

Studi costieri

Dinamica e difesa dei litorali - Gestione integrata della fascia costiera

N. 20
2012



Studi costieri

Dinamica dei litorali - Gestione integrata della fascia costiera

Collana diretta da:

Enzo Pranzini

Dipartimento di Scienze della Terra
Borgo Albizi, 28 - 50122 Firenze
Tel. 055 2479241 - Fax 055 2001618

Redazione: **Serena Ferri**

E-mail: serena.ferri@unifi.it

Impaginazione: **Chiara Loi**

E-mail: chiara.loi@unifi.it

Comitato scientifico

Segreteria: **Pierluigi Aminti**

Dipartimento di Ingegneria civile
Via S. Marta, 3 - 50139 Firenze
Tel. 055 4796224 - Fax 055 495333
E-mail: aminti@dicea.unifi.it

Carlo Bartolini - Firenze
Edoardo Benassai - Napoli
Antonio Brambati - Trieste
Leonardo D'Alessandro - Chieti
Giuliano Fierro - Genova
Leopoldo Franco - Roma
Giovanni Battista La Monica - Roma
Alberto Lamberti - Bologna
Gianfranco Liberatore - Udine

Elvidio Lupia Palmieri - Roma
Piero Ruol - Padova
Alberto Noli - Roma
Mario Calabrese - Napoli
Giulio Scarsi - Genova
Umberto Simeoni - Ferrara
Sandro Stura - Genova
Giuseppe Roberto Tomasicchio - Bari
Marcello Zunica - Padova

Stampato presso
Nuova Grafica Fiorentina
Via Traversari, 76
50126 Firenze

Studi costieri

Dinamica dei litorali - Gestione integrata della fascia costiera

Numero 20

Indice

I risultati del monitoraggio del litorale di Trani (BT) dopo la realizzazione di opere di difesa Maria Francesca Bruno, Antonio Felice Petrillo	p. 3-13
Studi sedimentologici idonei alla sperimentazione di opere marittime soffolte atte a contrastare l'insabbiamento del porticciolo di Genova Nervi Giorgio Berriolo, Paola Bocca, Nicola Corradi, Marco Ferrari	p. 15-24
Morfodinamica e risposta a corto e medio termine ad eventi di mareggiata delle spiagge comprese tra Foce Bevano e Lido di Classe (RA) Edoardo Grottoli e Paolo Ciavola	p. 25-46
Verifica delle opere di difesa e di riqualificazione ambientale del Litorale Domizio - indagine sperimentale Michele Di Natale, Stefania Di Ronza, Caterina Eramo	p. 47-57
Associazioni biocenotiche su opere di difesa costiera parallele emerse: uno studio preliminare Irene Ortolani, Monica Giovacchini, Claudia Becchi	p. 59-72
La dinamica delle barre nell'evoluzione morfologica della spiaggia di Terracina (Lazio, LT): risultati preliminari Luca Parlagraeco, Renata Archetti, Umberto Simeoni, Saverio Devoti, Andrea Valentini, Sergio Silenzi	p. 73-83
Analisi sperimentale di una spiaggia in presenza di un sistema di drenaggio Alessandra Saponieri e Sara Corvaro	p. 85-93
Nuovi indicatori per lo studio e la gestione della costa emiliano-romagnola Margherita Aguzzi, Nunzio De Nigris, Mentino Preti e Roberto Mallegni	p. 95-109
RemTech Expo - Giornata Giovani GNRAC Lorenzo Cappietti	p. 111
Idro-morfodinamica di una spiaggia sottoposta a mareggiate caratterizzate da differente raggruppamento delle onde: esperimenti in larga scala Pasquale Contestabile	p. 113-120
Analisi sperimentale sull'erosione delle barene lagunari Michele Bendoni	p. 121-122
Effetto della durata delle prove di laboratorio sulla misura di tracimazione a tergo di una duna portuale Ilaria Crema	p. 123-124
Indagine sperimentale sui processi di trasmissione di energia e massa a tergo di barriere frangiflutti a porosità controllata Andrea Marzeddu	p. 125-126
Utilizzo di materiali innovativi per lo studio della morfodinamica di spiaggia mediante modelli fisici Valentina Petruzzelli	p. 127-128
Dispersione di sedimenti durante le attivit^a di dragaggio e back-fill Emanuele Terrile	p. 129-130
Analisi dei potenziali energetici del nord del mediterraneo Valentina Vannucchi	p. 131-132
Recensioni	
Costa e arcipelago toscano nel Kitab - i Bahriye (1521 e 1525). Un confronto cartografico (secoli XIII-XVII) (F. Lepore, M. Piccardi, E. Pranzini) Chiara Loi	p. 133-134
La costa d'Italia (a cura di S. Ginesu) Giuliano Fiero	p. 135-136
Tesi	p. 137-138
Norme per gli Autori	p. 139-140

**Gruppo Nazionale per la
Ricerca sull'Ambiente Costiero**

ISSN 1129-8588

I risultati del monitoraggio del litorale di Trani (BT) dopo la realizzazione di opere di difesa

Maria Francesca Bruno, Antonio Felice Petrillo

Dipartimento di Ingegneria delle Acque e di Chimica - Politecnico di Bari, via E. Orabona, 4 - Bari.
Tel.: +39 080 5963288, Fax: +39 080 5963414. E-mail: f.bruno@poliba.it, a.petrillo@poliba.it

Riassunto

Il litorale del comune di Trani, nel tratto posto a sud di Capo Colonna, a partire dal 1975 è stato interessato da un forte arretramento della spiaggia e da crolli della falesia retrostante la spiaggia.

Le spiagge che bordano tale litorale hanno infatti mostrato una marcata tendenza all'arretramento sino a giungere ad una consistenza talmente ridotta da non assicurare più né la fruizione balneare né la necessaria protezione dal moto ondoso incidente alla retrostante falesia.

In seguito ai dissesti evidenziati, è stata decisa la realizzazione di un sistema di 10 barriere frangiflutti parallele alla costa, che si andavano ad aggiungere ad altre due, realizzate circa 10 anni prima.

Nell'area in esame è stato condotto un monitoraggio allo scopo di interpretare e quantificare le variazioni della spiaggia emersa e sommersa.

Lo studio dell'evoluzione della spiaggia emersa, effettuato sulla base del confronto delle linee di riva, ha mostrato un avanzamento durante tutto il periodo di osservazione, mentre l'analisi dei rilievi batimetrici ha evidenziato i tipici problemi indotti dalla realizzazione delle barriere di protezione, tra i quali, l'erosione profonda in corrispondenza dei varchi tra le scogliere e l'aumento del tasso di sedimentazione nella zona sottoflusso.

Parole chiave: erosione costiera, opere di difesa, monitoraggio, morfologia, sedimenti.

Abstract

Since 1975, the Trani coast south of Capo Colonna has been subject to erosion and cliff collapse, together with the more general problems of disappearing coastline.

The beaches along this shoreline have shown a marked tendency towards erosion to the point where they are so reduced in size as to threaten both their use as bathing areas as well as their important role in protecting the cliffs overlooking the beaches from wave attack.

As a result of the clear damage being caused, a decision was made to realize a system of ten breakwater barriers parallel to the coastline, joining another two barriers which had been realized ten years previously in front of Lido Colonna. In the examined area several monitoring campaigns were conducted in order to understand and quantify changes in the emerged and submerged beach.

Field observations of shoreline position and bottom depth data indicated that there has been a significant effect of the breakwaters on the adjacent shoreline, with a considerable accretion, and on the sea bottom where typical morphological changes in the vicinity of breakwater structures have been found.

Keywords: beach erosion, coastal structures, monitoring, morphology, sediments.

Introduzione

L'analisi dell'evoluzione del tratto di litorale oggetto della presente memoria, situato nella parte più a sud dell'abitato di Trani, è stata basata sui dati acquisiti nel corso delle campagne di monitoraggio previste nel POR Puglia 2000-2006.

La Regione Puglia ha, infatti, predisposto una serie di azioni di monitoraggio fra cui quella riguardante gli "interventi di difesa costiera già finanziati e realizzati" (Misura 1.3 - Sottoazione 2b dell'area di azione 2 - Difesa delle coste regionali colpite da fenomeni di subsidenza ed erosione dei litorali sabbiosi e dissesto dei litorali rocciosi) e quella relativa all'evoluzione costiera (Misura 1.3 - Sottoazione 4c dell'area di azione 4 - Miglioramento delle conoscenze di base, adeguamento e ampliamento del sistema di monitoraggio del suolo, dei corpi idrici superficiali, sotterranei e costieri), basata su riprese aeree ripetute con cadenza stagionale e successiva restituzione cartografica.

Le suddette azioni sono state affidate, attraverso la stipula di una apposita Convenzione, ad un raggruppamento costituito dal Laboratorio di Ricerca e Sperimentazione per la Difesa delle Coste (LIC) del Politecnico di Bari, dal Dipartimento di Geologia e Geofisica (DGG) dell'Università degli Studi "Aldo Moro" di Bari e dall'Istituto di Ricerca delle Acque (IRSA) del C.N.R.

Durante i tre anni di attività sono state acquisite informazioni sulle caratteristiche topografiche, batimetriche e morfologiche delle spiagge e dei fondali marini per le aree maggiormente in crisi, oltre che le caratteristiche meteomarine, la cui acquisizione si è protratta nel tempo ed è tutt'ora in corso, in alcuni paraggi significativi della costa regionale.

Tutti i dati reperiti nel periodo di monitoraggio sono stati inseriti in un sistema informativo territoriale denominato SIMOC - Sistema Informativo Monitoraggio Coste, la cui consultazione è resa possibile attraverso il sito del progetto: www.puglia-coste.it.

Descrizione del litorale

Il tratto di costa in esame, situato lungo il versante adriatico della costa pugliese, ricade, come definito nel Piano Regionale delle Coste della Regione Puglia, all'interno della Sub Unità Fisiografica 2.5 della Puglia delimitata dal porto di Barletta a nord e dal porto di Molfetta a sud. La morfologia della sub-unità, lunga circa 35.9 km, è composita, essendo costituita da un'alternanza di tratti sabbiosi e tratti di costa rocciosa bassa e/o alta. Il paraggio di Trani ha una traversia che si estende da NO a SE con una prevalenza di stati di mare provenienti da NNO (Fig. 1a). Le caratteristiche del moto ondoso al largo sono state stimate applicando la tecnica della trasposizione geografica (De Girolamo e Contini, 1998) alle misure ondometriche registrate, dal 1990 al 2007, dalla boa direzionale di Monopoli, facente parte della Rete Ondometrica Nazionale (RON).

Il flusso longshore nella sub-unità è diretto prevalentemente da NO verso SE, ma se si analizza il dettaglio

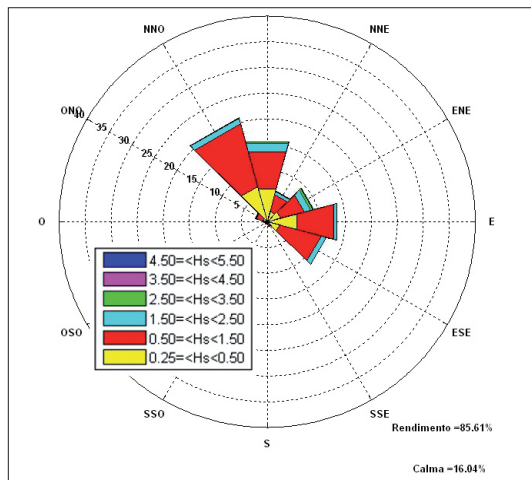


Figura 1a - Diagramma polare delle onde al largo.



Figura 1b - Correnti longshore associate all'onda morfologica equivalente.

delle correnti longshore generate dall'onda morfologica equivalente del paraggio (Fig. 1b) si evidenziano inversioni delle correnti in corrispondenza delle insenature di Capo Colonna.

Il litorale in esame si estende da Capo Colonna a Capo San Giovanni ed è costituito prevalentemente da costa rocciosa alta e localmente bassa con al piede depositi sabbiosi che danno origine a spiagge di limitata profondità.

La zona è a rischio geologico a causa di ingenti fenomeni erosivi che, spingendosi fino al piede delle falesie, hanno causato crolli per ribaltamento. Particolarmente colpita è stata la spiaggia posta a sud di Capo Colonna che, a partire dal 1975, è stata interessata da una sensibile erosione e da crolli della falesia retrostante dovuti anche alle azioni antropiche, vista l'intensa urbanizzazione che ha interessato questa porzione della fascia costiera.

Allo scopo di contrastare questo trend erosivo, negli anni tra il 2002 ed il 2004 è stato realizzato un sistema di opere di difesa costituito da 10 barriere frangiflutti parallele alla costa, che si sono aggiunte ad altre 2 barriere realizzate immediatamente più a nord agli inizi degli anni '90, con l'intento di arginare l'erosione della spiaggia del famoso Lido Colonna.

Bisogna infatti ricordare che, a partire dagli anni '30 e fino agli anni '60 il Lido Colonna aveva avuto una rinomanza nazionale per la bellezza della spiaggia sabbiosa e di quella rocciosa adiacente, il tutto in un contesto che vedeva, sullo sfondo, la presenza del monastero di Santa Maria di Colonna.

Come si osserva dal confronto tra la cartografia IGM del 1948 e l'ortofoto del 2008 (Figg. 2a e 2b), Capo Colonna, un tempo fuori dall'abitato urbano di Trani, risulta adesso circondato da una sviluppata zona turistico-residenziale.

Dalla cartografia del '48 (Fig. 2a), si rileva, in particolare, la presenza della Lama delle Campane, che, un tempo, convogliava le acque meteoriche verso il mare, contribuendo in modo sostanziale, con il suo trasporto di sedimenti fini, ad alimentare le spiagge.

A causa dell'intensa urbanizzazione del territorio e della colmata della lama (Fig. 2b), questo apporto è ormai definitivamente venuto a mancare. La situazione attuale può essere più chiaramente compresa dall'analisi del D.S.M., realizzato nella zona nel settembre del 2008 (Fig. 3), dal quale possono essere estratte sia le quote del terreno che quelle delle varie infrastrutture realizzate nel corso degli anni.

Negli ultimi quarant'anni, in definitiva, a fronte di un incremento, della popolazione della città di Trani pari ad un solo terzo, la fascia costiera tranese è stata interessata da un aumento della superficie edificata che è oggi 4 volte maggiore di quella iniziale (Vallario, 1995).

La notevole antropizzazione della fascia costiera e la relativa urbanizzazione, con la realizzazione di strade litoranee e della linea ferroviaria, ha intaccato profondamente il paesaggio costiero.

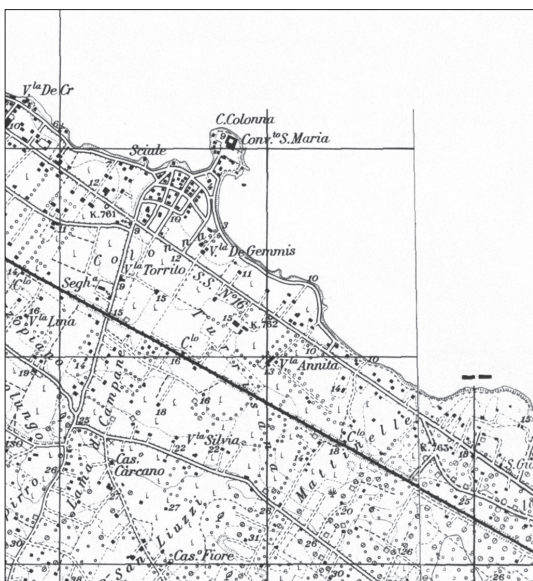


Figura 2a - IGM 1:25000 del 1948.

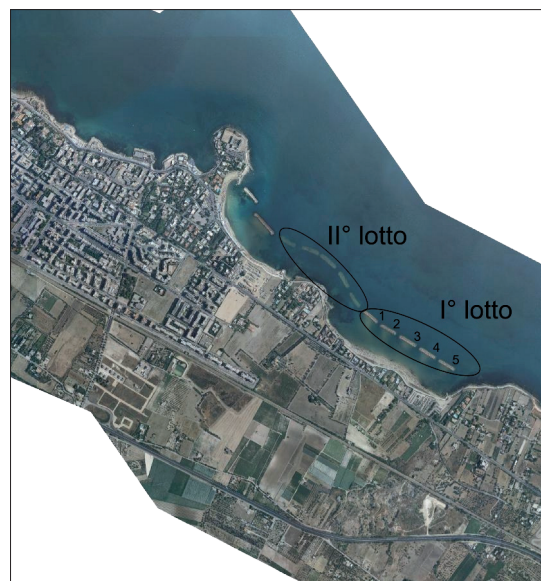


Figura 2b - Ortofoto del 2008.

In particolare, lungo il Lido di Capo Colonna, nei primi anni novanta è stato realizzato un lungo tratto di strada litoranea in rilevato, a quota 10 m s.l.m., con relativo muro di sostegno in calcestruzzo armato (Fig. 4). A seguito dell'arretramento della spiaggia al piede del rilevato, le marreggiate hanno intaccato il muro di sostegno provocandone grosse lesioni fino alla base, tanto da rendere necessari diversi interventi di sistemazione, di consolidamento della falesia e messa in sicurezza dell'opera.

Sono stati proprio questi ulteriori fenomeni di dissesto della costa, a suggerire la realizzazione, poi effettivamente avvenuta in due lotti separati (Fig. 2b), delle 10 barriere frangiflutti di cui si è accennato. Nel primo lotto, i cui lavori si sono conclusi nel 2002, sono state realizzate 5 barriere emerse nella zona più a sud del tratto di costa esaminato; le barriere, di lunghezza 80 m, altezza sul l.m.m. pari a 0.5 m e varchi di circa 30 m, sono state realizzate su fondali di circa 3 m di profondità e ad una distanza dalla linea di costa di 150 m (Fig. 5a).

Il secondo lotto è stato completato nel 2004 ed ha riguardato la realizzazione di ulteriori 5 barriere frangiflutti di tipo sommerso che presentano le stesse caratteristiche geometriche di quelle emerse, ad eccezione, ovviamente, della quota di coronamento posta a -0.3 m s.l.m.

Il litorale, pertanto, può essere idealmente suddiviso in una zona nord, in corrispondenza delle prime due barriere emerse, in una zona centrale, in corrispondenza delle cinque barriere sommerse, ed in una zona sud, dove sono state realizzate le cinque barriere emerse.



Figura 4 - Strada litoranea e muro di sostegno a Lido Colonna.

Evoluzione della linea di riva

Per studiare gli effetti delle barriere sulla morfodinamica del litorale esaminato, è stata confrontata la linea di riva del 2001, relativa ad una situazione in cui erano presenti solo le due barriere a nord, con le linee di riva rilevate nel 2006, 2007 e 2008 (POR Puglia), dopo la conclusione dei lavori di costruzione delle dieci barriere emerse e sommerse. Altre informazioni sulla linea di costa sono state desunte dalla cartografia fotografica disponibile (anno 2005).

I rilievi topografici eseguiti nel 2001, 2006 e 2007 sono stati effettuati con l'impiego di un sistema GPS differenziale, utilizzato in modalità RTK a tre ricevitori (una base e due rover), vista la piccola estensione dell'area esaminata.

Nel 2008 il rilievo topografico della spiaggia emersa e della parte emersa delle strutture di difesa è stato eseguito tramite laser scanner statico; ogni singola scansione è stata georiferita tramite GPS. Il laser scanner, montato su treppiede, è stato posizionato su punti di coordinate note da cui è stata effettuata la scansione della spiaggia emersa, delle opere di protezione e di quattro target, retti da treppiede, dotati anch'essi di antenna GPS.

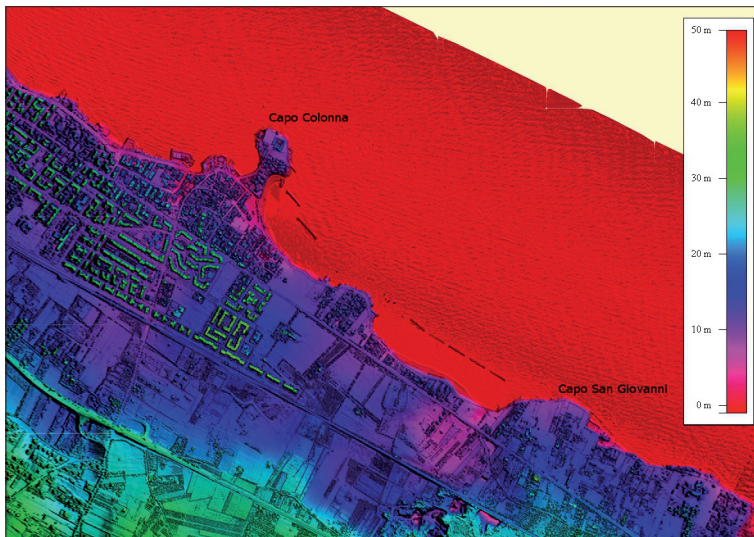


Figura 3 - DSM del 2008 (risoluzione orizzontale 1 m).



Figura 5a - Fotografia scattata immediatamente dopo la realizzazione delle barriere emerse (2003).

