

Indagine sperimentale in vasca per la verifica della stabilità degli interventi di ripascimento sul litorale di Spinesante e S. Francesco ad Ischia

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

A difesa delle spiagge di Spinesante e San Francesco nel Comune di Forio d'Ischia è stata prevista la realizzazione di un ripascimento all'interno di "celle" costituite da pennelli semisommersi radicati a terra e collegati, lato mare, ad una barriera sommersa continua.

Vista la complessità dell'intervento di difesa, si è resa necessaria una integrazione delle indagini a supporto delle soluzioni tecniche individuate, mediante l'esecuzione di prove sperimentali su modello fisico tridimensionale.

Lo studio sperimentale condotto presso la vasca fornita di sistema ondogeno della Seconda Università di Napoli è stato finalizzato alla valutazione della stabilità del manufatto, dell'intensità della circolazione idrica a tergo delle opere nonché della stabilità del ripascimento in sabbia.

I risultati ottenuti mostrano che l'opera ha un effetto di difesa rilevante sul ripascimento da realizzare e risulta stabile dal punto di vista strutturale.

Parole chiave: ripascimento, scogliere sommerse, coefficiente di trasmissione, grado di danneggiamento.

Abstract

To protect the beaches of "Spinesante" and "San Francesco" located in the Municipality of Forio d'Ischia, the realization of a nourishment inside some "cells" made of semi-submerged groins taking their roots on the ground and connected, on the sea side, to a continuous submerged breakwaters.

Taking into account the difficulty of this protection activity, an integration to the enquiries to support the technical solutions found is required, by means of the implementation of experimental tests of a three-dimensional physical model.

The aim of the experimental survey carried out in the wave system basin of the Second University of Naples was that of assessing the hydraulic behaviour of the construction, its stability, water circulation intensity over the works as well as the stability of the nourishment.

The results obtained prove that the breakwaters have a remarkable defence effect on the nourishment, since it proves to be sound from a structural point of view.

Keywords: nourishment, submerged breakwaters, transmission coefficient, damage level.

Introduzione

L'intervento di difesa delle spiagge di Spinesante e San Francesco prevede la realizzazione di un ripascimento all'interno di "celle" costituite da pennelli semisommersi radicati a terra con asse principale trasversale alla costa e, lato mare, collegati ad una barriera sommersa continua disposta longitudinalmente alla riva, poggiante su fondale di profondità compresa tra i 3.5 m e i 4.5 m (Benassai et al., 1997). Detta scogliera ha una lunghezza di 1500 m, con distanza variabile dalla linea di riva tra 80 m e 100 m. La barriera è costituita da un corpo di imbasamento di materiale lapideo di pezzatura assortita con peso variabile tra 50 e 200 kg al di sopra del quale è disposta una mantellata costituita da massi naturali del peso di 1-3 t. I tre pennelli trasversali semisommersi, di lunghezza variabile tra i 100 m ed i 130 m, realizzati in massi naturali sono innestati sulla barriera soffolta formando così quattro distinte unità di ripascimento (Benassai et al., 2001). Al centro delle due unità centrali di ripascimento è prevista inoltre la realizzazione di piccoli varchi di larghezza pari a 30 m (Fig. 1).



Figura 1 - Parti dell'opera di difesa delle spiagge.

Vista la rilevanza e la complessità dell'intervento di difesa da realizzare, si è resa necessaria una integrazione delle indagini a supporto delle soluzioni tecniche individuate, mediante l'esecuzione di prove sperimentali su modello fisico tridimensionale. In particolare, lo studio sperimentale è stato finalizzato alla valutazione del comportamento del manufatto, e cioè della stabilità del manufatto, dell'intensità della circolazione idrica a tergo delle opere nonché della stabilità del ripascimento in sabbia.

Di seguito sono riportati i risultati della su indicata indagine sperimentale su modello fisico eseguita presso la vasca (Fig. 2) della Seconda Università di Napoli (SUN), le cui dimensioni in pianta sono pari a 15.70 m x 12.45 m, con una profondità variabile tra 50 cm ed 1 m. Il fondo della vasca realizzato in calcestruzzo presenta una pendenza di 1:20 per una fascia di ampiezza pari a 10 m. La restante parte della vasca ha fondo orizzontale e profondità di 1m.

Un sistema ondogeno del tipo *piston type* consente di generare moti ondosi regolari e random di prefissato spettro energetico e forme d'onde (onde *short crested* e onde *long crested*). Il sistema di generazione è inoltre dotato di assorbimento attivo della riflessione al battitore, messo a punto presso l'Hydraulics and Coastal Engineering Laboratory dell'Università di Aalborg (Frigaard e Christensen, 1994; Frigaard e Brorsen, 1995) e opportunamente adattato alla suddetta vasca (Di Natale et al., 2004).

Per la misura dinamica dei livelli idrici, la vasca ondogeno 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 (ADV).

La variazione morfodinamica del fondale è stata stimata con uno scandaglio manuale.

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.

