzate in prossimità dell'imbasamento delle scogliere, dal lato mare, dove non è previsto in progetto alcun tipo di protezione;

c) valutazione della circolazione idrica a tergo delle opere:

- le velocità residue nello specchio d'acqua a tergo del sistema di scogliere sono contenute tra 0.10 m/s e 0.20 m/s nel prototipo;
- durante la mareggiata di progetto si stabiliscono in corrispondenza dei varchi correnti di intensità comprese tra 0.33 m/s e 0.47 m/s nel prototipo;

d) valutazione della stabilità del ripascimento in sabbia:

- le modificazioni subite dalla batimetria della spiaggia durante un ciclo di prove rappresentativo di una mareggiata estrema (tempo di ritorno 50 anni) preceduta e seguita da eventi ordinari di intensità pari alla media annua, mostrano un arretramento medio della linea di riva compreso tra 1.0 m e 3.5 m nel prototipo;
- il materiale asportato dall'azione dinamica delle onde di mareggiata si accumula nella zona compresa tra la linea di riva e le scogliere.

### Bibliografia

- Brocchini M., Kennedy A., Soldini L. e Mancinelli A. (2004) - *Topographically - controlled breaking wave induced macrovortices*. Journal of Fluid Mechanics, Volume 507: 289-307.
- Burchart H.F., Kramer M., Lamberti A. e Zanuttigh B. (2006) - *Structural stability of detached low crested breakwaters*. Coastal Engineering, Volume 53: 381-394.
- Di Natale M., Di Ronza S. e Vicinanza D. (2004) - *Sul problema della doppia riflessione nelle vasche per la simulazione del moto ondoso tridimensionale*. XXIX Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche, Trento.
- Di Natale M., Eramo C. e Vicinanza D. (2004) - *Realizzazione di un impianto sperimentale per lo studio degli effetti della subsidenza sulla dinamica di una spiaggia emersa*. XXIX Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche, pp. 761-768, Trento.
- Di Natale M., Eramo C. e Vicinanza D. (2008) - *Experimental investigation on beach morphodynamics in presence of subsidence*. Journal of Coastal Research.
- Frigaard P. e Christensen M. (1994) - *An absorbing wave-maker based on digital filters*. Proceeding of Int. Symp. Waves - Physical and Numerical Modelling, Vancouver.
- Frigaard P. e Brorsen M. (1995) - *A time domain method for separating incident and reflected Irregular waves*. Coastal Engineering, Volume 24, n. 3-4.

- Hughes S.A. (1993) - *Physical Models and Laboratory Techniques in Coastal Engineering*. Advanced Series on Ocean Engineering, Volume 7, World Scientific.
- Kamphuis J.W. (1972a) - *Scale selection for wave models*. Report no 71 of Queen's University C.E, pp. 173-1196, Ontario, Canada.
- Kamphuis J.W. (1972b) - *Scale selection for mobile bed wave models*. Proc. of 13th Conf. on Coast. Eng., Vancouver, Canada.
- Kamphuis J.W. (1975) - *Coastal mobile bed models: does it work?* Symposium on Modelling techniques, 2nd Annual Symposium of the Waterways Harbours and Coastal Eng. Division of ASCE, San Francisco, California.
- Kamphuis J.W. (1991) - *Alongshore Sediment Transport*. SJ. Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng. ASCE, Volume 117: 624-640.
- Kamphuis J.W. (2000) - *Introduction to Coastal Engineering and Management*. Advanced Series on Ocean Engineering, Volume 16, World Scientific.
- Piattella A. e Mancinelli A. (2006) - *Idrodinamica costiera generata da "strutture dissipative"*. XXX Convegno di Costruzioni Idrauliche, Roma.

Ricevuto il 27/06/2007, accettato il 10/01/2008.