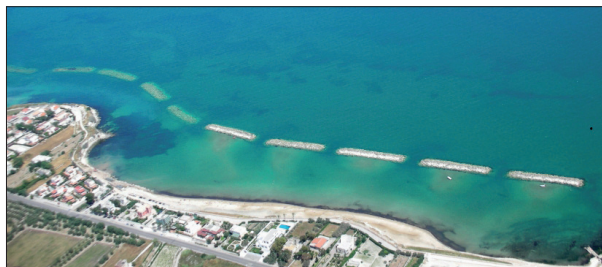


Figura 5b - Fotografia scattata nell'ottobre 2008.

Tutte le aree della spiaggia emersa in cui, per motivi logistici, non è stato possibile effettuare il rilievo tramite laser scanner in modalità dinamica, pseudo-statica o statica (impercorribilità della spiaggia per presenza di ostacoli), e la spiaggia sommersa fino alla profondità di 1.5 m, sono comunque state rilevate con strumentazione GPS in modalità RTK.

Lo studio dell'evoluzione del litorale, nella zona protetta dalle barriere, è stato eseguito effettuando il confronto a coppie tra le linee di riva disponibili, utilizzando il modulo DSAS (Digital Shoreline Analysis System) (Thieler et al., 2009), che è un applicativo del software ArcMap. Il DSAS permette di effettuare il confronto tra due linee di riva rispetto ad una linea di riferimento, o baseline, lungo una serie di transetti tracciati perpendicolarmente a quest'ultima. Attraverso l'applicazione del DSAS si ottengono delle tabelle in cui, per ciascun transetto individuato, viene restituito il valore del parametro NSM (Net Shoreline Movement) che rappresenta la distanza fra la più recente e la più vecchia delle due linee di riva messe a confronto. Il litorale esaminato ha una lunghezza di circa 650 m; lungo la costa sono stati tracciati transetti ogni 10 m, per un totale di 64 sezioni individuate.

Nel periodo antecedente la realizzazione delle barriere, nella parte più a sud del litorale in esame la spiaggia era ormai ridotta a due stretti lembi di sabbia, ognuno di lunghezza pari a circa 100 m e larghezza pari a 10 m (Fig. 5a).

Dopo la realizzazione delle barriere, si è verificato un progressivo avanzamento della linea di riva con la formazione di una unica spiaggia lunga circa 450 m e con una larghezza variabile che raggiunge un valore massimo di 35 m (Fig. 5b). L'avanzamento della spiaggia è evidenziato nella Figura 6 in cui è riportato il risultato del confronto tra le linee di riva del 2001 e del 2008.

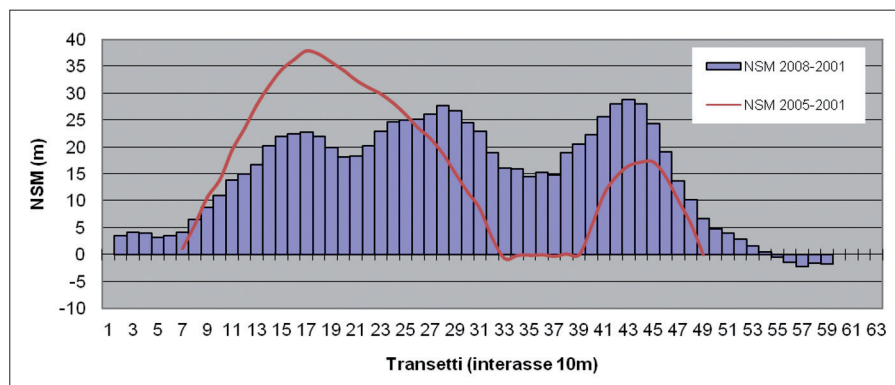


Figura 6 - Evoluzione della linea di costa 2001/08.

re, lungo il tratto di costa esaminato si era verificato un ripascimento significativo. Le due piccole spiagge presenti prima della realizzazione delle opere di difesa, infatti, erano avanzate rispettivamente di oltre 35 m (a nord) e oltre 15 m (a sud).

Analisi batimetriche

Lo studio dell'evoluzione della spiaggia sommersa è stato condotto attraverso l'analisi di alcuni rilievi batimetrici effettuati in anni differenti; in particolare sono stati utilizzati sia dati acquisiti prima della costru-

zione delle opere di difesa (2001) che successivi alla loro realizzazione (2003, 2006, 2007, 2008).

I dati batimetrici, eccezion fatta per i rilievi ante operam del 2001 eseguiti con sistema singlebeam, sono stati acquisiti tramite ecoscandaglio multibeam ad altissima risoluzione, posto su un'imbarcazione dotata di sistema di posizionamento del tipo GPS.

I rilievi analizzati si riferiscono a tutto lo specchio di mare che si estende da Capo Colonna a Capo S. Giovanni (Fig. 3). Prima della realizzazione delle nuove barriere il fondale presentava un andamento piuttosto regolare, con pendenze dell'ordine dell'1% (Fig. 7a). Dall'analisi della carta batimetrica relativa al rilievo effettuato nel 2008 (Fig. 7b), risulta che nella zona delle barriere emerse poste a protezione della spiaggia a

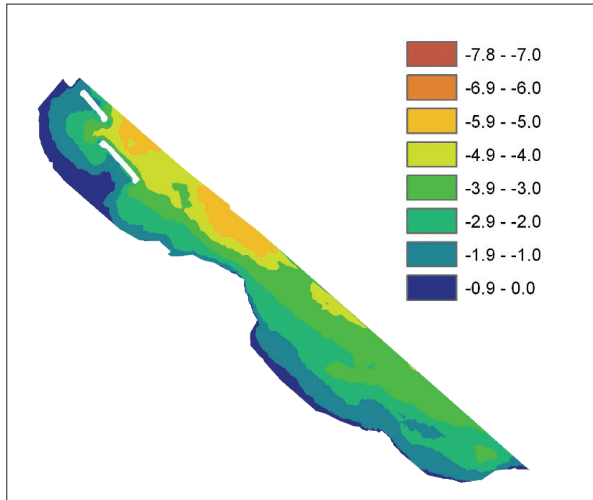


Figura 7a - Rilievo batimetrico del 2001.

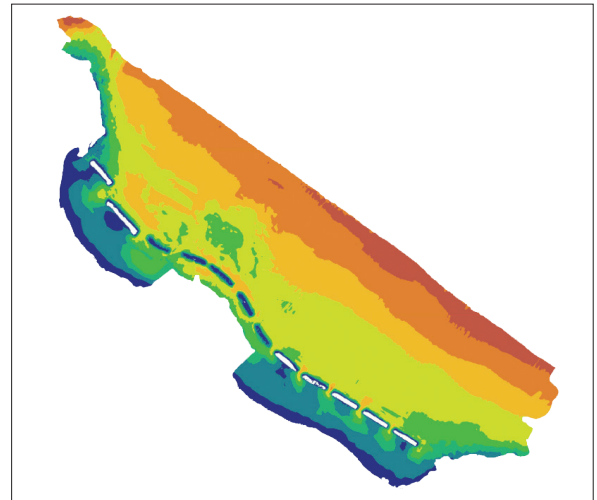
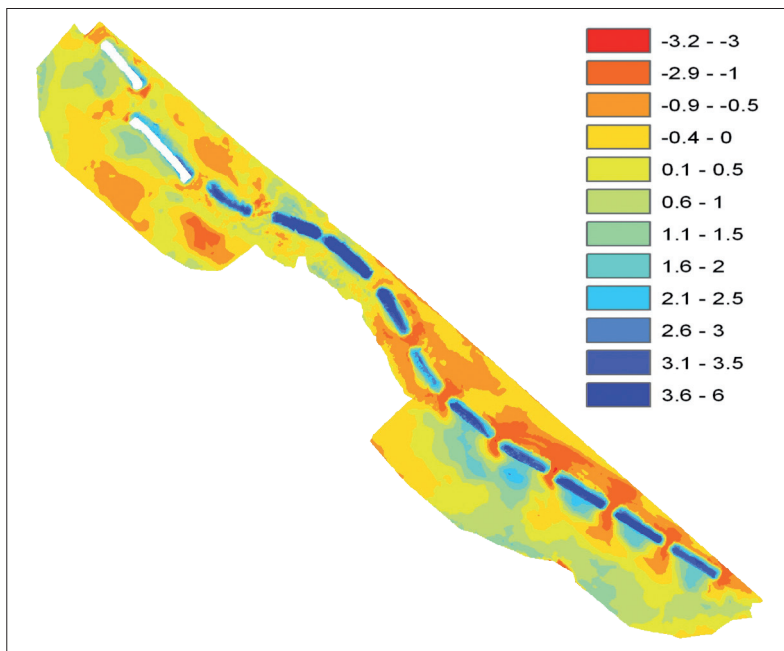


Figura 7b - Rilievo batimetrico del 2008.

sud, il fondale degrada fino a quota -2 m s.l.m. per poi risalire a -1.5 m nella zona immediatamente a ridosso delle barriere; oltre le barriere l'andamento del fondale marino presenta profondità crescenti da -4 m fino alla batimetrica a quota -7 m s.l.m. posta ad una distanza media dalla linea di riva di circa 530 m.

Dal confronto tra i rilievi batimetrici del 2001 e del 2008 (Fig. 8) si evince che la realizzazione delle barriere ha sensibilmente modificato



la morfologia della spiaggia sommersa; dall'analisi della figura si può osservare, infatti, lo sviluppo di significativi accumuli di sabbia immediatamente a ridosso delle barriere (lato riva), che hanno determinato l'innalzamento del fondale da circa -3.5 m a -1.5 m. Si evidenzia, inoltre, la presenza dei tipici fenomeni morfologici indotti dalle barriere emerse (Fredsoe e Sumer, 1997; Sumer e Fredsoe, 2000, Sumer et al., 2005; Aminti e Cappietti, 2005), ovvero la presenza delle fosse di erosione, della tipica forma a lingua di fiamma, ai varchi delle scogliere in corrispon-

Figura 8 - Differenza di quota (in metri) tra il rilievo del 2008 e del 2001.

denza dei quali si sono verificati approfondimenti di entità consistente (fino ad un massimo di 3.5 m), raggiungendo il substrato roccioso che in quella zona si incontra ad una profondità di circa 7 m.

Nella zona settentrionale del litorale esaminato, durante lo stesso periodo, il fondale non ha subito variazioni significative; si può solo segnalare una lieve tendenza all'erosione di tutta l'area in contrasto con un certo accumulo di sedimenti immediatamente a ridosso delle vecchie barriere emerse di fronte a lido Colonna.

L'evoluzione dei fenomeni sopra descritti, negli anni intermedi tra il 2001 ed il 2008, si può desumere dall'analisi comparativa delle mappe di tutti i rilievi disponibili, che qui si omettono per brevità. Già nel 2003, a pochi mesi dall'ultimazione dei lavori di realizzazione delle barriere emerse, si osservava la presenza delle fosse di erosione ai varchi ed un innalzamento dei fondali nella parte sottoflusso. Nel 2006 le zone di erosione si erano accentuate, soprattutto a largo delle scogliere e nei varchi, dove si registrava una variazione di quota del fondale compresa tra -1 e -3 m. A tergo delle barriere, invece, si registrava un innalzamento generalizzato delle quote tanto da non consentire spesso nemmeno l'esecuzione dei rilievi, vista la profondità insufficiente per la navigazione. Anche in questo caso, quindi, è stata confermata la tendenza dei sedimenti ad accumularsi a tergo delle barriere emerse. Infatti, nei brevi tratti in cui è stato possibile effettuare le misure di profondità si sono riscontrati innalzamenti dell'ordine dei 2 m.

Nell'area centrale, interessata dalla costruzione delle barriere sommerse, la profondità dei fondali del lato sottoflusso delle opere, sempre al 2006, era paragonabile a quella riscontrata dal lato sopraflusso, probabilmente a causa dello scarso rifornimento di materiale sciolto in un'area caratterizzata da fondali essenzialmente rocciosi. Nell'anno successivo è stata riscontrata una sostanziale stabilità di tutto il fondale, con variazioni massime di 50 cm. In particolare, nelle zone dei varchi il fondale non ha subito variazioni in quanto già nel 2006 l'escavazione aveva raggiunto il substrato roccioso posto a quota -7 m.

Analisi morfologiche

Nel 2006 e nel 2008 sono state condotte alcune indagini morfologiche, con l'ausilio di *side scan sonar*, per identificare e valutare la morfologia del fondale marino (sabbia, ghiaia, roccia, fango, posidonia cymodocea, ecc.).

Il rilievo condotto nel 2008 (Fig. 9) si estende verso il largo fino ad una distanza massima di 600 m, con profondità che vanno da 1 a 7 m. L'area rilevata si presenta nella zona più a largo ricoperta per la maggior parte da sabbia su cui è insediata la *Cymodocea nodosa*, indicata dal colore verde.

La zona a nord e la zona centrale si distinguono per la presenza di roccia affiorante a ridosso delle barriere, ma la continuità dell'affioramento è interrotta da una fascia limoso-sabbiosa, posta sottoflusso alle due barriere emerse ed indicata dal colore marrone.

Nella zona più a sud, dove sono state realizzate le barriere emerse, il fondale risulta ricoperto prevalentemente da sabbia ad eccezione dei varchi, in cui, per effetto dell'erosione associata all'intensità delle correnti, si osserva, come detto, la presenza di affioramenti rocciosi.

Al piede delle barriere sono stati rilevati vari blocchi disarticolati lungo tutto il perimetro delle opere e prevalentemente in corrispondenza dei varchi.

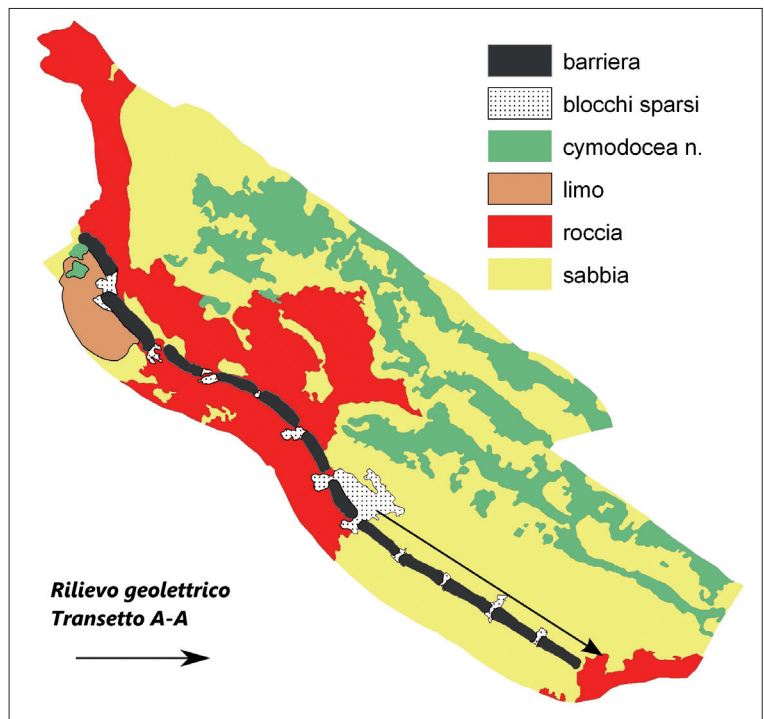


Figura 9 - Rilievo morfologico del 2008.

Lungo il tratto di mare in esame, nel 2006 è stato condotto anche un rilievo geoelettrico per la mappatura del profilo del fondale sia nella zona protetta che al largo delle strutture (Fig. 9). I dati di resistività apparente sono stati raccolti utilizzando un georesistivometro, configurato con 16 elettrodi spazati di un metro, accoppiato ad un sistema DGPS per il posizionamento. La ricostruzione della sequenza stratigrafica del fondale ottenuta dall'analisi delle tomografie ha permesso di individuare un primo strato di materiale sciolto sabbioso-limoso di deposito nelle zone di accumulo sia all'interno dell'area protetta sia immediatamente al di fuori delle barriere (Fig. 10), seguito da materiale roccioso decisamente più resistivo che si trova sotto lo strato sabbioso ad una profondità che si aggira sui 7 m.

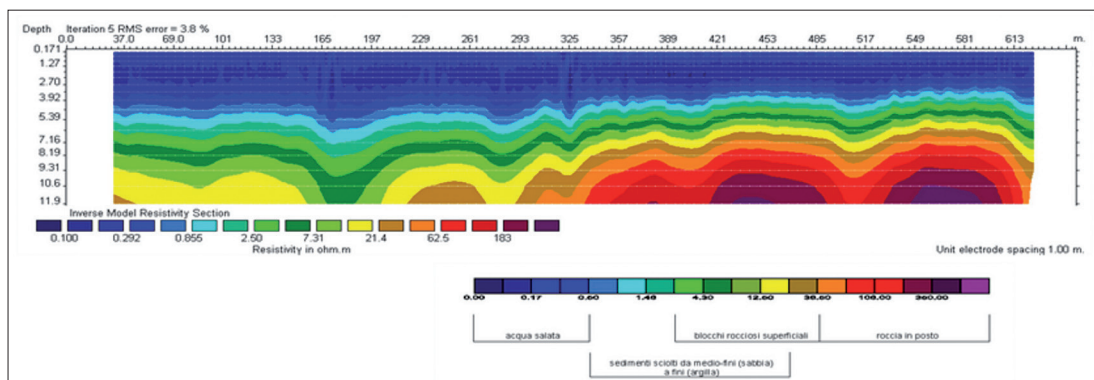


Figura 10 - Stratigrafia del fondale in corrispondenza del transetto A-A.

Analisi sedimentologiche

I depositi affioranti lungo la falesia nel tratto di costa in esame, secondo i dati riportati nella cartografia ufficiale ed in letteratura, sono costituiti dai calcari del Cretaceo inferiore della formazione del Calcare di Bari su cui trasgrediscono coperture di esiguo spessore e/o lembi residui, di sedimenti arenaceo-calcarenitici marini litorali del Pleistocene, disposti in terrazzi (Caldara et al., 2011).

Per la caratterizzazione granulometrica e mineralogica dei sedimenti della spiaggia emersa e del fondale sono state condotte due campagne di prelievi effettuate nel 2006 e nel 2008 negli stessi punti.

I campionamenti sono stati realizzati tramite sassola sulla spiaggia emersa, e tramite benna mordente tipo “Van Veen” nella parte sommersa, in modo da assicurare la migliore penetrazione sui fondali marini a litologia prevalentemente sabbiosa; nelle due campagne effettuate, i campioni di sedimenti sono stati prelevati negli stessi punti (Fig. 11).

Per la classificazione dei sedimenti in base al diametro è stata adottata la scala phi (φ) (Krumbein, 1934).

Da un primo confronto tra i dati relativi alle due campagne di rilievo si osserva innanzitutto che dal 2006 al 2008 la profondità nei punti di campionamento è mediamente diminuita. Come si può notare dalla Figura 12, infatti, i punti in blu rappresentativi dei campioni prelevati nel 2008 sono collocati mediamente a quote inferiori rispetto ai punti in rosso corrispondenti ai campioni del 2006.

I sedimenti prelevati nel 2006 presentano una distribuzione piuttosto regolare, con valori di φ che vanno da poco più di 1.5 a 3.0, valori corrispondenti alla granulometria di sabbie da medie a fini.

I risultati delle analisi effettuate sui campioni prelevati nel 2008 hanno espresso un valore mediamente più alto del parametro φ (tra 2.0 e 3.5), e quindi un valore minore del diametro medio dei sedimenti, che è inversamente proporzionale a φ ; ciò indica che i campioni prelevati nel 2008 presentano una percentuale maggiore di sabbie fini o molto fini.

Dall'analisi della Figura 12 si può inoltre osservare la diretta correlazione tra il diametro e la quota dei sedimenti (Inman, 1953). In entrambe le campagne di prelievo, infatti, è risultato che i sedimenti di maggiori dimensioni si trovano sulla spiaggia emersa, con valori di φ poco superiori a 2 (sabbie fini), mentre le particelle più piccole sono posizionate a profondità sempre maggiori, con valori di φ superiori a 3 nella zona di sedimentazione a ridosso delle barriere.

Su alcuni dei campioni prelevati durante le campagne effettuate nel 2006 e nel 2008 sono state condotte

anche delle analisi mineralogiche per diffrazione rX; in particolare sono stati analizzati alcuni campioni prelevati sulla spiaggia emersa.

Nelle Figure 13a, 13b e 13c sono riportati i dati relativi alla composizione percentuale di minerali, nei campioni prelevati nel 2006. I componenti mineralogici principali determinati sono: quarzo, carbonati e feldspati (k-feldspato e plagioclasti).

I feldspati costituiscono una frazione poco significativa dei campioni esaminati, così come la mica (fillosilicati in generale) risulta molto scarsa o assente.

Nel campione n. 3 significativa è la presenza di aragonite, sicuramente di origine organogena (bioclasti). Le particelle carbonatiche che si accumulano sul fondo dei mari attuali sono costituite da calcite, calcite arricchita in magnesio (Mg-calcite) e aragonite. Nel campione n. 3, quindi, calcite e aragonite hanno la stessa origine organogena; sommando le percentuali di calcite e aragonite presenti nella composizione del campione n. 3 si ottiene un valore simile alla percentuale di carbonati riscontrato nei campioni n. 9 e n. 16.