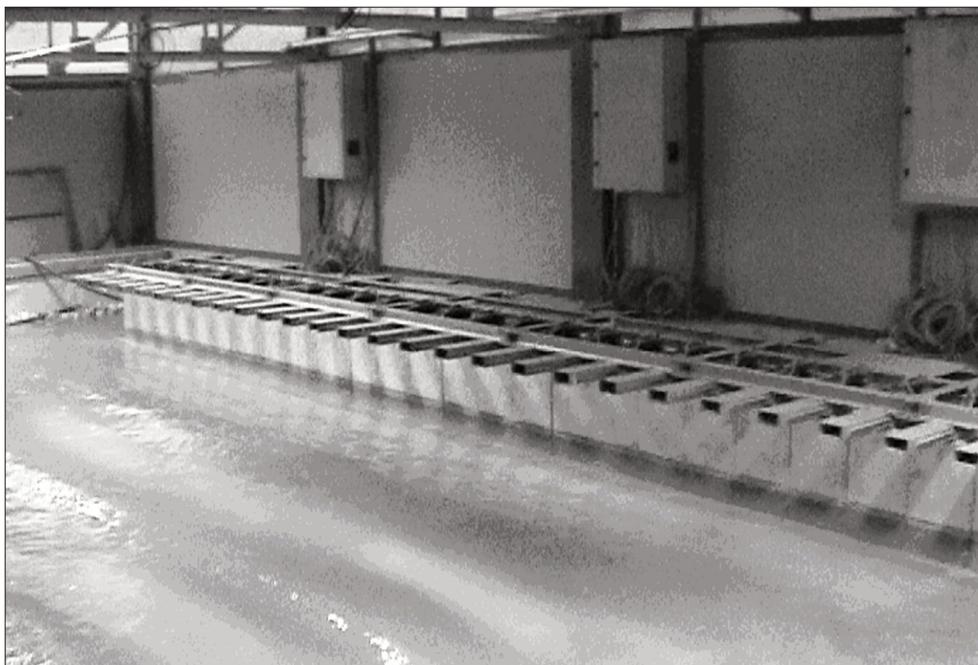


Figura 2 - Vasca ondogena tridimensionale.

Dall'analisi dei risultati ottenuti si è evinto che il fattore di trasmissione dell'altezza d'onda a tergo del sistema di scogliere sommerse è minore per effetto della mareggiata di progetto rispetto a quello dell'onda morfologica. Il danneggiamento dell'opera per effetto dell'onda di progetto può essere ritenuto trascurabile. I valori delle velocità misurate a tergo delle scogliere sono risultati contenuti; valori più elevati, ma comunque trascurabili, si stabiliscono per effetto della mareggiata di progetto in corrispondenza dei varchi; 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 a seguito della sequenza temporale riprodotta sembra rimanere contenuta all'interno del sistema di scogliere sommerse.

Impostazione e realizzazione delle prove

Realizzazione del modello

Il comportamento dell'opera, il cui sviluppo lineare è di circa 1500 m, è stato studiato attraverso la realizzazione di un modello in scala 1:50 in similitudine di Froude (Hughes, 1993), che riproduce una sola unità di ripascimento (Fig. 3). Nel modello, la scogliera è posizionata ortogonalmente all'asse di simmetria della vasca, con il varco a cavallo del suddetto asse. Il modello delle scogliere è stato realizzato con pietre calcaree a spigoli vivi, di dimensioni e peso determinate in base al rapporto di scala scelto. Per quanto riguarda l'imbasamento della struttura e dei pannelli, il peso degli elementi lapidei utilizzati è risultato inferiore a 4 g, mentre per la mantellata è compreso tra 8 g e 24 g. La Figura 4 riporta lo schema delle sezioni tralizzate nel modello in corrispondenza del tronco della scogliera, del varco e dei pennelli.

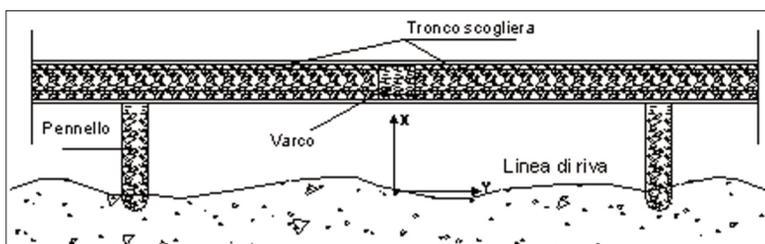


Figura 3 - Schema del modello dell'opera di difesa e sistema di riferimento orizzontale.

Il ripascimento in studio è stato realizzato con sabbia di granulometria piuttosto uniforme, compresa tra 0.5 mm e 1.0 mm; nel modello eseguito, il ripascimento è stato realizzato con sabbia silicea fine di diametro caratteristico pari a 0.2 mm e distribuzione granulometrica prefissata. La scelta di tali sedimenti risponde all'esigenza di avere materiale sabbioso facilmente reperibile, di dimensioni tali da non determinare effetti di coesione e rispondente al criterio di scala proposto da Kamphuis (SM). I risultati delle prove sperimentali sull'evoluzione della morfobatimetria sono stati interpretati solo in senso qualitativo 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 (Kamphuis, 1991, 2000).