La Figura 13c si riferisce ad un campione prelevato sulla spiaggia più a sud del tratto di litorale esaminato, nella zona in cui sono state realizzate le barriere emerse; si nota la mancanza di mica ed un notevole aumento della percentuale di quarzo rispetto ai campioni prelevati più a nord.

I campioni prelevati nel 2008 sono costituiti principalmente da quarzo, feldspati e carbonati (Figg. 14a e 14b). Questi costituenti sono prodotti dall'azione del moto ondoso e delle correnti costiere che provocano lo smantellamento della falesia.

Il campione n°16 è costituito per più di un quarto da carbonati (28%). Come anticipato, i carbonati sono formati per lo più da bioclasti integri e in frammenti trasportati sul fondo marino. Rispetto al campione n. 3 prelevato nella zona più a nord, risulta una minore percentuale di feldspati a favore di un aumento

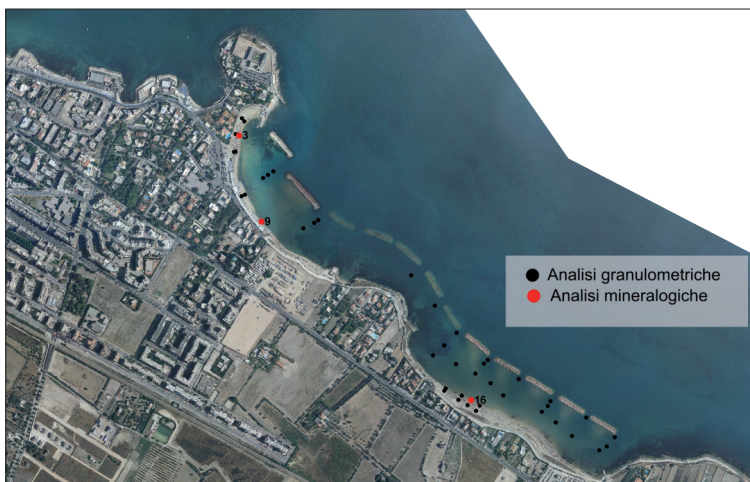


Figura 11 - Ubicazione dei campioni.

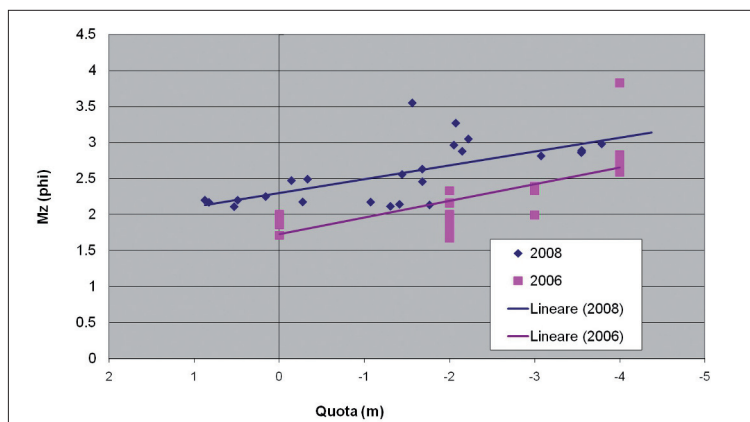


Figura 12 - Relazione tra la profondità e ϕ .

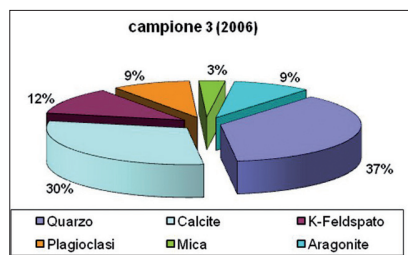


Figura 13a - Campione n. 3 prelevato nel 2006.

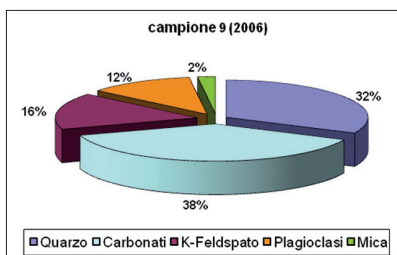


Figura 13b - Campione n. 9 prelevato nel 2008.

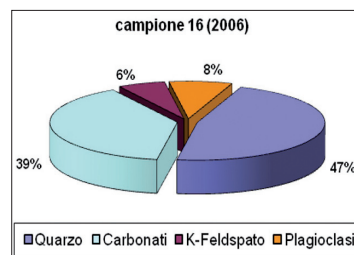


Figura 13c - Campione n. 16 prelevato nel 2006.

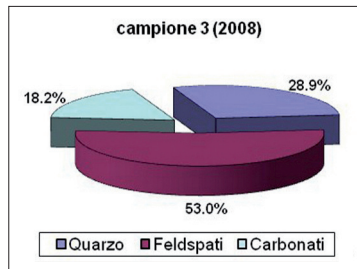


Figura 14a - Campione n. 3 prelevato nel 2008.

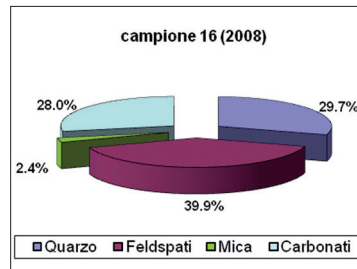


Figura 14b - Campione n. 16 prelevato nel 2008.

di quella di carbonati. Sempre rispetto al campione n. 3 si nota la presenza di mica che, tuttavia, si attesta su una percentuale (2.4%) poco significativa, al limite della rilevabilità per via diffrattometrica.

Confrontando i risultati delle analisi mineralogiche sui campioni prelevati rispettivamente nel 2006 e nel 2008, i dati più evidenti sono la diminuzione dei carbonati ed il considerevole aumento di feldspati (k-feldspato e plagioclasti), che costituiscono quasi la metà della costituzione mineralogica dei campioni più recenti.

gioclasti), che costituiscono quasi la metà della costituzione mineralogica dei campioni più recenti.

Conclusioni

Dagli studi condotti sul tratto di costa a sud di Capo Colonna è emerso che, a seguito della costruzione delle barriere emerse e sommerse, realizzate rispettivamente nel 2002 e nel 2004, il litorale in esame ha fatto registrare un significativo ripascimento. Nel periodo antecedente la realizzazione delle opere di protezione, infatti, si era verificata una quasi completa scomparsa dell'arenile; tale situazione aveva compromesso la stabilità stessa della falesia retrostante esponendola a fenomeni di crollo che si sono verificati in varie circostanze. L'effetto delle barriere è stato, quindi, quello di ridurre i pesanti fenomeni di erosione presenti e di favorire la formazione di un arenile a protezione del piede della falesia retrostante la spiaggia.

L'evoluzione del litorale in seguito all'entrata in esercizio delle opere di protezione è stata studiata in dettaglio tramite l'analisi di dati ricavati da rilievi topografici, batimetrici, morfologici e sedimentologici. L'indagine si è estesa ad un periodo che va dal 2001 al 2008.

Lo studio, in particolare, dell'evoluzione della spiaggia emersa, effettuato sulla base del confronto delle linee di riva, ha mostrato che il litorale ha avuto un avanzamento della linea di riva durante tutto il periodo di osservazione.

I fondali monitorati, come risulta dalla campagna di rilievo morfologico con side scan sonar effettuata, sono caratterizzati dalla presenza di sedimenti sabbiosi con granulometria fine e media su di un substrato di roccia calcarea.

L'analisi dei rilievi batimetrici ha evidenziato i tipici problemi indotti dalla realizzazione delle barriere di protezione, tra i quali, l'erosione profonda in corrispondenza dei varchi tra le scogliere e l'aumento del tasso di sedimentazione nella zona sottoflusso.

Attraverso le indagini sedimentologiche, infine, è stata riscontrata una diminuzione della granulometria che, come ci si poteva attendere, comporta una variazione della mineralogia dei sedimenti. Notoriamente, la componente bioclastica tende ad aumentare con la granulometria mentre, fra i silicoclasti, i feldspati tendono ad aumentare col diminuire della granulometria; queste comuni modificazioni della mineralogia sono ben riflesse dal confronto tra i campioni 2006 (sabbie medie e fini) e i campioni 2008 (sabbie fini e molto fini).

Ringraziamenti

Gli autori desiderano ricordare il prof. Antonio Giuliani che ha incoraggiato e seguito tutte le fasi della ricerca. Si ringrazia inoltre il prof. Renzo Valloni per l'utile discussione.

Bibliografia

- Aminti P.L. e Cappiotti L. (2003) - *Sea Bottom Scour Near Gaps in Coastal Protection Structures*. Atti MedCoast 03 International Conference, Ravenna.
- Caldara M., Iannone A., Lopez R. e Simone O. (2011) - *Il litorale di Trani (Mar Adriatico, Puglia): un esempio di geodiversità da tutelare*. Geologia dell'Ambiente, Supplemento al n.2/11: 79-92.
- De Girolamo P. e Contini P. (1998) - *Impatto morfologico di opere a mare: casi di studio*. VIII Convegno AIOM, Lerici.

- Fredsøe J. e Sumer B.M. (1997) - *Scour at the head of a rubble mound break water*. Coastal Engineering, 29: 201-230.
- Krumbein W.C. (1934) - *Size frequency distributions of sediments*. J. Sed. Research, 4: 65-77.
- Sumer B.M. e Fredsøe J. (2000) - *Experimental study of 2D scour and its protection at a rubble-mound break-water*. Coastal Engineering, 40: 59-87.
- Inman D.L. (1953) - *Areal and seasonal variations in beach and nearshore sediments at LaJolla, California*. Beach Erosion Board Tech. Memo. No.39, Coastal Engineering Research Center, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS, 121.
- Sumer B.M., Fredsøe J., Lamberti A., Zanuttigh B., Dixen M., Gislason K. e Di Penta A. (2005) - *Local scour at roundhead and along the trunk of low crested structures*. Coastal Engineering, 52: 995 - 1025.
- Thieler E.R., Himmelstoss E.A., Zichichi J.L. e Ergul A. (2009) - *Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 4.0-An ArcGIS extension for calculating shoreline change*. U.S. Geological Survey Open-File Report 2008-1278.
- Vallario A. (1995) - *Proposte di ripristino, utilizzazione e restituzione all'ambiente delle aree degradate dall'attività estrattiva*. Atti Convegno-Dibattito "Cave e coste nel territorio del Nord-Barese - Problematiche ambientali". Trani.

Ricevuto il 03/05/2011, accettato il 01/06/2011.

Studi sedimentologici idonei alla sperimentazione di opere marittime soffolte atte a contrastare l'insabbiamento del porticciolo di Genova Nervi

Giorgio Berriolo¹, Paola Bocca², Nicola Corradi³, Marco Ferrari³

¹Via Aurelia, 153 - 17028 Spotorno (SV)

²A.S.Ter. Azienda Servizi Territoriali Genova S.p.A., Via XX Settembre, 15 - 16121 Genova

³DISTAV - Università degli Studi di Genova, Corso Europa, 26 - 16132 Genova

Riassunto

In questo lavoro sono presentati i risultati di un'indagine sedimentologica svolta presso il porticciolo di Genova Nervi finalizzati alla sperimentazione di strutture idonee a contrastare il fenomeno di insabbiamento dello specchio d'acqua.

La necessità di preservare l'elevato pregio paesaggistico della costa entro la quale l'“Approdo Minore” è inserito, ha indotto il Comune di Genova a finanziare uno studio sedimentologico finalizzato a determinare i flussi di sedimento all'interno ed all'esterno dello specchio d'acqua, indirizzato ad individuare i meccanismi responsabili dell'insabbiamento del porticciolo ed a fornire dati idonei a progettare e sperimentare strutture a basso impatto, idonee ad intercettare i sedimenti responsabili del fenomeno.

Le analisi tessiturali dei sedimenti e l'elaborazione degli indici sedimentologici hanno indicato come solo in parte il fenomeno dell'insabbiamento sia imputabile agli apporti del corso d'acqua che sfocia all'interno della struttura portuale. I maggiori accumuli sono invece attribuibili agli apporti marini. Lo studio ha evidenziato come sui fondali dello spazio portuale non siano presenti sedimenti con dimensioni superiori a 2Φ (<0.25 mm). Presumibilmente quest'area è soggetta ad una azione delle agitazioni ondose relativamente intense, che allontanano verso il largo le frazioni meno stabili. Infine è stato possibile definire come la fascia di fondo mobile all'esterno del porto, sia costituita dai sedimenti che concorrono all'insabbiamento e questa risulti essere compresa entro la batimetrica dei 12 metri.

Nella scelta progettuale delle strutture idonee a contrastare l'insabbiamento del porto, si è prevista la realizzazione e la posa, in alternativa ai classici i moli guardiani, di setti sommersi in calcestruzzo prefabbricato, decisamente meno impattanti, in grado di intercettare il flusso dei sedimenti con tessiture medie di 2Φ (0.25 mm) o inferiori in ingresso al porto. I sedimenti con tessiture inferiori, che potrebbero oltrepassare in sospensione l'opera di difesa, risulterebbero comunque instabili all'interno del bacino portuale. L'applicazione di queste strutture per contrastare i fenomeni d'insabbiamento di aree portuali, costituisce una novità. Gli auspicati monitoraggi dovranno essere eseguiti consentiranno di verificare l'efficacia di questo intervento.

Parole chiave: strutture portuali, insabbiamento, analisi tessiturali, indici sedimentologici, deriva litoranea, setti sommersi.

Abstract

In this article we present the results of a sedimentological study of the port of Nervi (Genoa, Liguria, Italy) and we describe the experimental intervention carried out to combat its silting up.

Textural analyses and the determination of sedimentological parameters established that the silting was only partially due to the solid supply of the stream that empties into the port and that the significant sedimentary accumulations were attributable to marine supply. The study also revealed that there were no sediments of more than 2Φ (<0.25 mm) in diameter in the port area, which it can, therefore, be assumed is subject to relatively intense wave action which washes away the finer, less stable fraction. The study also determined that the bottom area affected by silting had a bathymetry of less than 12 m.

In planning structures to combat the silting it was also necessary to bear in mind that the port is situated in an area of environmental importance. It was, therefore, decided to eschew a classical structure of breakwaters, in favour of a line of less invasive, submerged concrete groins. It is presumed that the use of this type of structure to combat silting phenomena is a first.

In this specific case the structures, positioned at the port entrance, will block sediments with a diameter of 2Φ (0.25 mm) or less. Finer sediments, which can pass over the defence works are unstable and will be washed away, as revealed by the sedimentological analyses.

Keywords: port structures, silting, textural analyses, sedimentological indices, littoral drift, submerged concrete barriers.

Introduzione

Le indagini tessiturali sono uno strumento utilizzato in Sedimentologia per contribuire alla definizione dei processi che caratterizzano un deposito (Inman, 1952; Pettijohn, 1957; Shepard, 1963; Folk, 1968; Krumbein e Sloss, 1963) e ricavare informazioni sulle modalità di trasporto, di deposizione e sull'idrodinamismo dell'agente di trasporto (Mason e Folk, 1958; Folk e Ward, 1957; Folk, 1966). Analogamente mediante l'utilizzo dei parametri statistici sedimentologici è possibile distinguere depositi di differente provenienza (Krumbein, 1941; Friedman, 1961), ed acquisire ulteriori informazioni sull'idrodinamismo della zona (McLaren e Bowles, 1985).

In questo lavoro le indagini tessiturali sono applicate alla definizione dei meccanismi di trasporto responsabili dell'insabbiamento del porto di Nervi (Genova).

L'insabbiamento è un problema che spesso interessa le strutture portuali ed è essenzialmente riconducibile ai fenomeni di dinamica sedimentaria che interessano l'ambiente costiero sviluppati dai processi marini quali correnti di marea e moto ondoso. Questo fenomeno può raggiungere differenti intensità in relazione alla morfologia del sito d'insediamento della struttura ed alla tipologia di costruzione delle opere, all'intensità dell'azione del mare ed ai quantitativi di sedimento disponibili.

Le modalità d'intervento più comunemente utilizzate per contrastare i problemi dell'insabbiamento consistono nel predisporre strutture trasversali, definite moli guardiani, in grado d'intercettare il sedimento trasportato dagli agenti marini prima che questi giungano in prossimità dell'imboccatura portuale. Questa tipologia d'intervento è economicamente onerosa e presenta l'ulteriore svantaggio di avere un notevole impatto sull'assetto paesaggistico dell'area, quindi risulta di difficile applicazione in contesti di particolare pregio naturalistico come ad esempio quello oggetto di studio.

L'obiettivo che si pone questo studio è quello di caratterizzare i fondali interni alla struttura e dello specchio acqueo antistante, definirne l'assetto dinamico sedimentario, allo scopo di comprendere i meccanismi che determinano i fenomeni d'insabbiamento, e conseguentemente presentare la soluzione progettuale adottata costituita da setti in calcestruzzo prefabbricato. Queste strutture, sperimentate con successo presso i laboratori Sogreah (Berriolo e Sirito, 1973) e successivamente utilizzate nelle opere di difesa litorale, permettono d'intercettare il flusso sedimentario di fondo. Hanno costi contenuti ed offrono il vantaggio che, essendo sommerse, sono completamente invisibili e quindi non modificano l'aspetto del paesaggio. Inoltre, grazie alle loro ridotte dimensioni, il loro impatto sui fondali è limitato.

Descrizione dell'area

L'area d'indagine (Fig. 1) è inserita all'interno dell'unità fisiografica compresa tra l'estremo di levante del porto di Genova e P.ta Chiappa, estremo occidentale del promontorio di Portofino (Fierro et al., 1989). Questo tratto costiero, che coincide con parte del *waterfront* della città di Genova, risulta fortemente condizionato dall'urbanizzazione, esso è comunque identificabile come una costa alta rocciosa, con spiag-

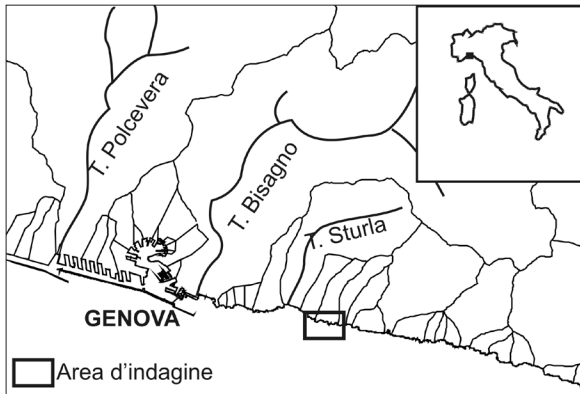


Figura 1 - Area d'indagine.

Il porticciolo turistico di Genova Nervi, definito come approdo minore e classificato “Porto pubblico di II categoria IV classe”, si colloca geograficamente nel settore orientale della città di Genova; esso è costituito da un molo principale disposto con andamento W – E che si appoggia alla falesia rocciosa posta ad occidente, ed è inserito in una piccola insenatura, dove sfocia l'omonimo torrente. Al suo interno è presente una piccola spiaggia ghiaioso ciottolosa. Recentemente lungo l'asta del corso d'acqua sono stati effettuati interventi mirati all'intercettazione del trasporto solido mediante vasche di decantazione, che hanno annullato gli apporti solidi all'interno del porticciolo mitigando gli effetti d'insabbiamento.

Esposizione marittima

L'area d'indagine è esposta essenzialmente alle ondatazioni provenienti dai settori meridionali. Il libeccio, che risulta essere il mare regnante e dominante, è caratterizzato da un *fetch* geografico superiore a 800 km con altezze massime d'onda al largo anche superiori ai 5 metri. Lo scirocco con *fetch* geografico di 200 km presenta altezze d'onda massime di circa 4.5 metri; ed infine il settore di mezzogiorno, subordinato ai precedenti, con *fetch* geografico di circa 180 km ed altezze d'onda massime ancora minori. In tabella 1 sono riportate le caratteristiche del moto ondoso relative alle due traversie principali (AA.VV., 2004; Ferrari et al., 2006; Corradi et al. 2008). Quindi la dinamica sedimentaria dell'area risulta condizionata essenzialmente dalle ondatazioni di SW che determinano un flusso detritico principale rivolto verso E, mentre alla traversia di SE è imputabile una deriva sedimentaria secondaria con verso opposto.

Poiché, rispetto al porticciolo di Nervi le discariche precedentemente citate sono poste sopraflutto rispetto alla deriva principale, esse concorrono ancora oggi ad incrementare gli scarsi apporti sedimentari naturali che sono causa dell'insabbiamento del porticciolo.

Tabella 1 – Caratteristiche del moto ondoso (T_R = tempo di ritorno; H_s = altezza significativa dell'onda al largo; T_0 = periodo dell'onda).

T_R (anni)	SW (Libeccio)		SE (Scirocco)	
	H_s (m)	T_0 (sec.)	H_s (m)	T_0 (sec.)
1	2,5	7,5	1,5	5
10	3,60	9,36	3,00	8,53
20	3,98	9,83	3,30	8,95
30	4,38	10,32	3,60	9,35
50	4,71	10,70	4,00	9,86
100	5,1	11,13	4,50	10,45

L'escursione di marea è di modesta entità, generalmente inferiore a 30 cm (Papa, 1974; Papa, 1978), quindi ininfluenza a condizionare la dinamica sedimentaria costiera; l'azione del moto ondoso, al contrario, risulta fondamentale per i processi di trasporto dei sedimenti.

Materiali e metodi

Le indagini sono state condotte nel settembre 2003, hanno previsto la realizzazione di una campagna batimetrica eseguita con ecoscandaglio *singlebeam* a doppia frequenza con posizionamento GPS differenziale ed il prelievo di campioni di sedimento, mediante benna Van Veen, sia nello specchio acqueo interno che nel tratto di mare antistante le strutture, fino ad una profondità massima di circa 12 metri (Fig. 2).

Le analisi granulometriche sono state eseguite mediante setacciatura a secco, utilizzando la scala di Wenworth (1922) a $\frac{1}{2}\Phi$ e ricavando i principali indici sedimentologici secondo le metodiche indicate da Folk (1966). La determinazione dei "vettori di trasporto" è stata effettuata utilizzando la metodologia proposta da Gao e Collins (1992). Questa tecnica è basata sulle variazioni spaziali dei parametri statistici dimensionali Media (MZ), Classazione (σI) e Skewness (SKI) ed offre risultati più affidabili dei metodi che si basano sull'analisi di un singolo parametro. L'elaborazione è stata effettuata, utilizzando il software elaborato da Gao (1996). Infine le modalità di movimento dei sedimenti, su una sezione rappresentativa dell'area oggetto di studio, sono state desunte mediante il diagramma di Shields (1936), modificato da Madsen e Grant (1976).

Risultati

Dinamica Sedimentaria

I sedimenti che costituiscono il fondale sono riferibili, secondo la classificazione di Folk e Ward (1957), essenzialmente alle ghiaie o alle sabbie, con l'eccezione di pochi campioni appartenenti ai campi intermedi (ghiaie sabbiose e sabbie ghiaiose). La frazione pelitica risulta essere trascurabile praticamente su tutti i campioni sia interni che esterni al porticciolo.

Le analisi dimensionali permettono di distinguere un primo settore caratterizzato da sedimenti prevalentemente ghiaiosi situato in prossimità della foce del corso d'acqua; gli istogrammi di frequenza delle frazioni granulometriche indicano che questa distribuzione è riferibile a depositi alluvionali di dimensioni grossolane e con istogrammi bimodali caratteristici dei sedimenti torrentizi (Krumbein, 1941). Altri depositi di elevate dimensioni sono situati nei fondali posti ai piedi della falesia e del molo frangiflutti. Questi indicano chiaramente la notevole azione di riflessione del moto ondoso provocata dalle pareti rocciose e dalla struttura portuale che non consentono il deposito delle frazioni fini che si allontanano per deriva.

Le mappe di distribuzione ottenute utilizzando gli indici sedimentologici Media, Classazione e Asimmetria chiariscono ulteriormente la dinamica sedimentaria che caratterizza l'area d'indagine. Le distribuzioni permettono di definire all'interno del porticciolo due aree con sedimenti di diversa provenienza e di una terza con caratteri intermedi. La prima individuabile nella parte più interna in prossimità del corso d'acqua è riferibile agli apporti alluvionali, poiché presenta elevate dimensioni (Fig. 3), una mediocre classazione (Fig. 4) e valori positivi dello Skewness (Fig. 5); parametri che indicano chiaramente una scarsa elaborazione del sedimento tipica di depositi caotici quali quelli torrentizi (Friedman, 1967). La seconda è situata nella parte più prossima all'imboccatura portuale, nella zona centrale e nelle adiacenze del molo; in questa zona sono presenti sedimenti ben classati o moderatamente ben classati, con asimmetria negativa e tessiture riferibili alle sabbie medie; quindi depositi che hanno subito un maggior rimaneggiamento e riconducibili ad un agente deposizionale di tipo marino (Friedman, 1967). La terza area situata tra le due precedenti e con andamento irregolare è caratterizzata da dimensioni medie riferibili alle sabbie medie e grossolane, elevata classazione e valori pressoché prossimi a zero dello skewness; questi sono presumibilmente sedimenti appartenenti all'ambiente marino mescolati con gli apporti alluvionali.

Inoltre si evidenzia come nel porticciolo non siano presenti sedimenti con granulo medio maggiore a 2Φ (<0.25 mm). Questa situazione fa supporre che anche la zona protetta dalla struttura portuale sia interessata dalle agitazioni ondose più intense che elaborano il sedimento allontanando le frazioni più fini.

Nei fondali antistanti il porticciolo le frazioni grossolane situate ai piedi del molo frangiflutti e della falesia sono scarsamente classati e con Skewness positivo, cioè confermano chiaramente i fenomeni riflettivi indotti dalla strutture rigide che rendono instabili le frazioni meno competenti e le allontanano.

Le frazioni meno competenti, superiori a 2Φ (<0.25 mm), presentano una discreta classazione e valori positivi dello Skewness; questi sedimenti sono invece distribuiti in una fascia che si sviluppa, in prossimità della bocca d'ingresso e si dirige verso il largo con direzione NNE-SSW; essa è interpretabile come la via preferenziale di dispersione verso il largo di questi sedimenti provenienti dal porticciolo.

La distribuzione della classe modale 2Φ (0.25 mm) mette bene in evidenza come l'accumulo sabbioso,

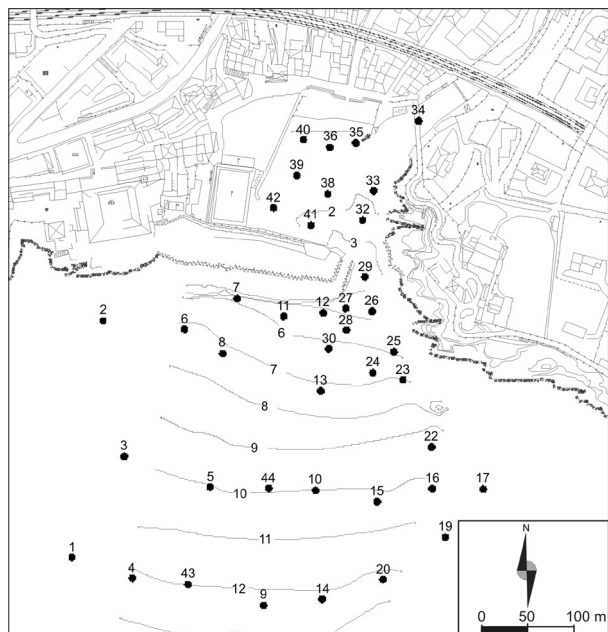


Figura 2 - Carta batimetrica dell'area d'indagine ed ubicazione dei punti di prelievo dei campioni di sedimento.



Figura 3 - Distribuzione dell'indice sedimentologico media (Mz).

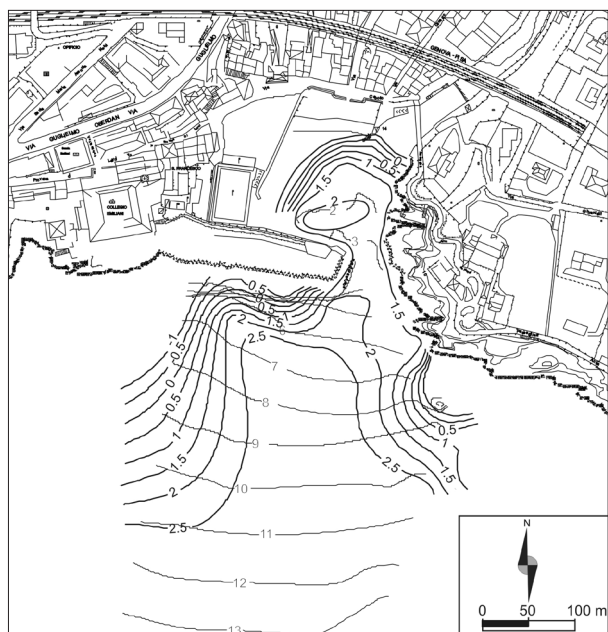


Figura 4 - Distribuzione dell'indice sedimentologico classificazione (σ_1).



Figura 5 - Distribuzione dell'indice sedimentologico Skewness (SK1).

situato nella zona centrale del porticciolo, precedentemente definito di origine marina, sia essenzialmente costituito da questa frazione (Fig. 6). La prevalenza di queste dimensioni è evidente in tutta l'area circostante l'imboccatura portuale, quindi si può supporre che le agitazioni ondose abbiano un'energia tale da operare una netta selezione sulle altre frazioni granulometriche, non solo nella zona di mare aperto ma anche nei settori protetti. I depositi alluvionali, al contrario, risultano scarsamente rappresentati da questa classe granulometrica, così come la fascia di fondali individuata come via di dispersione della frazioni più fini.

L'elaborazione dei vettori di trasporto, secondo la metodologia proposta da Gao e Collins (Fig. 7), evidenzia la direzione preferenziale di accesso nello specchio acqueo interno da parte dei sedimenti marini che risulta prevalentemente indirizzata verso il settore protetto dal molo foraneo. Inoltre, all'interno dell'area portuale, si osservano i vettori di dispersione verso il largo dei sedimenti medio fini.

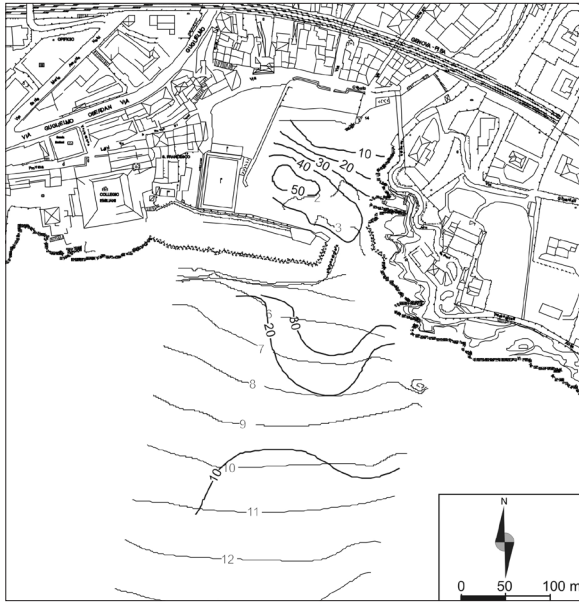


Figura 6 - Distribuzione percentuale della classe modale 2Φ (0.25 mm).



Figura 7 - Vettori di trasporto determinati secondo la metodologia proposta da Gao e Collins (1992).

Modalità di trasporto

Il diagramma di Shields modificato da Madsen e Grant (1976), è stato utilizzato allo scopo di individuare le profondità alle quali questi sedimenti non sono più movimentabili in sospensione e per trascinato, in relazione all'intensità del moto ondoso ed alle granulometrie che concorrono all'insabbiamento dell'area portuale. Il diametro medio delle particelle considerato è 2Φ (0.25 mm) corrispondente alle dimensioni minime del granulo medio dei sedimenti presenti nello specchio acqueo interno; ad esso sono state applicate due differenti agitazioni ondose (libeccio e scirocco) e per ognuna di esse sono state utilizzate le caratteristiche dell'onda con tempi di ritorno annuale e cinquantennale.

I valori limite per cui avranno luogo i fenomeni di sospensione o trasporto dei sedimenti con le dimensioni da noi adottate corrispondono a valori del parametro di Shields (θ) pari a:

$$\begin{aligned}\theta_{\text{limite sospensione}} &\approx 0.09 \\ \theta_{\text{limite trasporto}} &\approx 0.045\end{aligned}$$

La Figura 8 mostra i risultati ottenuti per le agitazioni considerate. Si può osservare in particolare che le ondate di scirocco con frequenza annuale sembrano essere in grado di portare in sospensione il sedimento solo entro la batimetria dei 2.5 metri ed il trasporto ha termine alla profondità di 5 metri; mentre la medesima agitazione, ma con frequenza cinquantennale, quindi decisamente più importante, mostra la presenza di fenomeni di risospensione fino a 10 metri e trasporto fino ai fondali di 18 metri. Il moto ondoso di libeccio con tempo di ritorno annuale determina la sospensione di questi sedimenti fino a circa 5 metri di profondità e può movimentare i medesimi fino a 10 metri; infine quest'ultime agitazioni con ricorrenza cinquantennale sviluppano fenomeni analoghi a quelli visti per le ondate di scirocco con gli stessi tempi di ritorno.

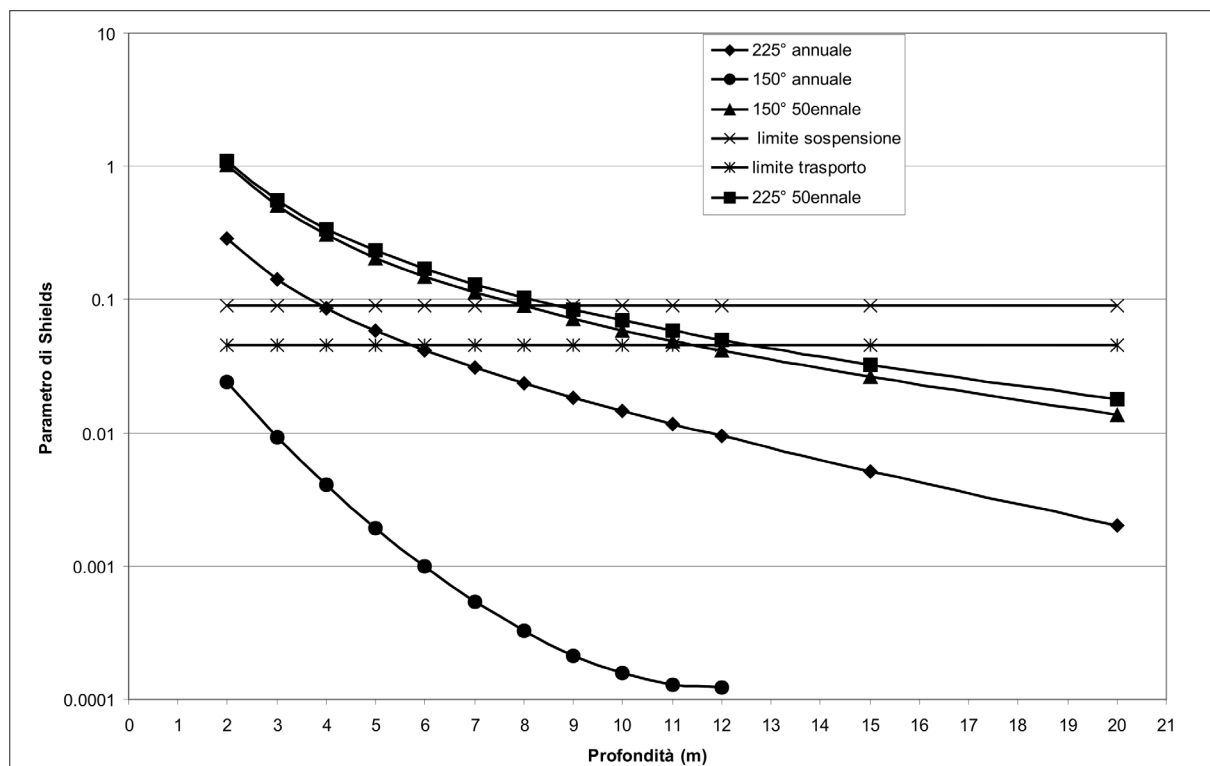


Figura 8 - Modalità di trasporto delle sabbie con dimensione 2Φ (0.25 mm) in relazione alle differenti agitazioni ondose.

Il progetto

L'ipotesi progettuale d'intervento si fonda essenzialmente su tre aspetti emersi dall'indagine:

- l'insabbiamento del porticciolo è causato principalmente dai sedimenti trasportati dal moto ondoso, gli apporti di origine torrentizia risultano limitati e confinati nel settore più prossimo all'apparato fociale;
- le dimensioni dei sedimenti trasportati dal moto ondoso sono riferibili alle sabbie con dimensioni medie 2Φ (0.25 mm), le tessiture inferiori risultano instabili all'interno della struttura;
- il movimento di questi sedimenti avviene principalmente per trascinamento sul fondo, il trasporto in sospensione si produce solo in presenza di mareggiate eccezionali.

Sulla base di queste considerazioni, è stato progettato e successivamente realizzato nell'inverno 2007, anziché una struttura classica quali i moli guardiani che risulterebbero di forte impatto ambientale, una costruzione decisamente meno invasiva costituita da due setti sommersi posti ai lati dell'imboccatura portuale. Queste strutture sono principalmente utilizzate nella difesa dei litorali come prosecuzione sommersa di opere trasversali. Esse hanno lo scopo principale di intercettare i sedimenti trasportati dal drift litoraneo e conseguentemente aumentare la stabilità della spiaggia sommersa. Questa tecnica è stata applicata negli interventi di recupero del litorale effettuati a Marina di Cecina (Aminti e Verzoni, 1993), sulle spiagge di Terracina, Latina, Sabaudia, Formia, Minturno e Fondi-Sperlonga in provincia di Latina (Berriolo, 1993). Interventi che hanno dimostrato l'effettiva efficacia di questa struttura (Cipriani et al., 1992; Berriolo, 1999; Ferri, 2008).

Queste opere, idonee all'intercettazione dei sedimenti, possono risultare scarsamente efficaci per i sedimenti trasportati in sospensione, ma risultano efficienti per quelli trasportati sul fondo. Nel nostro caso i sedimenti con dimensioni inferiori a 2Φ (0.25 mm) possono oltrepassare l'ostacolo costituito dal setto stesso ma sono instabili all'interno del porticciolo e conseguentemente si disperdono al largo.

I setti, realizzati in calcestruzzo prefabbricato ed a forma di T rovescia di altezza pari a 1.5 metri, sono stati posizionati in corrispondenza della diga foranea e della falesia, ad una profondità di 6.3 metri di profondità per

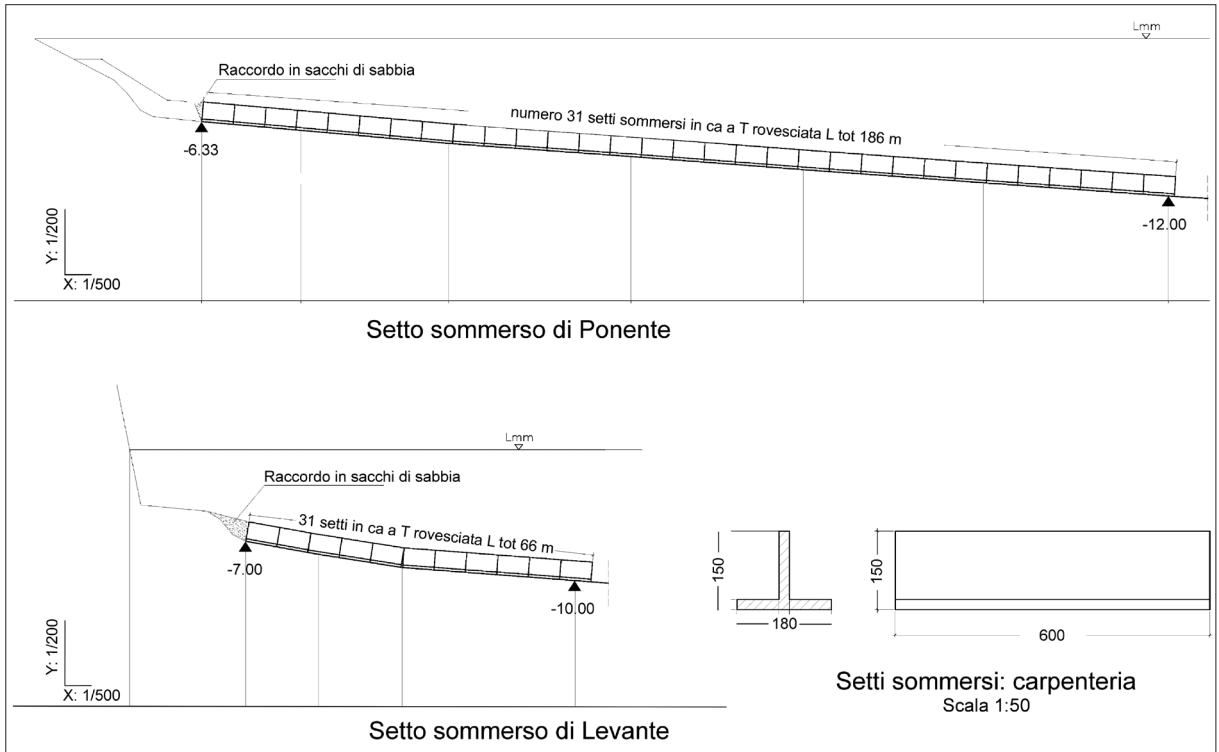


Figura 9 - Profili longitudinali e carpenteria dei setti sommersi (da A.S. Ter. mod.).