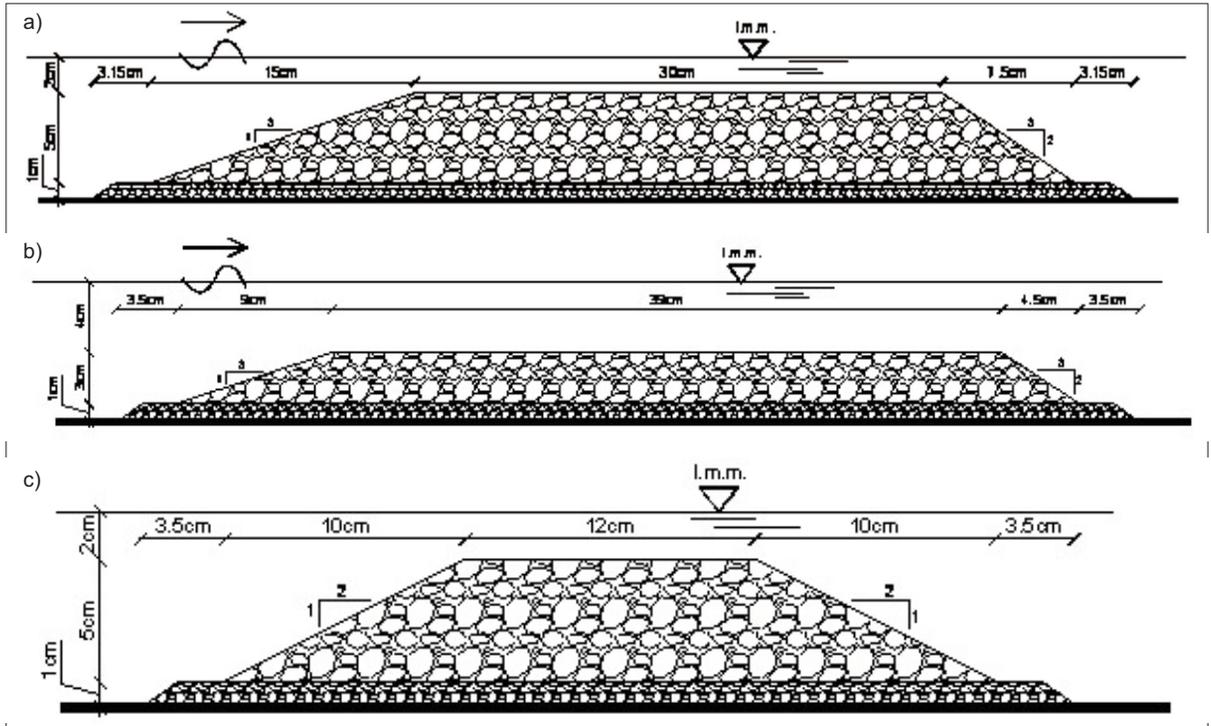


Figura 4 - Schema delle sezioni realizzate nel modello: a) tronco scogliera; b) varco; c) pennello.

Il fondale è stato modellato in modo da realizzare una pendenza analoga a quella desunta dall'esame della batimetria in prossimità delle spiagge di Spinesante e S. Francesco, mediamente pari al 3.5%.

Prove eseguite

Le condizioni ondose riprodotte durante le prove sperimentali sono rappresentative di un'onda morfologica di altezza pari a 1.50 m, corrispondenti a 3 cm nella scala del modello, e di un'onda di progetto pari a 3.00 m con periodo di ritorno $T_r=36$ anni, corrispondenti a 6 cm nella scala del modello. Entrambe tali condizioni ondose sono state desunte dallo studio meteomarinario effettuato e rappresentano rispettivamente l'altezza d'onda cui corrisponde un flusso di energia annuo pari a quello risultante dalle varie direzioni di provenienza delle onde, e l'altezza d'onda frangente sul fondale su cui verrà realizzata l'opera.

In particolare le prove sperimentali con l'onda morfologica sono state protratte per una durata sufficiente al raggiungimento di un configurazione in equilibrio dinamico della spiaggia, pari a circa a otto ore nel modello corrispondenti nella scala dei tempi del prototipo a circa 56 ore (Di Natale et al., 2004, 2005).

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. In Tabella 1 sono riportate le prove sperimentali eseguite.

I risultati sperimentali sono stati rappresentati nel sistema di assi cartesiani orizzontali raffigurato 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 - Principali parametri delle prove sperimentali eseguite.

Test	Condizione moto ondoso	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	1.50	0.03	5.1	0.75	290	90	8
2	Onda di progetto	3.0	0.06	7.2	1.0	290	90	1
3	Onda morfologica	1.50	0.03	5.1	0.75	290	90	8
4	Onda di progetto	3.0	0.06	7.2	1.0	280	80	1

Analisi dei risultati

Analisi del comportamento idraulico delle scogliere sommerse

La valutazione dei coefficienti di trasmissione a tergo della scogliera, è stata effettuata analizzando il segnale ondoso acquisito a largo e a tergo dell'opera, nel dominio del tempo e nel dominio della frequenza. Nel primo caso, la valutazione dell'altezza d'onda significativa incidente (H_s) e trasmessa (H_t) è stata effettuata mediando il terzo delle onde di altezza maggiore ($H_s \equiv H_{1/3}$) ed il periodo T_s è stato ottenuto come media dei corrispondenti periodi. Nel secondo caso, l'altezza d'onda H_s è stata assunta pari a quattro volte la radice quadrata dell'integrale dello spettro di energia ed il periodo T_p pari alla frequenza di picco dello spettro di energia del segnale. In Tabella 2 sono riportati i valori ottenuti per le altezze d'onda incidente e trasmessa, i corrispondenti periodi e i conseguenti valori del coefficiente di trasmissione, K_{t1} e K_{t2} . Si nota una buona coincidenza tra i valori ottenuti mediante le due differenti analisi.

Tabella 2 - Principali 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°	3.0	0.75	3.1	0.72	2.9	0.71	1.9	1.7	0.62	0.59
2	Onda di progetto	90°	6.0	1.0	6.4	1.04	6.2	0.90	3.1	2.9	0.48	0.47

Analisi della stabilità delle scogliere sommerse

La stabilità delle scogliere sommerse è stata valutata sotto l'azione della mareggiata estrema con due differenti angoli di attacco, rispettivamente pari a 90° per la prima prova e 80° per la seconda. In fase di realizzazione del modello, per facilitare l'individuazione degli eventuali dislocamenti dei massi costituenti la scogliera, si è proceduto alla colorazione delle pietre. In particolare i massi della mantellata sono stati colorati in nero sul lato mare, in bianco sul lato terra; le zone di testata prossime al varco, da entrambi i lati, sono state colorate in rosso sul lato mare, in giallo sul lato terra; i massi in corrispondenza del varco sono stati colorati in verde; i tratti di scogliera adiacenti ai pennelli sono stati colorati in blu; l'imbasamento in massi di piccola pezzatura è stato colorato in bianco. Le percentuali di danneggiamento stimate (Tab. 3) sono state valutate contando il numero di massi dislocati e rapportandoli a quello totale di massi costituenti la struttura di difesa in esame, considerando dislocati solo quei massi che avessero subito uno spostamento almeno pari al diametro caratteristico del masso stesso (Burchart et al., 2006).