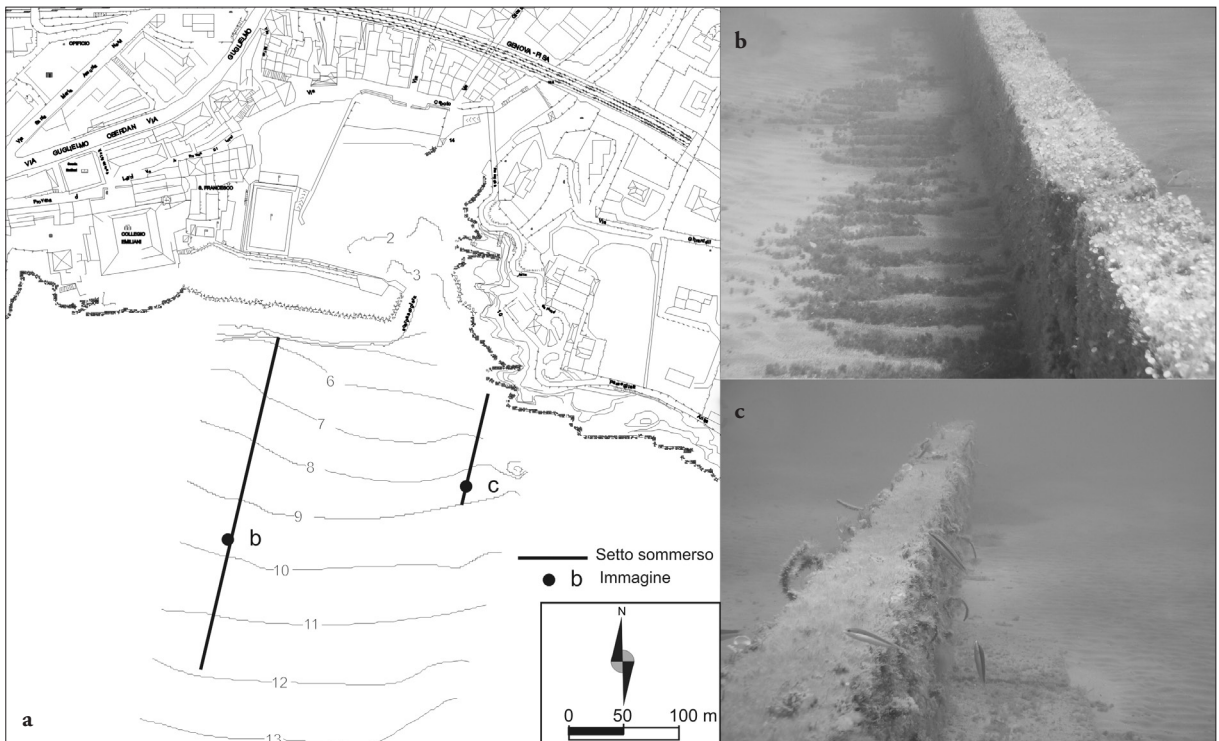


Figura 10 - Ubicazione delle strutture (a) e dettaglio del setto sommerso di ponente (b) e di levante (c); si osservi l'accumulo di sedimenti nel settore sopraflutto e la crescita algale dopo un anno dall'intervento (foto P. Campani – Nuova Idrocart).

il setto di Ponente ed a – 7 metri per quello di Levante con andamento perpendicolare alle isobate (Fig. 9). La loro estensione, calcolata in base allo studio, è di circa 200 metri cioè fino alla batimetrica dei 12 metri per il setto sommerso situato sul lato occidentale dell'imboccatura, di dimensioni inferiori (60 metri fino alla profondità di 10 metri) nel settore orientale; poiché il trasporto è ricollegabile al drift secondario di minor intensità (Fig. 10).

Conclusioni

Lo studio ha permesso di tracciare un quadro esauriente dell'assetto dinamico sedimentario dell'area indagata, e conseguentemente di spiegare i meccanismi che concorrono all'insabbiamento dello specchio portuale. Le indagini hanno permesso in primo luogo di individuare nello specchio acqueo interno la zona di deposizione dei sedimenti marini, che risultano caratterizzati da sabbie medie; inoltre è stata evidenziata la totale assenza della frazione inferiore a 2Φ (0.25 mm) all'interno della struttura portuale che evidentemente risulta instabile a causa dell'azione del moto ondoso.

Questa particolare situazione ha permesso di proporre un intervento sperimentale che offre il vantaggio di avere costi estremamente contenuti e di non avere alcun impatto paesaggistico ed ambientale. Quest'ultimo aspetto risulta essere particolarmente importante per l'area oggetto di studio, in quanto presenta delle emergenze geomorfologiche peculiari e di particolare interesse che un intervento con modalità classiche avrebbe sicuramente alterato.

I previsti rilievi di monitoraggio potranno determinare il grado di efficacia dell'opera che potrebbe costituire una soluzione estremamente valida per queste tipologie d'intervento specie nelle aree sottoposte a tutela di carattere ambientale.

Ringraziamenti

Si ringraziano l'Azienda Servizi Territoriali Genova S.p.A. (A.S.Ter.) ed il Comune di Genova per avere permesso l'utilizzo dei dati utilizzati in questa ricerca.

Bibliografia

- AA.VV. (2004) - *Wind and wave atlas of the Mediterranean sea. Western European Union, Western European Armaments Organisation Research Cell. Medatlas project*: 386 pp.
- Berriolo G. (1993) - *Interventi di riequilibrio delle spiagge della provincia di Latina*. In: Aminti e Pranzini "La difesa dei litorali in Italia". Edizioni delle Autonomie, Roma: 153-173.
- Berriolo G. (1999) - *L'intervento di riequilibrio della spiaggia di Fondi - Sperlonga*. Studi Costieri, 1: 33-41.
- Berriolo G. e Sirito G. (1973) - *Essais sur modél réduit de l'action de guides submergés sur le mouvement littoral du sable*. A.I.P.C.N.
- Aminti P., Verzoni M. (1993) - *Intervento di riequilibrio sul litorale di Cecina Mare*. In: Aminti e Pranzini "La difesa dei litorali in Italia". Edizioni delle Autonomie, Roma. 103-119.
- Cavallo C. e Ivaldi R. (2000) - *L'evoluzione storica del litorale di Genova attraverso due esempi caratteristici: Voltri e Albaro*. Atti Associazione Italiana di Oceanologia e Limnologia, 13: 279-288.
- Cipriani L.E., Dreni A.M., Pranzini E., (1992) - *Nearshore morphological and sedimentological evolution induced by beach restoration: a case study*. Bollettino di Oceanologia Teorica ed Applicata, X, N. 2-3-4: 279-295.
- Corradi N., Ferrari M., Schiaffino C.F. (2008) - *Evaluation of the effectiveness of a seasonal nourishment programme of the pocket beaches of the city of Genoa*. Chemistry and ecology vol. 24 suppl.1 215-223 pp.
- Ferrari M., Bollens S., Bozzano A., Fierro G., Gentile R. (2006) - *The port of Genoa - Voltri (Liguria, Italy): A case of updrift erosion*. Chemistry and Ecology, 22: 361-369.
- Ferri S. (2008) - *Risposta granulometrica della spiaggia in seguito alla costruzione di opere a mare*. Dottorato di Ricerca in Scienze della Terra XX Ciclo, Università degli Studi di Firenze, 234 pp.
- Fierro G., Piccazzo M., Corradi N., Cortemiglia G.C., Fanucci F., Firpo M. e Tucci S. (1989) - *Atlante delle Spiagge Italiane, Foglio 82 Genova*. CNR, Tipografia Selca.
- Folk R.L. (1966) - *A Review of grain size parameters*. Sedimentology, 6 :73-93.
- Folk R.L. (1968) - *Petrology of sedimentary rocks*. Hemphill's, Austin, Texas
- Folk R.L. e Ward W.C. (1957) - *Brazos river bar: a study in the significance of the grain size parameters*. Journal

- of Sedimentary Petrology, 27: 3-26.
- Friedman G.M. (1961) - *Distinction between dune, beach and river sands from their textural characteristics*. Journal of sedimentary petrology, 27: 3-26.
- Friedman G.M. (1967) - *Dynamic processes and statistical parameters compared for size frequency distributions of beach and river sands*. Journal of sedimentary Petrology, 32: 327-354.
- Gao S. e Collins M. (1992) - *Net sediment transport patterns inferred from grain - size trends, based upon definition of "transport vectors"*. Sedimentary Geology, 81: 47-60.
- Gao S. (1996) - *A fortran program for grain size trend analysis to define net sediment transport pathways*. Computer & Geoscience, 22: 449-452.
- Krumbein W.C. (1941) - *Measurement and geological significance of shape and roundness of sedimentary particles*. Journal of Sedimentary Petrology, 11: 64-72.
- Krumbein W.C., Sloss L.L. (1963) - *Stratigraphy and sedimentation*. Freeman & co, S. Francisco: 660 pp.
- Inman D.L. (1952) - *Measures for describing the size distribution of sediments*. Journal of sedimentary petrology, 22: 125-145.
- Limoncelli B. e Marini M. (1969) - *Condizioni geologico-strutturali, idrografiche e geomorfologiche del territorio urbano della città di Genova e loro riflessi applicativi*. Tamburini editore, 40 pp.
- Madsen, O.S., Grant, W.D. (1976) - *Quantitative Description of Sediment Transport by Waves*. Proceedings, Fifteenth International Coastal Engineering Conference, American Society of Civil Engineers, 2: 1093-1112.
- Mason C.C., Folk R.L. (1958) - *Differentiation of beach, dune and eolian flat environments by size analysis, Mustang Island, Texas*. Journal of Sedimentary Petrology, 55: 457-470.
- McLaren P., Bowles, D. (1985) - *The effect of sediment transport on grain size distributions*. Journal of Sedimentary petrology, 55: 457-470.
- Papa L. (1974) - *Analisi delle maree e costanti armoniche di Genova*. Istituto Idrografico della Marina, F.C. 1058, 16 pp.
- Papa L. (1978) - *A statistical investigation of low-frequency sea level variations at Genoa*. Istituto Idrografico della Marina, F.C. 1087, 13 pp.
- Pettijohn F. J. (1957) - *Sedimentary rocks*. Harper & Bros, New York: 718 pp.
- Shepard F. P. (1963) - *Submarine Geology*. Harper & Row, Evanston, 558 pp.
- Shields A. (1936) - *Anwendung der Ahnlinchkeits mechanik und der turbulenzforschung auf die Geschiebe bewegung*. Preussische Versuchsanstalt fur Wasserbau und Schiffbau, Berlin, Germany.
- Wentworth C.K. (1922) - *A scale of grade and class terms for clastic sediments*. Journal of Geology, 30: 377-392.

Ricevuto il 02/02/2010, accettato il 10/03/2011.

Morfodinamica e risposta a corto e medio termine ad eventi di mareggiata delle spiagge comprese tra Foce Bevano e Lido di Classe (RA)

Edoardo Grottoli e Paolo Ciavola

Dipartimento di Scienze della Terra - Università di Ferrara, Via Saragat, 1 - 44100 Ferrara
cvp@unife.it

Riassunto

Gli scopi del presente studio consistono nel classificare, da un punto di vista morfodinamico, le spiagge comprese tra la foce del Torrente Bevano e la località di Lido di Classe (RA) nel mare Adriatico Settentrionale e di analizzare la risposta di questo tratto di litorale ad eventi di mareggiata nel breve-medio periodo. L'area di studio è lunga circa 4 km ed è delimitata a Sud da opere costiere artificiali, mentre è completamente naturale fino alla foce del Torrente Bevano che rappresenta il limite settentrionale. Gli obiettivi sono stati raggiunti grazie ad un percorso sperimentale che ha compreso: rilievi topografici di 40 profili di spiaggia ripetuti in 7 diverse campagne in un intervallo di 31 mesi; raccolta di 103 campioni di sedimento su 20 profili di spiaggia in corrispondenza degli elementi morfologici più rilevanti; analisi di laboratorio sui campioni per determinarne i principali parametri tessiturali ed il peso specifico. I valori risultanti dalle analisi di laboratorio hanno permesso di calcolare la velocità di caduta del sedimento (W_s) secondo la legge di Le Roux (1996) e di risalire così alla velocità di caduta adimensionale Ω , indispensabile per poter utilizzare le classificazioni morfodinamiche di Masselink e Short (1993) e di Short (1999). I risultati hanno permesso di individuare 3 macrozone con morfologie simili e di catalogare ognuna delle 6 zone, in cui si è scelto di suddividere l'area di studio, secondo le due classificazioni morfodinamiche proposte. Inoltre, le analisi sulle variazioni spaziali e temporali delle principali pendenze riconoscibili sui profili di spiaggia, hanno consentito di individuare quali zone, nel tratto di litorale studiato, abbiano maggiormente subito l'impatto delle mareggiate e quali tra queste siano state più incisive nell'arco dei 31 mesi di misure. Analizzando i rilievi topografici si possono trovare delle relazioni tra i cambiamenti più evidenti nelle pendenze di spiaggia e il verificarsi delle mareggiate.

Parole chiave: erosione dune, pendenza duna, morfodinamica costiera, mareggiate, rilievi topografici, Emilia-Romagna.

Abstract

The aim of the present study is to classify the beaches stretching between the Bevano River mouth and the beach of Lido di Classe, in the northern Adriatic Sea (Italy) and analyze the response of this littoral zone to storm events in the short-medium term. The study site is an almost 4 km-long beach bordered at the southern edge by coastal structures and completely natural up to the Bevano River mouth which represents the northern edge. The objectives have been reached thanks to an experimental programme which included: topographic surveys of 40 cross sections undertaken 7 times in a time interval of 31 months; sampling of 103 samples on 20 cross sections on the most relevant morphological beach elements; laboratory tests on samples to estimate the main textural parameters and sediment density. Values resulting from laboratory tests allowed to calculate the settling velocity (W_s) through the Le Roux (1996) method and to calculate the non-dimensional settling velocity Ω (aka Dean parameter), prerequisite

to use the morphodynamic classifications of Masselink and Short (1993) and Short (1999). The data analysis permitted to find 3 macro zones with similar morphologies and to catalogue each of the 6 zones according to the morphodynamic classifications quoted above. In addition, spatial and temporal analysis on dune and beach slopes, permitted to detect which zones, had been more subjected to the impact of storms and which events were more incisive in generating erosion during the measurements. The analyses of topographic surveys found relations between beach slopes changes and storm events occurrence.

Keywords: *dune erosion, dune slope, coastal morphodynamic, storm events, topographic surveys, Emilia-Romagna.*

Introduzione

La presenza di tratti interamente naturali, in un panorama intensamente antropizzato e sfruttato come il litorale emiliano-romagnolo, conferisce allo studio di questo sito, compreso tra Foce Bevano e Lido di Classe, una particolare rilevanza. In circa 4 km di lunghezza sono presenti diversi tipi di paesaggi, come la foce fluviale del Bevano, spiagge naturali con sistemi dunali e brevi tratti di litorale fortemente antropizzati, protetti da opere di difesa rigide. Il lavoro è stato svolto nell'ambito del progetto MICORE (Morphological Impact and COastal Risks induced by Extreme storm events), finanziato dalla Comunità Europea (contratto n° 202798) per una durata totale di 40 mesi. Il progetto ha valutato il rischio da erosione e da inondazione lungo le aree costiere di nove paesi europei e ha sviluppato dei sistemi di allerta in grado di prevenire effetti negativi irreversibili sulle cose e sulle persone (www.micore.eu). Nell'intento di classificare l'area di studio secondo gli schemi morfodinamici più noti in letteratura, si è cercato di testare gli schemi classificativi di Masselink e Short (1993) e di Short (1999). Masselink e Short (1993) realizzarono una classificazione morfodinamica riguardante le spiagge con elevate escursioni relative di marea (riferita quindi alle spiagge meso e macrotidali, ma anche alle spiagge microtidali a bassa energia). Lo schema proposto da Masselink e Short include gli effetti delle maree sulle morfologie delle spiagge, oltre a considerare il moto ondoso e le caratteristiche granulometriche. La classificazione si basa sulla velocità di caduta adimensionale Ω e sull'escursione relativa di marea RTR (relative tidal range). La velocità di caduta Ω , definita dall'altezza d'onda (H_b), dal periodo (T) e dalla dimensione dei granuli (determinata dalla velocità di caduta del sedimento W_s) indica se la spiaggia è riflettente, dissipativa o intermedia. L'escursione relativa di marea (RTR) tiene conto, invece, dei processi ondosi che avvengono nelle zone di shoaling, surf e swash, lungo il profilo di spiaggia e consiste nel rapporto tra l'escursione media di marea alle sizigie MSR (Mean Spring tide Range) e l'altezza d'onda alla frangenza H_b (da Masselink e Short 1993; in Masselink e Hegge, 1995). Short (1999) sulla base del parametro di Dean (1973), ossia la velocità di caduta adimensionale (Ω), distingue, invece, 6 diversi stati morfodinamici per le spiagge microtidali: se $\Omega < 1$ la spiaggia è riflettente; se $\Omega > 6$ la spiaggia è dissipativa; se $1 < \Omega < 6$ la spiaggia ricade in uno dei quattro stati intermedi (LBT, Longshore Bar-Trough; LTT, Low Tide Terrace; TBR, Transverse Bar and Rip; RBB, Rhythmic Bar and Beach). Si è scelto di classificare il tratto di litorale in base alle due classificazioni sopra descritte, perché fino ad ora sono state poco utilizzate nel contesto del mar Mediterraneo.

Inquadramento dell'area di studio

Il tratto costiero preso in esame si trova in Emilia-Romagna, all'interno del comune di Ravenna, ed è compreso tra la foce del fiume Bevano e la località balneare di Lido di Classe, situata immediatamente a Nord della foce del fiume Savio (Fig. 1). L'area di studio nel corso del tempo è stata essenzialmente influenzata dall'evoluzione delle cuspidi deltizie del Savio (immediatamente a Sud dell'area di studio), dei Fiumi Uniti (circa 4 km a Nord dell'area di studio), e dalle variazioni morfologiche della bocca del torrente Bevano (compresa nell'area di studio). L'Adriatico Settentrionale, in ragione della sua disposizione geografica, è influenzato principalmente dai mari provenienti dal I e dal II Quadrante (Preti et al., 2009), nello specifico generati dalla Bora (vento proveniente da Nord-Est) e dallo Scirocco (vento che giunge da Sud-Est). Nell'area di studio l'intensità del vento è generalmente maggiore se è associato a fetch più corto (come nel caso del vento di Bora che arriva spesso a 35 nodi di intensità), mentre con fetch più ampi (es. caso dello Scirocco) raramente il vento supera i 30 nodi (Lamberti e Zanuttigh, 2005). In generale, si può affermare che il clima di moto ondoso è caratterizzato da onde di bassa energia, con altezza d'onda significativa (H_s) minore di 1 m (65% dei casi), proveniente per la maggior parte da Est (Gambolati et al., 1998). La dinamica sedimentaria