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

Onde di mareggiata H=6.0 cm	Lato struttura	Attacco 90°	Attacco 80°
Mantellata	Mare	0.46%	0.31%
	Terra	0.28%	0.16%
Attacco pennello destro	Mare	0.56%	0.37%
	Terra	0.41%	0.00%
Attacco pennello sinistro	Mare	0.75%	0.94%
	Terra	0.81%	0.61%
Attacco pennelli	Mare	0.66%	0.61%
	Terra	0.61%	0.31%
Testata destra	Mare	0.69%	0.46%
	Terra	0.25%	0.75%
Testata sinistra	Mare	0.69%	0.46%
	Terra	0.50%	0.38%
Testate destra e sinistra	Mare	0.69%	0.46%
	Terra	0.38%	0.56%
Varco	Mare	1.61%	1.15%
	Terra	0.78%	0.52%

Le Figure 5 e 6 riportano alcune immagini delle varie parti della struttura prima e dopo la prova con attacco obliquo, durante la quale si sono riscontrati i massimi valori del danneggiamento. 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 7.

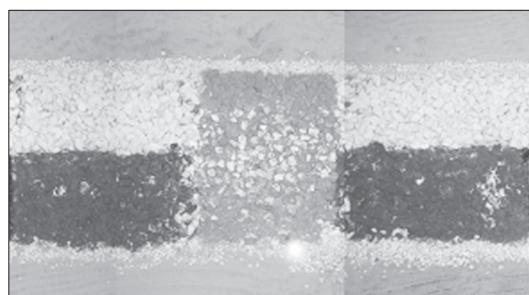
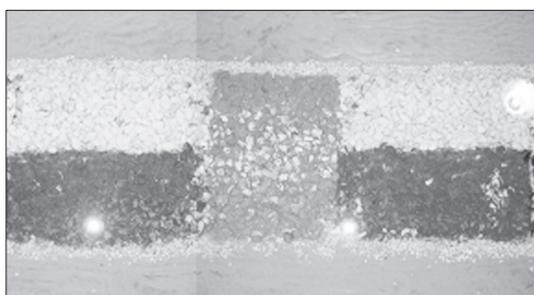


Figura 5 - Vista dall'alto della zona della scogliera prossima al varco centrale: prima della prova con onda di progetto, a sinistra; dopo la mareggiata di progetto con angolo di attacco di 80°, a destra.

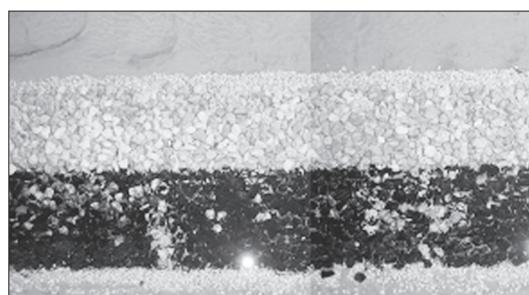
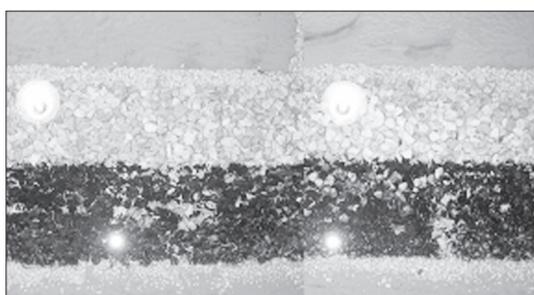


Figura 6 - Vista dall'alto del tratto della mantellata prossimo al pennello: prima della prova con onda di progetto, a sinistra; dopo la mareggiata di progetto con angolo di attacco di 80°, a destra.

I risultati ottenuti, riassunti nella Tabella 4, denotano come la mareggiata con attacco ortogonale determini la formazione di escavazioni molto contenute (al massimo 50 cm nella scala del prototipo) e in qualche caso locali piccoli accumuli di materiale; la mareggiata con attacco obliquo, invece, determina escavazioni più pronunciate in prossimità dell'imbasamento della scogliera, in qualche punto anche superiori al metro nella scala del prototipo, soprattutto nella parte destra del modello.

Tabella 4 - Escavazioni rilevate al piede della scogliera sommersa al termine della mareggiata (i valori negativi indicano accumulo di materiale).

Coordinate punto di misura [m]	Attacco 90°		Attacco 80°	
	Modello [cm]	Prototipo [cm]	Modello [cm]	Prototipo [cm]
(X ₁ =0.00, Y ₁ =1.88)	0.5	25	0.7	35
(X ₂ =0.10, Y ₁ =1.88)	0.1	5	0.7	35
(X ₃ =0.20, Y ₁ =1.88)	1.0	50	0.0	0
(X ₄ =0.30, Y ₁ =1.88)	0.4	20	1.4	70
(X ₅ =0.60, Y ₁ =1.88)	0.1	10	0.9	45
(X ₆ =1.60, Y ₁ =1.88)	-0.4	-20	1.3	65
(X ₇ =2.60, Y ₁ =1.88)	0.2	10	2.1	105
(X ₈ =3.80, Y ₁ =1.88)	0.1	5	1.8	90
(X ₉ =-0.10, Y ₁ =1.88)	0.2	10	-0.4	-20
(X ₁₀ =-0.20, Y ₁ =1.88)	0.5	25	-0.8	-40
(X ₁₁ =-0.30, Y ₁ =1.88)	-0.3	-15	0.2	10
(X ₁₂ =-0.60, Y ₁ =1.88)	0.0	0	0.5	25
(X ₁₃ =-1.60, Y ₁ =1.88)	0.3	15	0.2	10
(X ₁₄ =-2.60, Y ₁ =1.88)	-0.6	-30	0.0	0
(X ₁₅ =-3.80, Y ₁ =1.88)	0.9	45	0.7	35
(X ₁ =0.00, Y ₂ =1.98)	-0.2	-10	-0.6	-30
(X ₂ =0.10, Y ₂ =1.98)	0.2	10	0.0	0
(X ₃ =0.20, Y ₂ =1.98)	-0.4	-20	0.7	35
(X ₄ =0.30, Y ₂ =1.98)	0.4	20	0.6	30
(X ₅ =0.60, Y ₂ =1.98)	-1.0	-50	0.2	10
(X ₆ =1.60, Y ₂ =1.98)	-0.2	-10	0.6	30
(X ₇ =2.60, Y ₂ =1.98)	-0.1	-5	1.2	60
(X ₈ =3.80, Y ₂ =1.98)	0.4	20	-0.2	-10
(X ₉ =-0.10, Y ₂ =1.98)	-0.1	-5	0.1	5
(X ₁₀ =-0.20, Y ₂ =1.98)	0.3	15	-0.8	-40
(X ₁₁ =-0.30, Y ₂ =1.98)	1.1	55	-0.3	-15
(X ₁₂ =-0.60, Y ₂ =1.98)	0.0	0	0.6	30
(X ₁₃ =-1.60, Y ₂ =1.98)	0.2	10	0.6	30
(X ₁₄ =-2.60, Y ₂ =1.98)	-0.2	-10	0.2	10
(X ₁₅ =-3.80, Y ₂ =1.98)	0.2	10	0.4	20

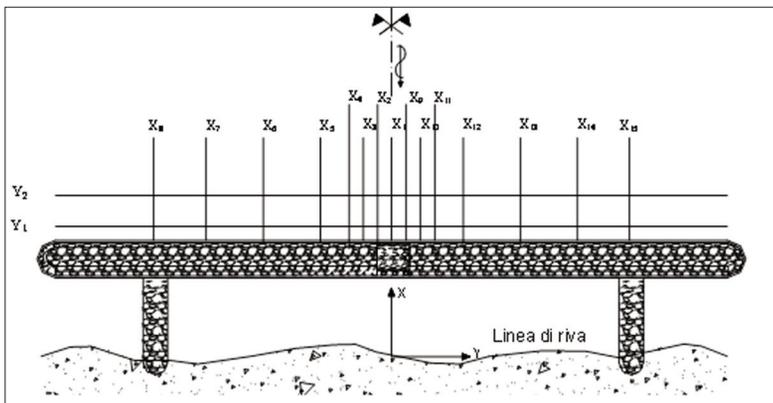


Figura 7 - Schema del modello con l'indicazione dei punti in cui è stata misurata l'escavazione.

Analisi della circolazione idrodinamica

L'analisi della circolazione idrodinamica a tergo delle opere a difesa del ripascimento è stata condotta sia per l'onda morfologica che per l'onda di progetto con attacco ortogonale. Le misure di velocità media temporale, per l'onda di modellamento, sono state effettuate ad una profondità di 5 cm dal pelo libero ed in corrispondenza dei nodi del reticolo individuato (Fig. 8), le cui coordinate sono riportate nella Tabella 5.

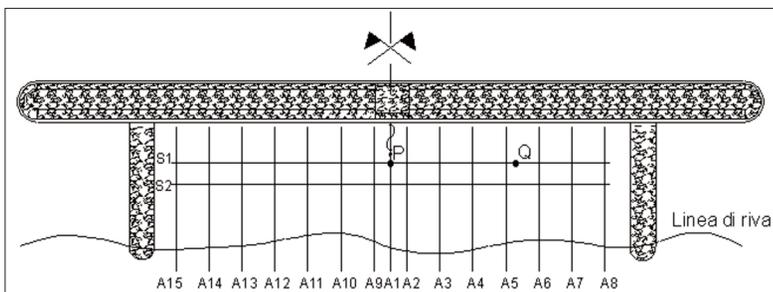


Figura 8 - Ubicazione dei punti in cui è stata effettuata la misura delle componenti della velocità.

Tabella 5 - Coordinate dei punti di misura della velocità.

Punto di misura	x [m]	y [m]
A ₁	0.00	
A ₂	0.25	
A ₃	0.75	
A ₄	1.25	
A ₅	1.75	
A ₆	2.25	
A ₇	2.75	
A ₈	3.25	
A ₉	-0.25	
A ₁₀	-0.75	
A ₁₁	-1.25	
A ₁₂	-1.75	
A ₁₃	-2.25	
A ₁₄	-2.75	
A ₁₅	-3.25	
S ₁		1.12
S ₂		1.0
P	0.00	1.12
Q	1.90	1.12

Onda morfologica

In Figura 9(a) è riportata la mappa dei vettori velocità nel piano orizzontale insieme alla rappresentazione per curve di livello del modulo del medesimo vettore. Le velocità misurate raggiungono valori massimi di circa 4 cm/s, corrispondenti, nel prototipo, a circa 30.0 cm/s., determinando una circolazione diretta dal varco verso l'interno dell'unità di ripascimento a tergo della scogliera sommersa.

In Figura 9(b) sono riportati, per curve di livello, i valori della componente verticale della velocità media temporale, assunta positiva verso l'alto. I valori massimi delle velocità sono risultati dell'ordine di 0.6 cm/s, corrispondenti a circa 4.0 cm/s nel prototipo, e dirette prevalentemente verso il basso.