in quest'area è dominata dal trasporto litorale, che nell'area di studio è diretto da Sud verso Nord ed è responsabile di tutti gli accumuli di sedimenti nei lati sopraflutto dei pennelli o dei moli trasversali alla linea di riva, e del progressivo spostamento verso Nord della foce del torrente Bevano. In Adriatico il regime di marea è di tipo microtidale: infatti nell'area in esame le maree hanno componenti sia diurne che semidiurne, con un valore di escursione massima in sizigie che è pari, mediamente, a 70-80 cm e che scende a 30 cm in quadratura (IDROSER, 1996). I valori relativi alle escursioni di marea, seppur modesti in questa parte dell'Adriatico, assumono particolare importanza se sommati ad altri agenti meteo marini locali (es. storm surge, vedi Masina e Ciavola, 2011). Un importante indice del cambiamento morfologico delle spiagge di questa parte di Adriatico negli ultimi decenni è sicuramente l'arretramento della linea di riva, anche se nella nostra zona di studio, si nota un'importante avanzamento di questa in corrispondenza della foce del Bevano. Esso infatti, essendo situato tra due cuspidi deltidie, le quali in passato erano molto più pronunciate (la foce del Savio, a Sud, e la foce dei Fiumi Uniti, a Nord), ha beneficiato dell'asportazione del sedimento soprattutto dalla cuspidi del Savio e del conseguente trasporto ad opera della corrente lungo costa, che ha creato l'avanzamento della linea di riva nel tratto naturale dell'area di studio. Attualmente la foce del Bevano è influenzata dall'azione combinata delle correnti di marea e del moto ondoso (Balouin et al., 2006b): il sedimento si deposita alla foce, secondo un processo che può essere assimilato a quello di un delta di riflusso (ebb-tidal delta), di dimensioni molto piccole e senza le barre lineari che generalmente si formano ai margini del canale di foce, perpendicolarmente alla linea di riva (Gardelli et al., 2007). Alcune modifiche antropiche hanno riguardato questa area negli ultimi anni. All'inizio del 2006 infatti è stata aperta artificialmente, dalla Regione Emilia-Romagna, la foce che è attualmente visibile, che si trova oggi a circa 500 m più a Sud rispetto alla posizione pre-intervento. Il motivo di tale operazione era la progressiva migrazione verso Nord di una freccia litorale, situata a Sud della foce, la quale andava ad ostruire parzialmente la bocca fluviale diminuendone l'efficienza idraulica (Gardelli et al., 2007). Tale migrazione, alimentata dal trasporto litorale verso Nord, provocava inoltre l'erosione della fascia dunale sulla sponda Nord della foce e il conseguente danneggiamento della pineta retrostante (Ciavola et al., 2005; Ciavola, 2009). Balouin et al. (2006a) hanno dimostrato che tale erosione trasportava il sedimento all'esterno, incrementando in parte il budget sedimentario della spiaggia più a Nord. Nell'area di studio si nota molto bene la differenza tra il tratto di costa naturale (parte Nord della Figura 1, ossia il tratto compreso tra Foce Bevano ed i pennelli di Lido di Classe) ed un tratto di costa fortemente antropizzato e regimato da opere di difesa rigide (pennelli e barriere frangiflutti) presso Lido di Classe (parte Sud della Figura 1). La zona meridionale è infatti contraddistinta da un'evidente tombolo sommerso antistante la spiaggia emersa. Quest'ultima appare maggiormente ampia rispetto al tratto naturale poco più a Nord, dove si nota un progressivo restringimento della spiaggia emersa e del basso fondo ad essa antistante. Inoltre, nel tratto naturale, il basso fondo, che risulta essere a distanze inferiori 60 – 100 m e ad una profondità compresa tra 0.5 - 1 m, (Calabrese e Lorito, 2009) assume una forma sempre più irregolare, arricchendosi di solchi. La spiaggia sommersa interna, nel suo tratto naturale, è inoltre caratterizzata dalla presenza di una barra longitudinale rettilinea che parte dal settore antistante i pennelli e le barriere sommerse ed arriva fino alla foce del Bevano. Essa si trova ad una distanza che oscilla tra i 100 e i 300 m e ad una profondità di circa 1.5 m – 3 m (Calabrese e Lorito, 2009). Per quanto riguarda le opere di difesa, le tipologie di opere rigide presenti sono 3 e sono visualizzate in Figura 1: scogliere parallele emerse che coprono un tratto complessivamente lungo 1200 m (Preti et al., 2009); barriere semisommerse, costruite nel 1989 (Preti et al., 2009) e che coprono un tratto di circa 500 m; 3 pennelli disposti perpendicolarmente alla linea di riva e distanti circa 300 m tra loro. Nel tratto protetto dalle opere di difesa, la linea di riva è in avanzamento al retro delle scogliere e i fondali interni ed esterni alle opere sono in fase di accumulo (Preti et al., 2009). Inoltre, nella porzione a Nord dell'abitato di Lido di Classe, lunga circa 1 km, poiché la situazione della spiaggia nel 2000 era molto critica, nel 2002 è stato fatto un intervento di ripascimento con 41.000 m³ di sabbie sottomarine e questo ha stabilizzato la situazione fino alla foce del Bevano (Preti et al., 2009). Numerosi studi geomorfologici e morfodinamici sono stati eseguiti negli ultimi anni sul litorale ravennate, soprattutto per alcuni siti specifici come la foce del Bevano e la località balneare di Lido di Dante (Balouin et al., 2004; Armaroli et al., 2005; Balouin et al., 2006a; Balouin et al., 2006b; Armaroli et al., 2007; Sedrati et al., 2008; Armaroli e Ciavola, 2011). Per quanto riguarda invece Lido di Classe e la spiaggia naturale a Nord di tale località, uno tra gli studi più dettagliati è stato quello svolto da Armaroli et al. (2007), dove, sull'analisi di rilievi batimetrici, si è osservata una chiusura morfologica del profilo di spiaggia media-

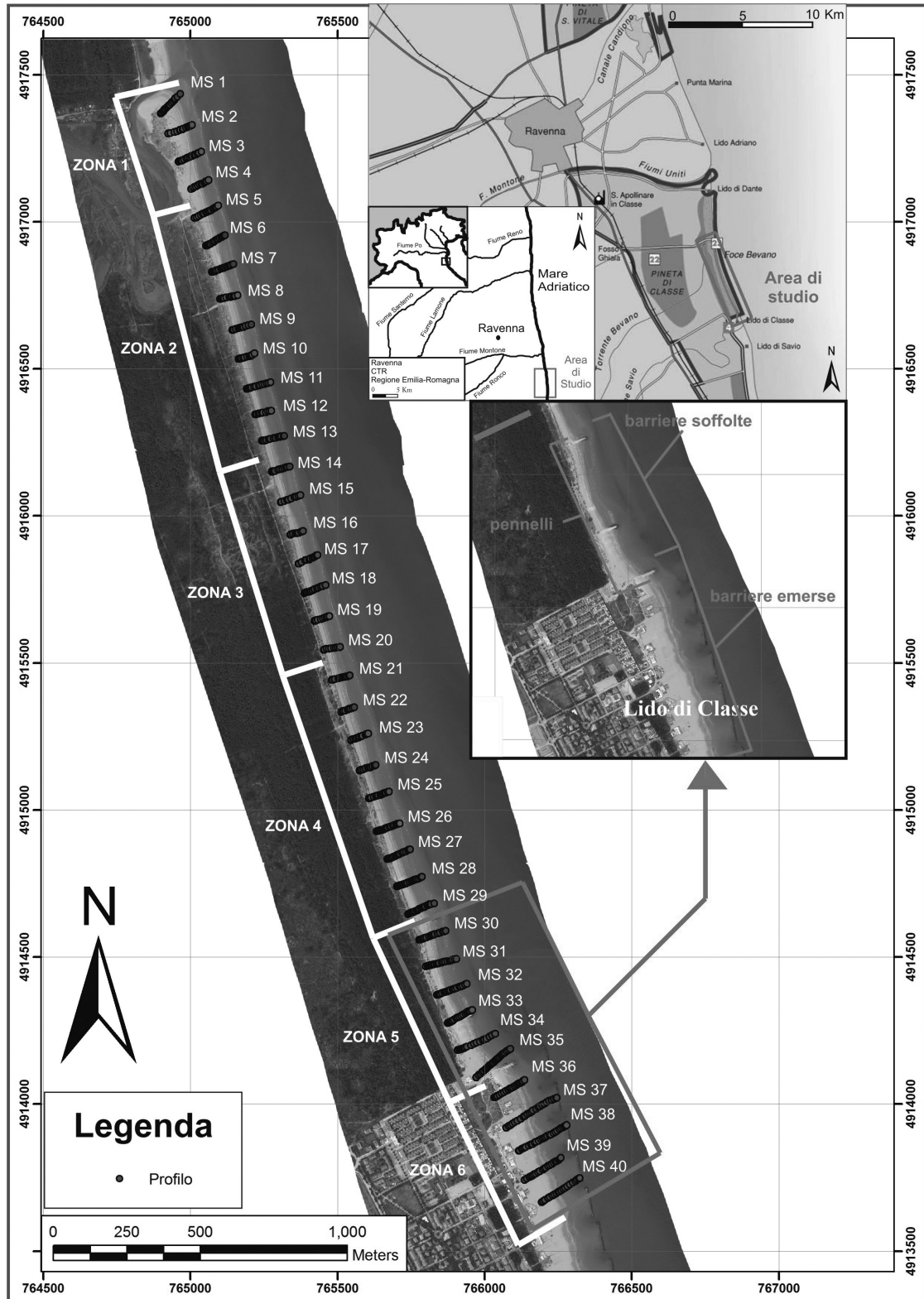


Figura 1 - Ubicazione area di studio su carta topografica (Regione Emilia - Romagna) e relativa foto aerea (volo MICORE Marzo 2009) su cui è indicata la suddivisione in zone e l'ubicazione dei profili topografici rilevati nel corso del triennio di misure. Nell'ingrandimento relativo alle zone 5 e 6 sono indicate le opere di difesa presenti.

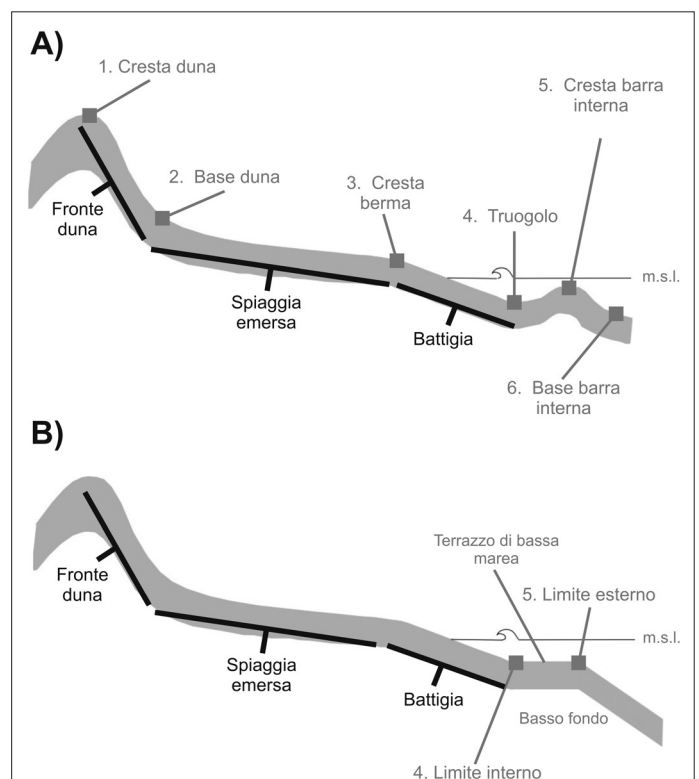
mente ad una profondità di -7 m e tale elemento è stato comparato alla profondità di chiusura del profilo di Hallermaier. Infine, da un punto di vista granulometrico, a profondità superiori ai 6 m, si incontra generalmente una notevole frazione fangosa, sintomo di scarso potere di rimobilizzazione dei fondali, tranne durante le mareggiate eccezionali (Armaroli et al., 2007). Altre osservazioni condotte nell'area riguardano le barre sommerse e le barre intertidali. E' ormai noto come le barre della spiaggia sommersa siano considerate il più importante elemento morfologico che controlla l'equilibrio sedimentario di questa spiaggia (Armaroli et al., 2005). Per quanto riguarda invece le barre intertidali, Balouin et al (2004) hanno confermato come la loro migrazione, nella spiaggia naturale situata a Nord della foce del Bevano, vicino a Lido di Dante (meno di 2 km a Nord della zona di studio), sia regolata dal processo di swash sulla battigia nei periodi di calma del moto ondoso e in assenza di corrente lungo costa (in presenza della quale invece il tasso di migrazione delle barre decresce). Tale migrazione è spiegata anche da Kroon (1994), il quale afferma che la migrazione delle barre di swash dipende dallo spostamento verso costa delle zone di swash e di surf durante il flusso di marea, specialmente quando l'escursione di marea aumenta da una marea di quadratura a quella sizigiale. La migrazione, durante il processo di swash, avviene in questo modo: il sedimento viene trasportato dal lato verso mare (meno inclinato, circa 2%) al lato verso terra della barra (più acclive, circa 4.5%; Balouin et al., 2004). Inoltre, essa al suo interno, presenta delle lamine sub-parallele alla superficie di spiaggia e sul lato sottovento sono presenti delle superfici di riattivazione e strutture di "avalanche" (Balouin et al., 2004). La migrazione verso terra dipende anche dalla durata del processo di swash ed è favorita in mancanza della corrente lungo costa (che ovviamente trasporta il sedimento portato dallo swash lungo costa, attraverso i canali adiacenti alle barre di swash; Balouin et al., 2004). Inoltre, durante la migrazione verso terra, la barra intertidale può essere soggetta ad una variazione morfologica da barra a bassa ampiezza (low-amplitude bar), che è uno stato quasi statico, a una barra con cresta (slip-face ridge) che rappresenta invece uno stato più mobile (Sedrat et al., 2008).

Metodi e strumenti

La zonazione dell'area di studio e il rilievo topografico

L'intero tratto di studio è stato suddiviso in 6 zone (vedi Fig. 1) per facilitare l'analisi dei dati raccolti, la descrizione delle variazioni morfologiche, le differenze sedimentologiche e la classificazione morfodinamica. Nella Figura 1, la dicitura dei profili MS significa MICORE Sud (Sud indica che ci si trova a meridione rispetto la foce del torrente Bevano, il quale divide in due parti, una settentrionale ed una meridionale, l'area di ricerca del progetto MICORE). Il riconoscimento di variazioni morfologiche spaziali è stato il criterio di base secondo il quale è stata suddivisa la zona di studio nelle 6 diverse aree. Per fare ciò, ci si è basati sui seguenti criteri: riconoscimento di pendenze analoghe sui profili topografici provenienti dai rilievi effettuati; individuazione di morfologie simili nella zona intertidale grazie alla fotointerpretazione di immagini aeree e di dati LIDAR; revisione di fotografie scattate in campagna.

Figura 2 - Sia in A che in B sono indicate le pendenze delle 3 principali forme di spiaggia calcolate su ogni profilo (in nero). In grigio sono inoltre indicate le 6 diverse posizioni di campionamento (A) le quali diventano 5 in presenza del basso fondo al posto della barra (B); vedi Paragrafo 2.2.



Il rilevamento topografico è stato eseguito con tecnologia GPS e acquisizioni di dati in modalità RTK e VRS. L'obiettivo specifico di questa attività è stato quello di osservare le variazioni topografiche cicliche stagionali del profilo di spiaggia, e per individuare cambiamenti nella topografia dopo l'occorrenza di una mareggiata. Le campagne di rilevamento effettuate sono 7 e hanno coperto un periodo complessivo di 31 mesi (settembre 2008, febbraio 2009, settembre 2009, febbraio 2010, marzo 2010, ottobre 2010 e marzo 2011). La misurazione delle quote e delle morfologie della spiaggia emersa è stata svolta a partire dalla duna fino a circa 1 – 1.5 m sotto il livello del mare. Uno schema delle pendenze che sono state calcolate dai rilievi topografici è visualizzato nella Figura 2A, in essa sono indicate le 3 pendenze principali che sono state calcolate: fronte della duna, spiaggia emersa e battigia. Per ogni campagna di rilevamento sono state quindi calcolate le tre pendenze su ognuno dei 40 profili che coprono il tratto di litorale studiato.

Come ulteriore aiuto al riconoscimento delle variazioni morfologiche del tratto di litorale studiato, è stata fatta una fotointerpretazione di immagini aeree e di dati LIDAR, ottenuti dal progetto MICORE tramite un volo del marzo del 2009. Una sintesi grafica di ciò che è stato cartografato dal punto di vista geomorfologico è mostrata in Figura 12 nel Paragrafo 3.4 (relativo alla classificazione morfodinamica).

Prelievo ed analisi dei campioni

In prospettiva di classificare il tratto di litorale studiato secondo gli schemi proposti da Masselink e Short (1993) e da Short (1999), si è deciso di realizzare una serie di analisi sul sedimento costituente il tratto di litorale in esame. Le analisi granulometriche, calcimetriche e picnometriche, sono state necessarie per poter inserire dei valori il più possibile reali nel calcolo della velocità di caduta del sedimento. Il campionamento è stato eseguito nei primi giorni del mese di Ottobre 2010, lungo le sezioni perpendicolari alla linea di riva del tratto in studio (vedi Figura 1). Si è scelto di campionare solamente sui profili pari, per un totale, quindi, di 20 profili su 40. Considerando che ogni profilo dista da quello adiacente circa 100 m, tale campionamento alternato ha permesso di ottenere informazioni granulometriche circa ogni 200 m. I punti di campionamento su ogni singolo profilo sono stati scelti tenendo conto delle caratteristiche morfologiche, così come è rappresentato in Figura 2. Idealmente su ogni profilo si sarebbero dovuti prendere 6 campioni, come visualizzato nella Figura 2; ma, sia per necessità tecniche (ossia l'impossibilità in alcuni casi di arrivare a campionare troppo al largo), che per ragioni morfologiche (per esempio l'assenza della barra intertidale o del basso fondo su alcune sezioni) non in tutti i 20 profili si sono prelevati 6 campioni. In totale sono stati raccolti 103 campioni. Le analisi granulometriche sono state eseguite, dopo essiccazione in forno a 105°C, con una batteria di 12 setacci intervallati tra loro di $1/2\varphi$. La classe granulometrica più alta usata è stata la -1φ , posta in cima alla batteria; la classe più piccola considerata è stata la 4φ . In questo modo si è scelto di trattare tutto il passante al setaccio di 63μ come fango indiscriminato (data la sua esigua quantità) e di avere una maggiore discriminazione del materiale sabbioso. I vari pesi in grammi ottenuti per ogni classe di $1/2\varphi$ sono stati inseriti nel programma Gradistat (Blott e Pye, 2001), che calcola le % delle varie frazioni granulometriche ed i principali indici granulometrici. I parametri che sono utilizzati nelle elaborazioni del presente lavoro sono il diametro medio (M_z) e la classazione σ secondo Folk e Ward (1957). Su dieci campioni selezionati (campioni corrispondenti alla cresta della bermà: posizione 3, vedi Fig. 2) sono state eseguite inoltre delle calcimetrie. Tale analisi è stata eseguita tramite l'uso di un calcimetro gas-volumetrico elettronico, per decomposizione del calcare con l'acido cloridrico. Si è scelto di analizzare i campioni corrispondenti alla posizione della cresta di bermà, in modo da considerare una composizione del sedimento mediamente influenzata dai bioclasti. I dieci campioni coprono tutta l'area di studio e sono situati in profili distanti circa 400 m tra loro (profili: MS4 - MS8 - MS12 - MS16 - MS20 - MS24 - MS28 - MS32 - MS36 - MS40, vedi Fig. 1). Sugli stessi dieci campioni, sono state realizzate anche delle analisi picnometriche tramite vasca termostatica (in seguito a previa taratura dei picnometri), per determinare il peso specifico dei sedimenti.

Calcolo delle velocità di caduta

Le classificazioni morfodinamiche utilizzate nel presente lavoro richiedono il calcolo della velocità di caduta (W) dei sedimenti presenti sul tratto costiero. Tale parametro compare infatti nella formula della velocità di caduta adimensionale Ω (parametro di Dean) secondo Dean (1973), che è un fattore discriminante per poter classificare le spiagge sia in base a Masselink e Short (1993) sia facendo riferimento a Short (1999). W è stata calcolata secondo relazioni idrodinamiche note, come la formula di Le Roux (1996), dove equivale a:

$$W_s = \frac{W_{ds}}{\sqrt[3]{\frac{\rho_f^2}{\mu g(\rho_s - \rho_f)}}} \quad (1)$$

W_{ds} è la velocità adimensionale di caduta di una particella sferica (vedi formula (2)), che dipende dal coefficiente di forma D_d di una sfera (vedi formula (3)), il quale dipende a sua volta dal diametro nominale D_n . Assumendo per approssimazione che la forma delle particelle della sabbia in questione sia sferica, D_n equivale al diametro medio Mz ottenuto dalle analisi granulometriche:

$$W_{ds} = (0.2636D_d - 0.37) \quad \text{per } 2.9704 < D_d < 22.9866 \quad (2)$$

$$D_d = D_n \sqrt[3]{\frac{\rho_f g(\rho_s - \rho_f)}{\mu^2}} \quad (3)$$

dove,

$D_n = Mz$ (diametro medio del sedimento espresso in metri);

ρ_f è la densità dell'acqua marina (pari a 1025 kg/m³, alla temperatura di 20°C, alla salinità di 35g/kg ed alla pressione atmosferica);

g è l'accelerazione di gravità (9.81 m/s);

ρ_s è la densità del sedimento;

μ è la viscosità dell'acqua marina (pari 0.001080 kg/ms, a 20°C di temperatura, alla salinità di 35g/kg ed alla pressione atmosferica).

Risultati

Variazioni spaziali delle morfologie

Dai 7 rilievi topografici eseguiti nell'arco di 31 mesi, sono stati estratti dei valori medi della pendenza del fronte duna, della spiaggia emersa e della battigia (ossia delle tre principali rotture di pendenza presenti su un profilo di spiaggia), per ognuna delle 6 zone individuate (Tab. 1).

Tabella 1 - Valori medi delle 3 pendenze principali riconosciute su ogni profilo di ogni zona, relativamente a tutte e 7 le campagne di rilevamento effettuate.