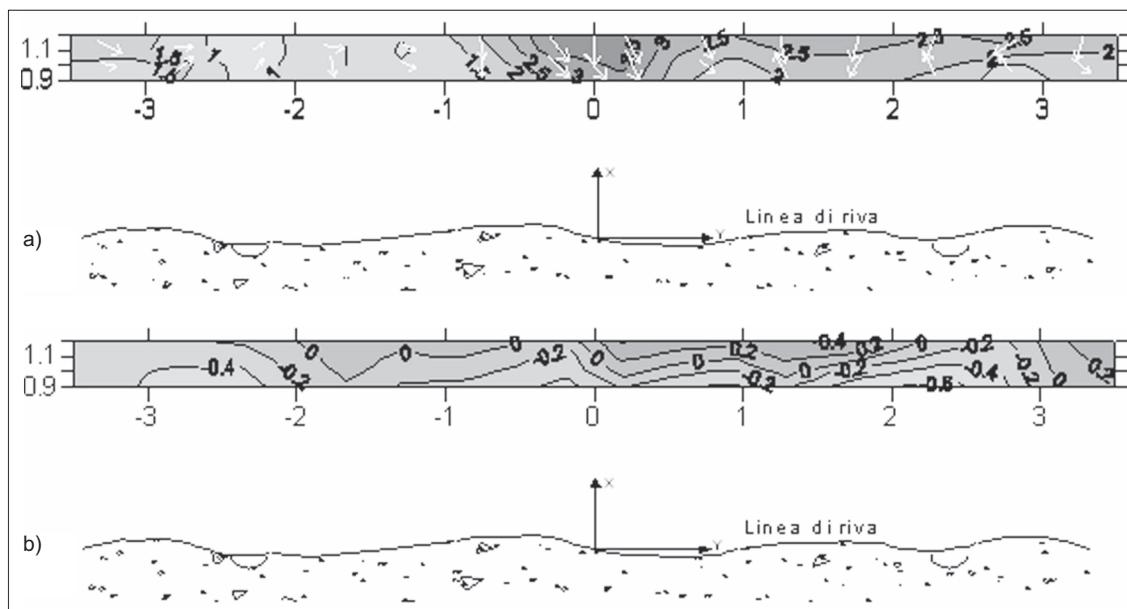


Figura 9 - Circolazione idrica a tergo della scogliera sommersa: (a) circolazione orizzontale [cm/s]; (b) componente verticale, assunta positiva verso l'alto [cm/s].

Onda di progetto

Le misure della velocità dell'altezza d'onda $H=0.06$ cm, corrispondenti a 3.0 m nel prototipo, sono state eseguite nei punti P e Q raffigurati nella Figura 8. I risultati ottenuti (Tab. 6) evidenziano come i valori delle velocità sono contenuti entro valori ammissibili.

Tabella 6 - Vettori velocità nel piano orizzontale in prossimità del varco ($H=0.06$ cm).

Punto di misura	Velocità in modello [cm/s]	Velocità nel prototipo [m/s]	Angolo nel piano XY [°]
P	6.1	0.43	41.5°
Q	2.3	0.16	52.0°

Analisi della evoluzione della morfologia della spiaggia sommersa a tergo delle opere

Lo studio della evoluzione della morfobatimetria a tergo delle opere è stata valutata sottoponendo il fondale ad una sequenza temporale di stati di mare caratterizzata dall'onda di modellamento, $H=0.03$ m, dall'onda di progetto, $H=0.06$ m, ed ancora dall'onda di modellamento, $H=0.03$ m.

In particolare per quanto concerne la prima onda di modellamento, il rilievo del fondale è stato eseguito dopo il passaggio di 1000 onde e fino a quando si continuavano a riscontrare significative variazioni della batimetria tra due rilievi successivi. Il rilievo del fondale relativo alla mareggiata di progetto è stato eseguito al termine della durata stabilita della prova (1h). Durante l'azione della seconda onda di modellamento, è stata ripetuta la stessa procedura di rilievo della batimetria già seguita durante la prima prova. Per le condizioni ondo-se su descritte il rilievo è stato effettuato nei nodi della griglia rappresentata in Figura 10 e Tabella 7.

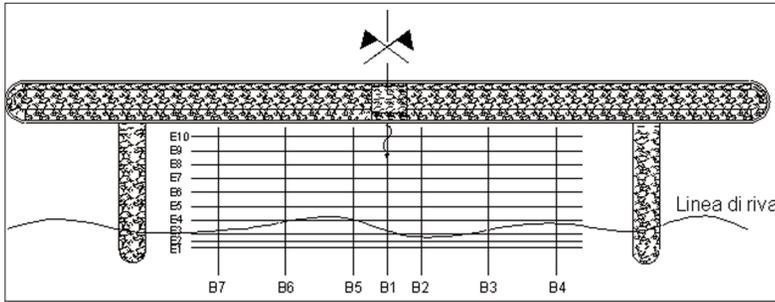


Figura 10 - Ubicazione dei punti in cui è stato effettuato il rilievo della quota del fondale.

Durante la prima onda di modellamento, il raggiungimento delle condizioni di equilibrio del fondale è avvenuto dopo un tempo di circa 390 minuti. In Figura 11 sono mostrati i profili di equilibrio stabiliti lungo i vari allineamenti. In particolare si evidenzia lo stabilirsi di un profilo di equilibrio caratterizzato da un piccolo tratto in prossimità della linea di riva con pendenza compresa tra il 15% e il 20%, esteso per una lunghezza compresa tra 15 cm e 20 cm, corrispondenti nel prototipo a 7.5–10 m, seguito da un tratto più esteso (tra 80 cm e 90 cm nella scala del modello, pari a 40–45 m nel prototipo) a pendenza pressoché costante e compresa tra il 5% e il 7%. Più al largo la pendenza del fondale a tergo delle scogliere tende a ridursi fino a divenire pressoché orizzontale. La Figura 12 riporta invece la rappresentazione per curve di livello della batimetria di equilibrio a tergo della scogliera.

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

Punto di misura	x [m]	y [m]
B ₁	0.00	
B ₂	0.50	
B ₃	1.50	
B ₄	2.50	
B ₅	-0.50	
B ₆	-1.50	
B ₇	-2.50	
E ₁		-0.20
E ₂		-0.10
E ₃		0.00
E ₄		0.20
E ₅		0.40
E ₆		0.60
E ₇		0.80
E ₈		1.00
E ₉		1.20
E ₁₀		1.40

In Figura 13 sono riportati i profili trasversali lungo i vari allineamenti di misura dovuti all'azione dell'onda di mareggiata. Si nota la formazione di un profilo piuttosto ripido (pendenza compresa tra il 17% e il 25%) nella zona di azione dei frangenti, estesa per circa 25 cm (corrispondenti a circa 12.5 m nel prototipo) a partire dalla linea di riva, che risulta arretrata di circa 6.5 cm rispetto alla configurazione dovuta all'onda morfologica.

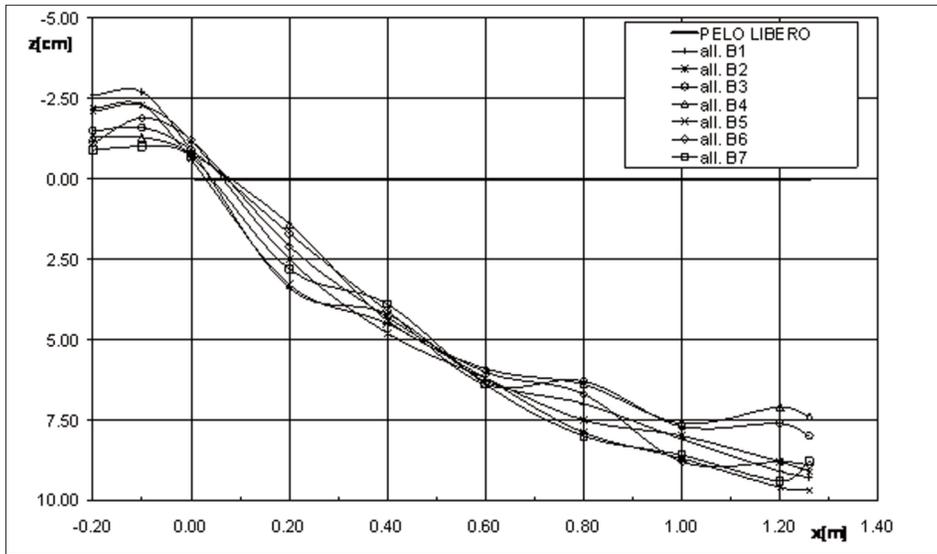


Figura 11 - Profili di equilibrio dinamico sotto l'azione della prima onda di modellamento.

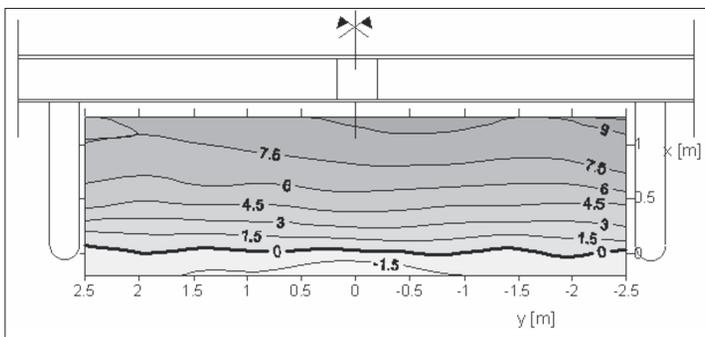


Figura 12 - Batimetria di equilibrio all'interno della cella di ripascimento dopo l'azione della prima onda di modellamento.

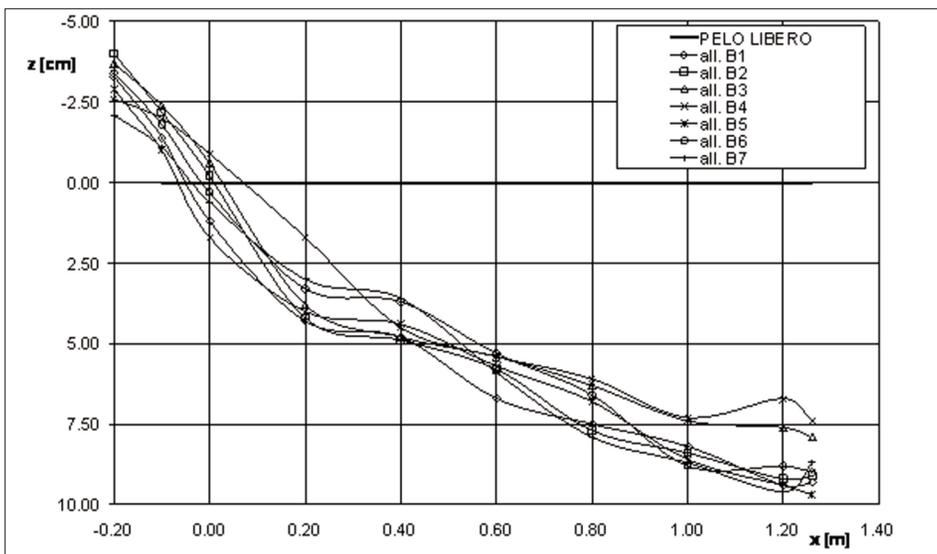


Figura 13 - Profili trasversali della spiaggia al termine della mareggiata.

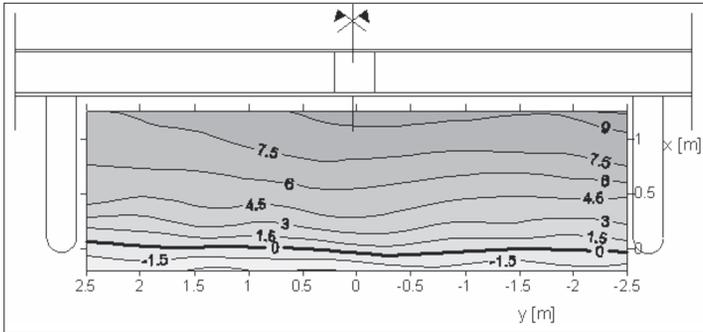


Figura 14 - Batimetria all'interno di una cella di ripascimento al termine della mareggiata.

barra di accumulo formatasi ad opera dell'onda di mareggiata. L'assetto complessivo dei profili non si discosta tuttavia molto da quelli dopo la mareggiata, in modo particolare in prossimità della linea di riva, di cui non si registra alcun ulteriore significativo arretramento.

Nella zona posta tra 30 e 90 cm di distanza dalla linea di riva, tende a stabilirsi una barra di accumulo poco pronunciata dovuta al materiale asportato dalla riva. In Figura 14 è riportata la rappresentazione per curve di livello del fondale dopo la mareggiata.