ZONE	ELEMENTO MORFOLOGICO	Set-08	Feb-09	Set-09	Feb-10	Mar-10	Ott-10	Mar-11
Zona 1	% _{media} Fronte duna	11%	10%	9%	10%	10%	12%	8%
	% _{media} Spiaggia emersa	2%	3%	2%	1%	2%	2%	3%
	% _{media} Battigia	4%	5%	8%	8%	6%	7%	8%
Zona 2	% _{media} Fronte duna	17%	21%	14%	18%	20%	19%	23%
	% _{media} Spiaggia emersa	5%	6%	3%	4%	7%	5%	7%
	% _{media} Battigia	7%	5%	7%	7%	3%	7%	7%
Zona 3	% _{media} Fronte duna	34%	55%	38%	61%	86%	71%	102%
	% _{media} Spiaggia emersa	6%	10%	4%	5%	7%	4%	8%
	% _{media} Battigia	5%	5%	8%	7%	13%	7%	5%
Zona 4	% _{media} Fronte duna	16%	28%	32%	191%	138%	42%	116%
	% _{media} Spiaggia emersa	5%	8%	6%	5%	6%	5%	7%
	% _{media} Battigia	4%	6%	6%	7%	8%	5%	5%
Zona 5	% _{media} Fronte duna	18%	20%	18%	22%	29%	21%	23%
	% _{media} Spiaggia emersa	4%	5%	4%	4%	6%	3%	5%
	% _{media} Battigia	4%	5%	6%	8%	8%	5%	4%
Zona 6	% _{media} Fronte duna	24%	14%	24%	13%	no dati	24%	22%
	% _{media} Spiaggia emersa	1%	2%	1%	1%	2%	1%	2%
	% _{media} Battigia	3%	3%	6%	3%	2%	5%	2%

Dalla Tabella 1 si nota come i valori massimi di ripidità del fronte duna si osservano sempre nella zona 3 e nella zona 4 di ogni campagna di rilevamento (102% è il valore medio più alto misurato nella zona 3; 191% è il valore medio più elevato per la zona 4). La pendenza del fronte duna mantiene valori intermedi (minimo 14%; massimo 29%) nelle zone 2 e 5, per poi raggiungere progressivamente i valori più bassi agli estremi dell'area di studio (zone 1 e 6) dove il valore minimo è pari all'8% e quello massimo al 14%, se si escludono i casi in cui si ha un unico dato per la zona 6. I massimi di pendenza misurati nelle zone 3 e 4 sono dovuti alla maggiore vicinanza al mare della duna: in tali aree, infatti, la duna appare (dai risultati di molti rilievi) avere subito erosione al piede (vedi Figg. 3 e 4) e questo ha determinato il crollo della cresta ed il conseguente aumento della sua inclinazione verso mare. Non a caso, le zone 3 e 4 si trovano immediatamente a Nord dei pennelli posti a protezione di Lido di Classe (vedi Fig. 1) e dunque, trovandosi sul lato sottoflutto, sono più soggette all'erosione. Inoltre, come si vedrà in seguito (vedi Fig. 6), la spiaggia emersa in queste zone raggiunge la sua larghezza minima, quindi le dune, trovandosi più vicine alla linea di riva, sono maggiormente esposte ai fenomeni erosivi durante le mareggiate. Per quanto riguarda la spiaggia emersa, anch'essa presenta

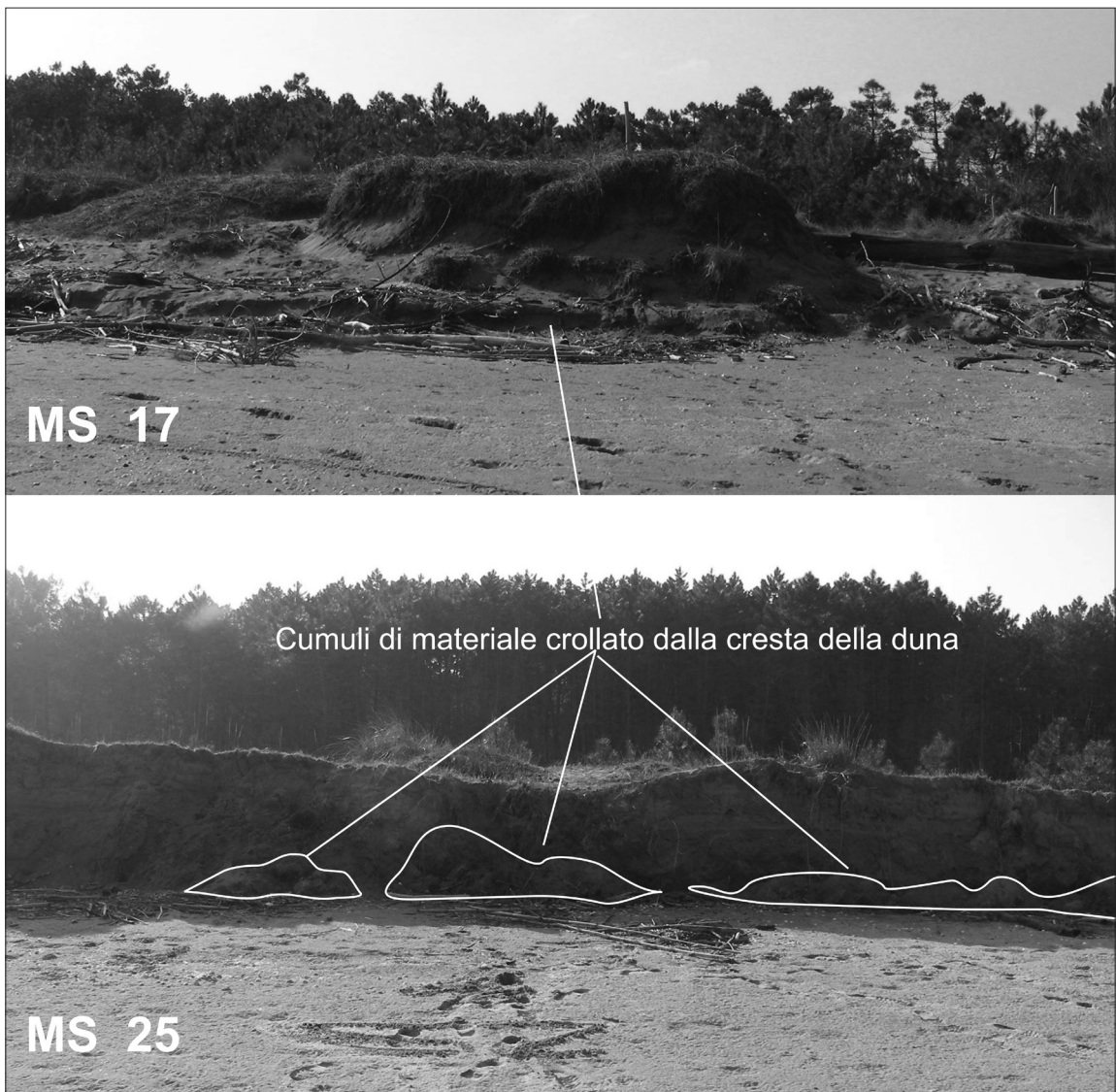


Figura 3 - Fronti di duna erosi dei profili MS17 e MS25, situati rispettivamente nelle zone 3 e 4. Le foto si riferiscono al rilievo di febbraio 2010, durante il quale si sono registrate le pendenze più alte dei fronti duna per l'intero triennio di misure topografiche.

una maggiore inclinazione verso le aree centrali (zone 3 e 4), con il valore medio più alto (10%) misurato nella zona 3 del febbraio 2009, per poi tornare praticamente piana (1-3%) agli estremi dell'area di studio, ossia nei pressi della foce del Bevano (zona 1) e nella spiaggia protetta davanti all'abitato di Lido di Classe (zona 6). Dalla Tabella 1 si nota infine come la battigia abbia un andamento discontinuo nelle 6 zone, non ha cioè una zona preferenziale in cui presenta sempre una minore o una maggiore pendenza, l'unica evidenza è il calo d'inclinazione nella zona 6 riscontrabile in ogni rilievo per la presenza di opere di difesa rigide poste a protezione di quella zona.

In sintesi si possono distinguere tre "macrozone" caratterizzate da simili valori di pendenza in tutti e 7 i rilievi

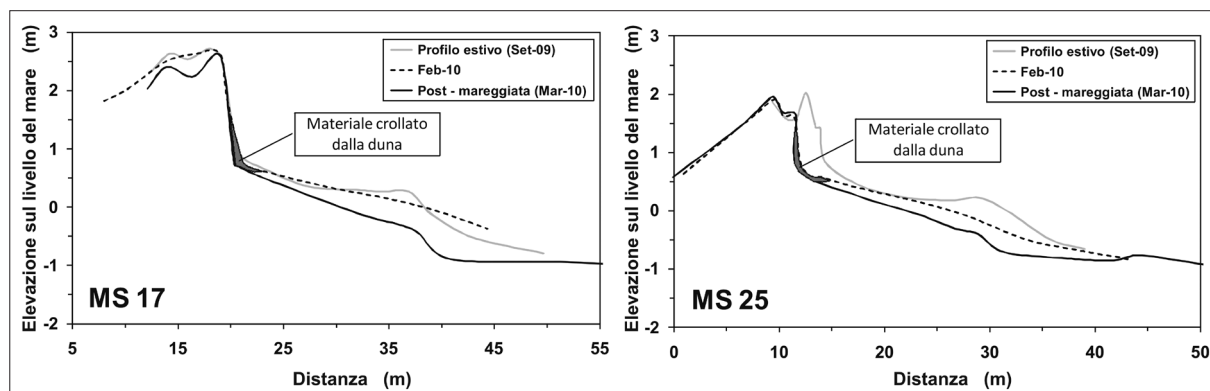


Figura 4 - Fronti di duna erosi dei profili MS17 e MS25, situati rispettivamente nelle zone 3 e 4. I due profili sono gli stessi rappresentati in Figura 3 e si riferiscono al rilievo di febbraio 2010 (rappresentato con la linea tratteggiata) per il quale è indicato il materiale crollato dalla duna. Per capire l'evoluzione della duna sono stati anche rappresentati i profili misurati nel rilievo precedente (Set-09) e successivo (Mar-10) al febbraio 2010.

realizzati: una macrozona centrale (zone 3 e 4), dove i fronti duna e la spiaggia emersa raggiungono le pendenze più elevate per l'intera area di lavoro; una macrozona intermedia (zone 2 e 5) in cui le pendenze sia dei fronti duna che della spiaggia emersa assumono valori intermedi, costituendo quindi una zona di transizione tra i massimi valori della zona centrale e i minimi valori delle aree situate agli estremi del litorale in studio; una macrozona esterna (zone 1 e 6) dove le pendenze dei fronti duna e della spiaggia emersa raggiungono valori minimi, portando la spiaggia ad un generale appiattimento. Questo è dovuto da una parte (zona 1) alla presenza della foce del Bevano, dove spesso si verificano dei ventagli di overwash; dall'altra (zona 6) alla protezione offerta dalle opere di difesa (trasversali e parallele alla linea di riva), le quali attenuano la forza del moto ondoso incidente preservando la spiaggia retrostante.

Sono state ricercate, inoltre, alcune possibili correlazioni tra elementi morfologici (pendenza del fronte duna e della spiaggia emersa), e relazioni tra questi ed un possibile fattore di controllo come l'ampiezza della spiaggia emersa. Dal grafico di Figura 5 si evince che non esiste alcuna relazione diretta, statisticamente rappresentativa, tra la pendenza media del fronte duna e la pendenza media della spiaggia emersa. Le cause sono molteplici: 1) mentre le pendenza della spiaggia varia continuamente in risposta alle mareggiate ed alle stagioni, il fronte duna varia solo in seguito all'azione diretta da parte del moto ondoso durante le mareggiate che generano quote di run-up più elevato; 2) mentre per la spiaggia è documentata in bibliografia una relazione diretta tra pendenza della spiaggia e granulometria (vedi Wright e Short, 1984 e Short, 1999), per il fronte duna la pendenza è funzione della presenza di apparati radicali che portano ad ottenere pendenze sub-verticali, ben oltre l'angolo di riposo del materiale; 3) in seguito ai fenomeni di crollo già accennati in precedenza, ma che verranno meglio descritti successivamente, il fronte duna può variare molto rapidamente l'inclinazione aldilà dello stato morfodinamico della spiaggia presente in quel momento. Tra le varie zone di suddivisione del litorale, le zone 3 e 4 (macrozona centrale) mostrano un'elevata variabilità nella relazione tra le due pendenze poiché questa parte di litorale è maggiormente soggetta all'impatto delle mareggiate. Si è invece esclusa la zona 6 dal grafico di Figura 5 perché è in gran parte priva della duna e dove presente, è praticamente stabile, in quanto si trova al retro di edifici balneari ed è quindi invariabile nel tempo.

Un'altra relazione esaminata è stata quella tra la pendenza del fronte duna e l'ampiezza della spiaggia emersa

(Fig. 6), dove non è stata presa in considerazione la zona 6 per i motivi di cui sopra e perché in tale area la spiaggia arriva ad ampiezze massime di circa 180 m, grazie alle opere di difesa trasversali e parallele alla linea di riva in essa presenti (vedi Fig. 1). Dalla Figura 6 si vede come soltanto per le zone 1, 2 e 5 (macrozona intermedia ed esterna) valga la relazione tra una bassa inclinazione del fronte duna ed un'elevata ampiezza della spiaggia emersa (per le zone 1 e 2 ciò potrebbe essere imputabile alla vicinanza con la foce del Bevano, invece per la zona 5 ciò è spiegabile grazie alla presenza dei pennelli perpendicolari alla linea di riva; vedi Figura 1). Non è però altrettanto vero che per elevate inclinazioni del fronte duna corrispondano limitate ampiezze della spiaggia emersa, o meglio questo

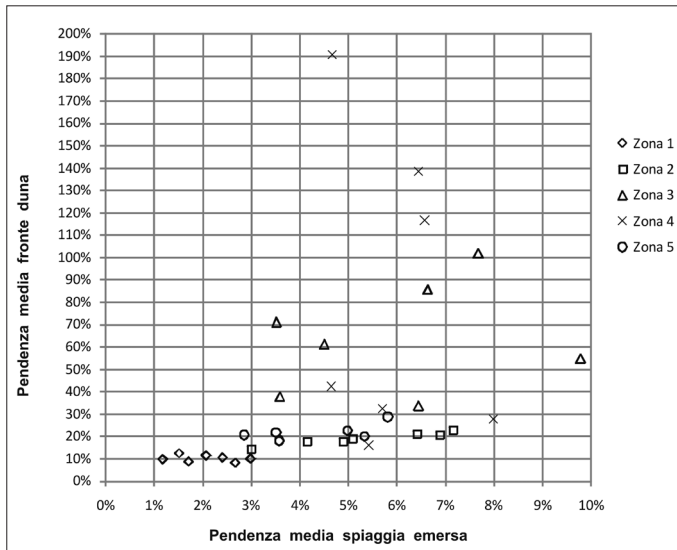


Figura 5 - Grafico che mette in relazione le pendenze medie del fronte duna e delle spiaggia emersa per ogni singola zona. I dati (mediati in ogni singola zona) provengono da tutte le 7 campagne di rilevamento topografico. I punti di ogni linea rappresentano ognuna delle 7 campagne di rilevamento topografico.

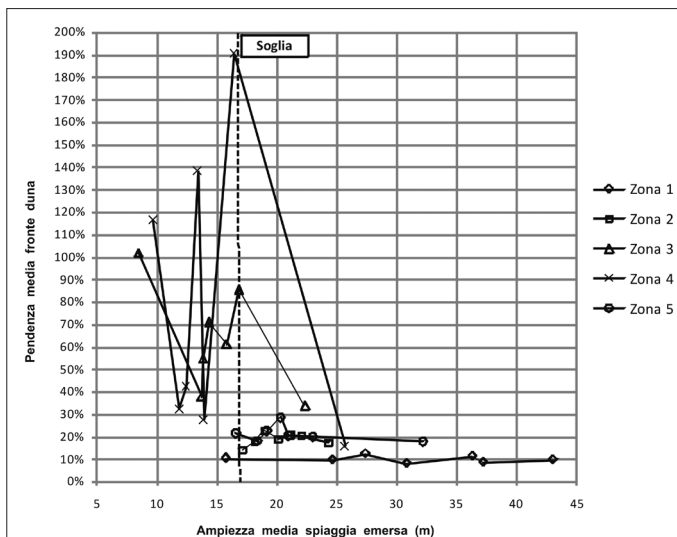


Figura 6 - Grafico che mette in relazione la pendenza media del fronte duna e l'ampiezza media della spiaggia emersa per ogni singola zona. I dati (mediati in ogni singola zona) provengono da tutte le 7 campagne di rilevamento topografico. I punti di ogni linea rappresentano ognuna delle 7 campagne.

è stato riscontrato solo in alcune campagne di rilevamento topografico, ma quest'ultima relazione, se si guardano le linee relative alle zone 3 e 4, non è sempre riscontrabile. L'elevata variabilità delle pendenze del fronte duna nelle zone 3 e 4 è condizionata dalla capacità erosiva delle mareggiate che provocano aumenti di pendenza dei fronti duna. Tali fronti duna si trovano quindi in situazioni altamente instabili dopo il verificarsi di una mareggiata e possono dar vita a crolli verticali che interessano la loro parte sommitale (cresta) in qualsiasi momento dell'anno, tornando così ad assumere inclinazioni minori. Si può, infine, individuare un valore soglia (linea tratteggiata di Fig. 6) posizionato tra i 16-17 m di ampiezza della spiaggia emersa: infatti, per valori di ampiezza della spiaggia superiori a tale soglia, i valori di pendenza del fronte duna (indipendentemente dalla zona e dalla campagna di rilevamento) non superano mai il 30-35%. Probabilmente le onde, durante le mareggiate occorse nell'arco dei 31 mesi di misure, nelle porzioni di spiaggia con una ampiezza superiore a 16-17 m, non sono riuscite ad aggredire la duna. Questa soglia, interpretata esclusivamente in base ai dati di Figura 6, può essere paragonata al concetto di "Corridoio di Sicurezza" (Safe Corridor Width) che è uno degli indicatori dell'impatto da mareggiata, sviluppati dal progetto MICORE e che viene calcolato in modalità operativa dal sistema di allerta sul sito di progetto (<http://geo.regione.emilia-romagna.it/schede/micore/>).

Variazioni temporali delle morfologie

Nel precedente paragrafo si è affermato che l'area di studio può essere suddivisa in 3 macrozone nelle quali il fronte duna e la spiaggia emersa hanno pendenze simili, mentre la battigia è caratterizzata da un andamento delle pendenze discontinuo su tutta l'area di studio. Questa caratteristica è rintracciabile

in tutte le campagne di rilevamento realizzate ed è dunque un requisito che si mantiene nel tempo. Analizzando più nel dettaglio i dati relativi alle pendenze medie misurate su ogni singola zona (vedi Fig. 7), è possibile interpretare meglio le variazioni morfologiche nel corso del tempo, per capire se ci sono state delle situazioni ricorrenti stagionalmente oppure che si sono verificate soltanto in alcuni periodi precisi durante i 31 mesi di misure.

Intanto, per quanto riguarda il fronte duna, il fatto che la pendenza aumenti nelle zone centrali appare più

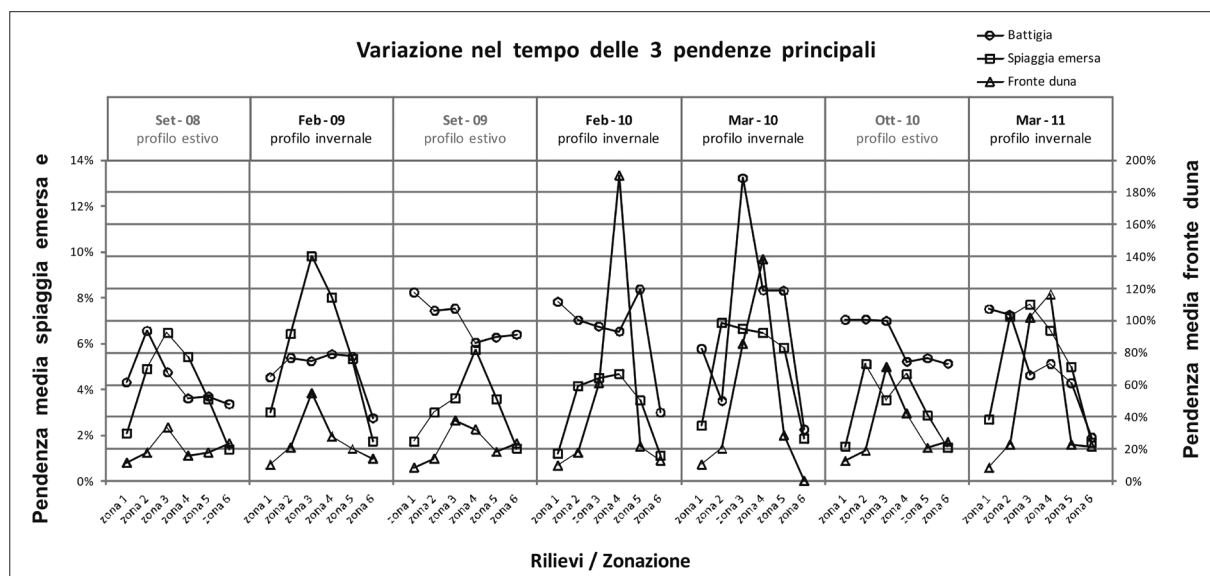


Figura 7 - Grafico che mette in relazione le pendenze medie del fronte duna, della spiaggia emersa e della battigia per tutti e 7 i rilievi topografici eseguiti durante il triennio di misure.

circoscritto alle sole zone 3 e 4 (macrozona centrale), mentre per la spiaggia emersa tale incremento avviene più gradualmente dagli estremi verso le zone centrali dell'area di studio: difatti si registrano valori abbastanza elevati di inclinazione anche nelle zone 2 e 5 (macrozona intermedia). Nel caso del fronte duna (Fig. 7) non è rintracciabile una definita stagionalità nel mutare delle pendenze. Inoltre, guardando l'evoluzione temporale del fronte duna, sarebbe verosimile pensare che una volta raggiunta un'inclinazione massima (vedi Feb - 10 in Fig. 7) tale pendenza si mantenga costante anche nei rilievi successivi, invece si assiste ad una sua diminuzione. Questo comportamento è probabilmente dovuto al fatto che la duna, durante le mareggiate, venendo erosa al piede dalle onde, raggiunge una pendenza assai elevata o comunque molto più elevata dell'angolo di riposo di una sabbia fine che è il sedimento presente sulla cresta di queste dune. Il raggiungimento di tali pendenze è reso possibile dalla presenza degli apparati radicali della vegetazione che cresce sulla cresta dunale. Il fronte duna, non trovandosi dunque nel suo angolo di riposo naturale, si trova in una situazione instabile e col tempo viene interessato da crolli nella sua parte sommitale (cresta). Il materiale crollato, depositandosi al piede della duna (vedi Figg. 3 e 4), provoca così una diminuzione dell'inclinazione del fronte duna. Tale pendenza continuerebbe a diminuire fino al raggiungimento del naturale angolo d'attrito del materiale, ma se la duna viene nuovamente erosa al piede durante una successiva mareggiata invernale (come è plausibile che sia accaduto nel Mar-11 in Fig. 7), ciò non si verifica. Come già osservato da Ciavola e Armaroli (2010) relativamente al cordone dunale presente nel tratto a Nord di Foce Bevano, anche nel tratto posto a Sud il fronte duna può essere eroso secondo due meccanismi dominanti: erosione dovuta al crollo del lato esposto verso mare o scavalco della cresta e progressiva formazione di morfologie "a collinetta", che vengono erose lateralmente alla loro obliterazione durante eventi di washover (Ciavola e Armaroli, 2010). La spiaggia emersa non sembra avere una chiara alternanza stagionale nel variare della sua pendenza media, anche se i valori maggiori sono riscontrabili comunque nei periodi più erosivi, ossia in quelli invernali (vedi Feb-09, Mar-10 e Mar-11 della Fig. 7). La discontinuità della battigia è rintracciabile, oltre che nello spazio (come detto in precedenza) anche nel corso del tempo: infatti non è riscontrabile uno stesso andamento in tutti i rilievi. L'unica ricorrenza sta-

gionale, per quanto riguarda la battigia, è il ristretto range di variazione della pendenza media durante tutti i rilievi eseguiti al termine delle stagioni estive (i rilievi realizzati nei periodi invernali, anche perché eseguiti al termine di ogni mareggiata occorsa, appaiono infatti molto più irregolari e con intervalli di pendenze misurati più ampi).