La successiva azione dell'onda di modellamento ha determinato il raggiungimento di una nuova configurazione di equilibrio dinamico. Si nota, come mostrato in Figura 15, come l'azione di tale onda sia stata quella di demolire parzialmente la

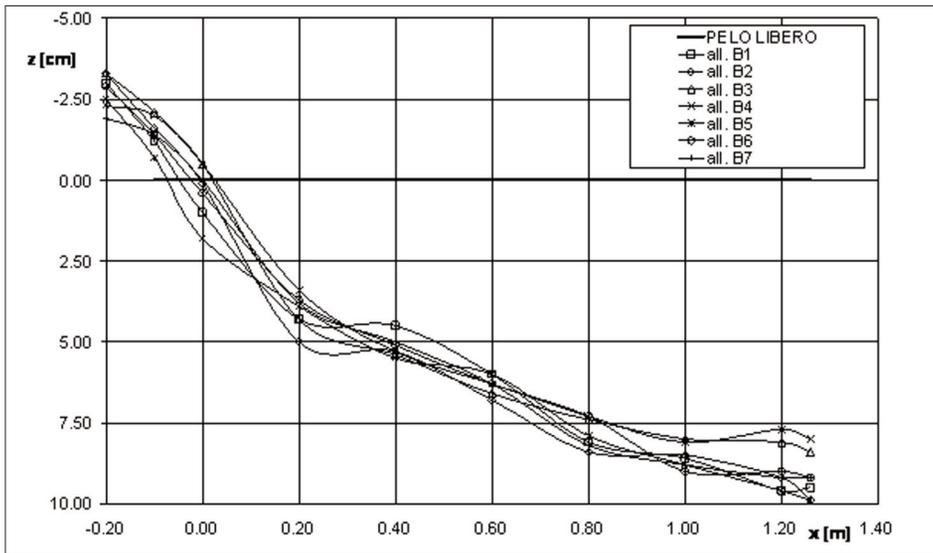


Figura 15 - Profili di equilibrio dinamico dopo l'azione della seconda onda di modellamento.

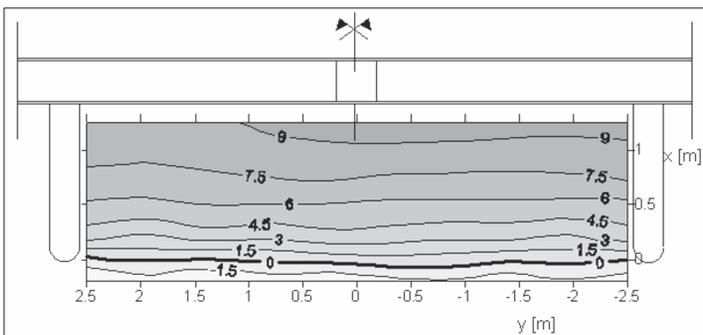


Figura 16 - Batimetria di equilibrio in una cella di ripascimento dopo l'azione della seconda onda di modellamento.

La nuova configurazione assunta dal fondale è riportata nella Figura 16.

Al termine del ciclo di prove si è pertanto registrato un arretramento della linea di riva compreso tra circa 4 cm ai due lati della cella di ripascimento, in prossimità dei pennelli, ed un massimo di circa 10 cm al centro, corrispondenti rispettivamente a circa 2.0 m e 5.0 m nel prototipo. Il materiale asportato, tuttavia, sembra rimanere contenuto all'interno del sistema di scogliere sommerse.

Considerazioni conclusive

Le prove sperimentali su modello delle scogliere sommerse a protezione di un ripascimento artificiale delle spiagge di Spinesante e S. Francesco, nel Comune di Forio d'Ischia, sono state finalizzate alle seguenti valutazioni:

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

L'esecuzione delle prove è stata effettuata su un modello rappresentativo di una sola delle quattro distinte unità di ripascimento individuate dal progetto, vista la complessità e le dimensioni del sistema di opere di difesa. Nell'ambito delle prove eseguite, dall'analisi dei risultati ottenuti si è evinto che per quanto concerne la valutazione del comportamento idraulico, il fattore di trasmissione dell'altezza d'onda a tergo del sistema di scogliere sommerse è di poco inferiore al 50% per effetto della mareggiata di progetto, mentre assume valori intorno al 60% in corrispondenza dell'onda di modellamento. Il grado di danneggiamento delle opere a seguito dell'azione della mareggiata di progetto, è compreso tra 0.0% e 1.6%, con escavazioni del fondale, nella scala del prototipo, generalmente contenute in poche decine di centimetri. Tali valori assumono solo localmente ordini di grandezza intorno al 1 m, in prossimità dello strato di pietre posto a protezione dell'imbasamento delle scogliere, dal lato mare. Per quanto riguarda la valutazione della circolazione idrica a tergo delle opere, i valori delle velocità misurate sono molto contenuti e raggiungono valori di 0.30m/s nel prototipo solo in prossimità del varco. Per effetto della mareggiata di progetto si stabiliscono invece in corrispondenza dei varchi valori delle velocità prossime a 0.5 m/s nel prototipo. A seguito della sequenza delle onde riprodotte per la valutazione della stabilità del ripascimento in sabbia, si è riscontrato un arretramento medio della linea di riva compreso tra 3.0 m e 5.0 m nel prototipo; in particolare il materiale asportato dall'azione dinamica delle onde di mareggiata rimane intrappolato nella zona compresa tra la linea di riva e le scogliere.

Bibliografia

- Benassai E., Gentilomo M., Ragone A., Setaro F. e Tomasicchio U. (1997) - *Littoral restoration by means of protected beach nourishment. Recent italian works. Venetian and Tyrrhenian-Calabrian Coasts*. Bulletin n° 94, AIPCN.
- Benassai E., Calabrese M., Ragone A. e Sorgenti degli Uberti G. (2001) - *Un esempio di analisi di affidabilità di un ripascimento artificiale*. Giornate Italiane di Ingegneria Costiera, Salerno, Italia.
- 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. (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.

Ricevuto il 02/07/2007, accettato il 21/12/2007.