Nella ricerca di variazioni di pendenza stagionali, si intuisce che il principale fattore che controlla l'inclinazione dei profili di spiaggia è l'arrivo delle onde di mareggiata. L'energia totale (E) di ogni mareggiata è calcolata come l'integrazione dell'altezza d'onda significativa (H_s) al quadrato per la durata della mareggiata (t_1 , t_2), seguendo così la metodologia di Mendoza e Jimenez (2004), adottata successivamente anche da Armaroli et al. (2007, 2012) per studi locali, per adattare la scala delle mareggiate oceaniche proposta da Dolan e Davis (1992) al contesto mediterraneo (vedi anche Perini et al., 2011). Analizzando i rilievi topografici si possono trovare delle relazioni tra i cambi di pendenza più evidenti, misurati in alcune delle 7 campagne effettuate, e il verificarsi degli eventi. Come si vede infatti dal grafico di Figura 8, gli eventi meteo marini più influenti sono stati registrati nei periodi invernali. I rilievi topografici maggiormente influenzati dal verificarsi delle mareggiate sono quelli di Feb-09, Set-09, Feb-10 e soprattutto Mar-10. Il rilievo realizzato nel Mar-11 non è mostrato in Figura 8 poiché mancano i dati meteo marini relativi ai primi mesi invernali del 2011 per poter fare un quadro completo dell'ultima stagione invernale. L'evento di maggiore intensità (energia pari a 311.56 m^2hr , classe 3; altezza d'onda massima pari a 3.86 m, Perini et al., 2011) si è verificato nei primi giorni del mese di Mar-10 (ed in particolare l'8 Marzo). Tale evento ha in effetti determinato considerevoli aumenti nella pendenze di spiaggia: infatti se si guarda la Figura 7 si nota come, soprattutto per il fronte duna e la battigia, si siano registrate pendenze tra le più alte per l'intero triennio di misure. Le zone che hanno maggiormente subito l'azione erosiva di quella mareggiata sono le zone 3 e 4 relativamente al fronte duna e le zone 3,4 e 5 per quanto riguarda invece la battigia. Infatti, aver ripetuto il rilievo invernale nel 2010 (Feb-10 e Mar-10), testimonia l'"eccezionalità" dell'evento meteo marino accaduto nei primi giorni del Marzo di quell'anno. Dalla Figura 8 si osserva, dunque, come ci sia una stretta correlazione tra il verificarsi della mareggiata e il conseguente cambio di pendenze dei profili di spiaggia. Nonostante ciò, anche dopo mareggiate meno energetiche si sono misurati notevoli aumenti di pendenza: infatti, in Figura 7 relativamente alla zona 4, il più alto valore d'inclinazione media del fronte di duna è stato misurato nel rilievo di Feb-10, ossia prima della mareggiata più intensa in assoluto, verificatasi appena un mese dopo. È probabile che la duna, già in seguito alle mareggiate dell'inverno 2009-2010, si trovava in una situazione altamente instabile e ciò ha portato al crollo di materiale dalla cresta al piede della duna durante la successiva mareggiata (più intensa) del Mar-10, causando una diminuzione di inclinazione rispetto il rilievo precedente. Questo è lo stesso comportamento che si è cercato di spiegare nel Paragrafo 3.1 e nelle Figure 3 e 4.

Altre osservazioni sui periodi che in 31 mesi di misure, hanno influito maggiormente sulle morfologie di

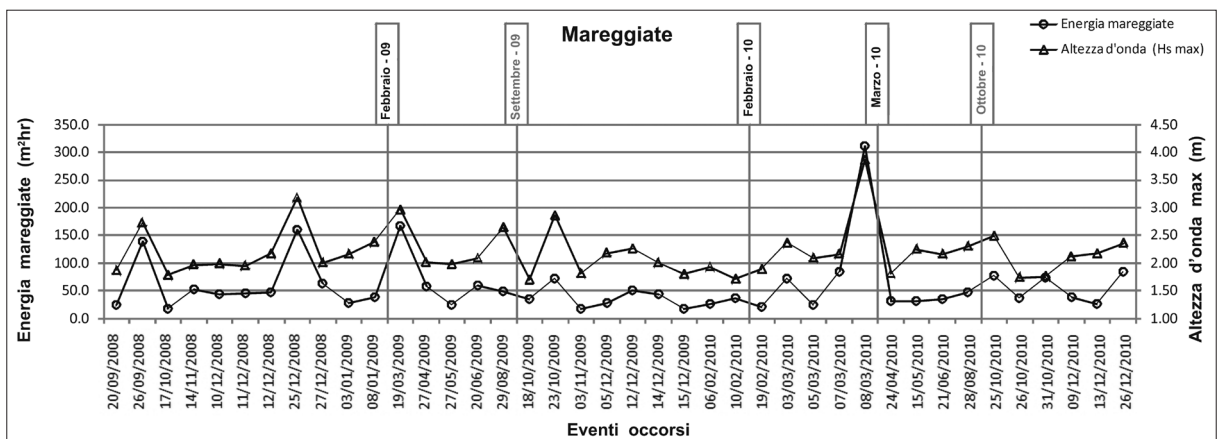


Figura 8 - Grafico che mette in evidenza quali mareggiate hanno influito maggiormente sulle pendenze misurate durante i 31 mesi di rilievi. Nel grafico sono indicate sia l'energia (m^2hr) che l'altezza d'onda (m) massima registrata durante le mareggiate. In ascissa sono elencati cronologicamente gli eventi di mareggiata registrati per gli anni 2008, 2009 e 2010. Le etichette indicano il momento in cui è stato fatto il rilievo topografico.

spiaggia di questo tratto di litorale, possono essere fatte esaminando la Figura 9. I 3 grafici rappresentati in essa sintetizzano i valori di pendenza realmente misurati su ognuno dei 40 profili relativamente alle 3 pendenze principali riconoscibili su ogni profilo. Dalla Figura 9 A si nota come siano i periodi invernali degli anni 2010 e 2011 (Feb-10, Mar-10 e Mar-11) ad avere influito pesantemente sulla pendenza dei fronti duna, specialmente nella macrozona centrale (che, come già ampiamente detto, è quella più vulnerabile alle mareggiate). In particolare si distinguono 3 picchi tra i quali il più alto è relativo al profilo MS 26 del febbraio 2010 (pendenza

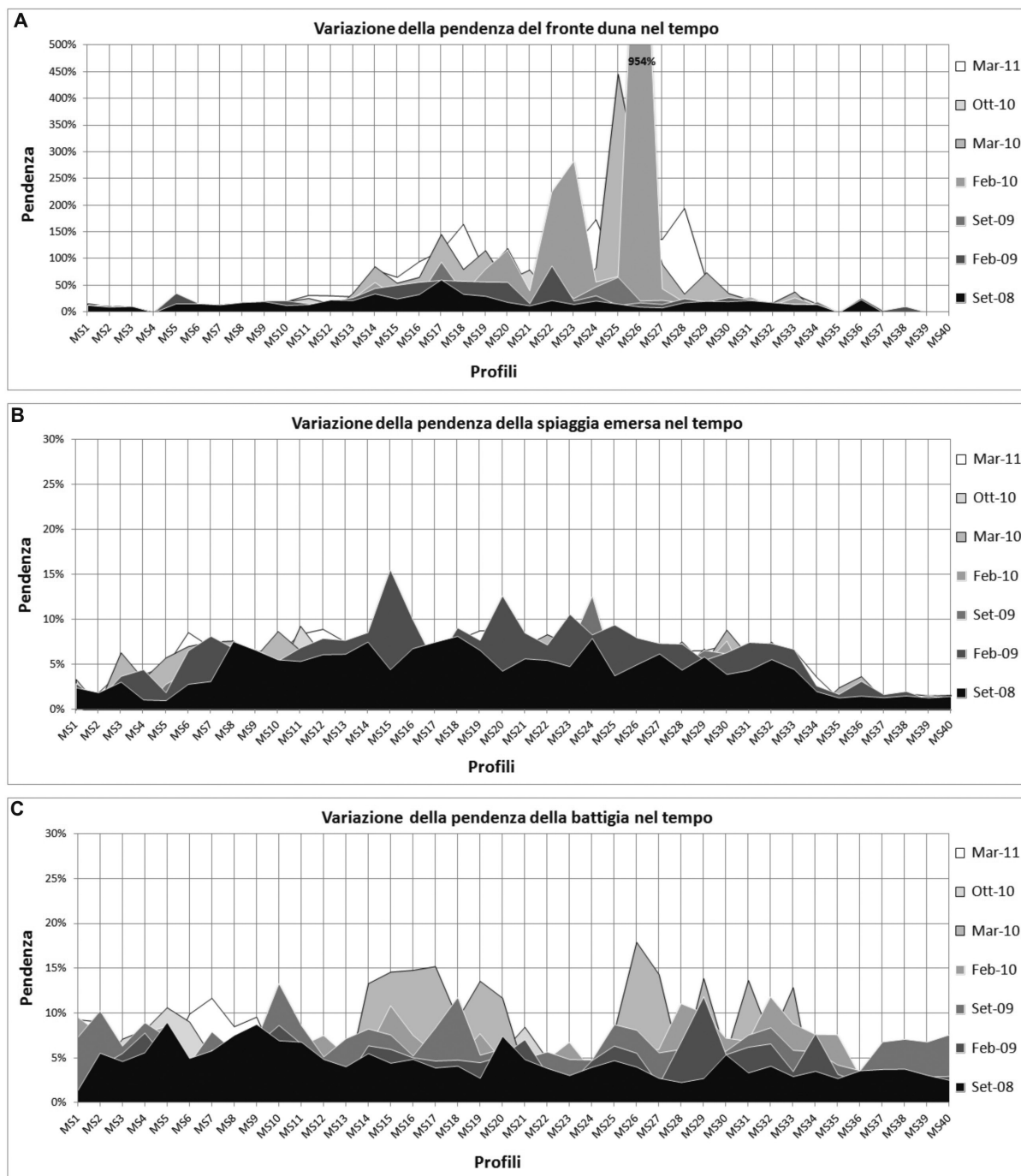


Figura 9 - Grafici che mettono in evidenza in quali momenti (nell'arco del triennio di misure) si sono misurate le pendenze più elevate per i 3 principali elementi morfologici considerati (A - fronte duna; B - spiaggia emersa; C - battigia).

del 954% $\cong 84^\circ$). Nelle aree più esterne del litorale in studio si nota invece come i fronti duna siano rimasti in gran parte gli stessi che sono stati misurati nei primi due rilievi (Set-08 e Feb-09). Nella Figura 9 B, si vede come per le pendenze della spiaggia emersa, il periodo più influente sia stato l'inverno 2009 (vedi Feb-09) e solo per alcuni profili c'è stato un incremento nei periodi successivi. A differenza del fronte duna, la spiaggia emersa, seppur registra le maggiori inclinazioni sempre nella macrozona centrale, mantiene comunque delle pendenze elevate anche nella macrozona intermedia. La zona 6 (che è quella protetta dalle opere di difesa) è l'unica parte di litorale che ha subito meno variazioni. Infine, nella Figura 9 C, la battigia conferma la sua variazione di pendenza altamente discontinua sia nel tempo che nello spazio. I picchi massimi di inclinazione sono stati causati dalle mareggiate dell'inverno 2010 (vedi Mar-10) ma in generale si è assistito ad un progressivo aumento di pendenza nel corso del triennio di misure.

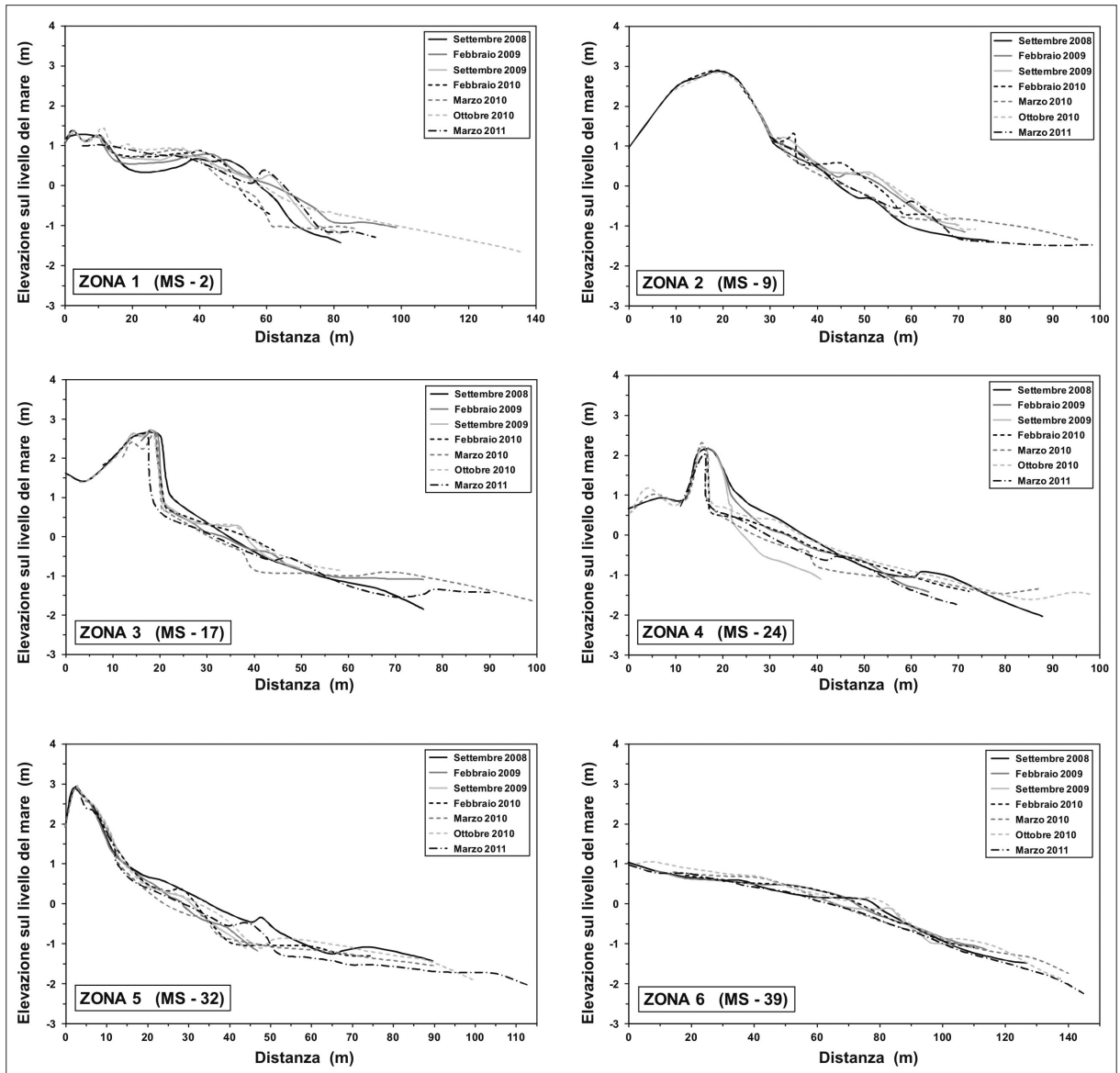


Figura 10 - Profili tipo rappresentativi per ognuna delle sei zone di suddivisione del litorale studiato. In ordinata e in ascissa sono indicate rispettivamente l'altezza sul livello del medio mare e la distanza in metri. Per la zona 6 si è scelto un profilo privo della duna poiché in tale parte del litorale essa è pressoché assente e, se presente, è stabilizzata dagli edifici circostanti, non seguendo più uno sviluppo naturale.

Altre considerazioni, in base alla Figura 9 e alla Tabella 1, possono essere evidenziate zona per zona, relativamente ai cambiamenti morfologici avvenuti durante i 31 mesi di misure. L'elemento morfologico che più degli altri varia nella zona di studio, è sicuramente il fronte duna. Esso ha la sua maggiore variabilità nella zona 4 e mantiene un'elevata mutevolezza anche nella zona 3 (quindi nell'intera macrozona centrale). Le zone 1 e 6 (macrozona esterna) oltre ad avere i valori di pendenza media più bassi hanno anche il minor grado di variabilità (se si tiene conto che la zona 6 ha pochissime dune, le quali sono praticamente tutte stabili trovandosi sul retro di edifici e stabilimenti balneari). Le zone 2 e 5 (macrozona intermedia) hanno valori di pendenza media leggermente più elevati rispetto alle zone più esterne, e allo stesso tempo hanno anche un range poco più grande rispetto sempre alla macrozona esterna. La spiaggia emersa e la battigia hanno, in generale, un minor grado di variabilità.

Per avere una visione complessiva di come siano cambiati i profili di spiaggia nel corso dei 31 mesi di misure vengono nella Figura 10 rappresentati 6 profili tipo scelti come rappresentativi di ogni singola zona di suddivisione del litorale in studio. In ogni profilo mostrato il profilo a colore nero (a linea continua) relativo al Settembre 2008, ossia alla prima campagna di rilevamento, rappresenta la situazione iniziale da cui è possibile vedere l'evoluzione delle morfologie nel tempo fino al Marzo 2011 (linea nera tratto-punteggiata). Si può dire che: la zona 1 è andata verso un progressivo appiattimento delle morfologie di spiaggia; la zona 2, al di là delle morfologie stagionali, ha visto la spiaggia e la duna rimanere praticamente invariate; la zona 3 ha subito un discreto arretramento al piede della duna pur rimanendo pressoché invariata in altezza; la zona 4 è la porzione di litorale che ha subito pesantemente gli effetti delle mareggiate, infatti, se si guarda la distanza tra la linea del profilo iniziale (Set-08) e quella finale (Mar-11) si percepisce di quanto sia arretrata la duna e tale peggioramento è avvenuto tra il Settembre 2009 e il Febbraio 2010 (dunque imputabile alle mareggiate dell'inverno 2009/2010); la zona 5 e la zona 6, trovandosi all'interno della spiaggia protetta da opere di difesa non hanno praticamente subito variazioni degne di nota.

Analisi di laboratorio per la classificazione morfodinamica delle spiagge

Per poter classificare il litorale in esame secondo l'approccio morfodinamico di Masselink e Short (1993) e Short (1999), sono state eseguite alcune analisi sul sedimento campionato (analisi granulometriche, calcimetriche e picnometriche) in modo tale da avere dei parametri il più possibile reali per calcolare la velocità di caduta del sedimento. I dati ottenuti da ogni analisi sono stati sintetizzati nella Tabella 2, relativamente alle 6 zone in cui si è deciso di suddividere il tratto di litorale studiato. Dai risultati delle analisi granulometriche, si evince che il sedimento costituente il tratto di spiaggia studiato è sabbia fine, con un grado di selezione buono. Nonostante l'uniformità del sedimento, si nota comunque un andamento decrescente del diametro medio (M_z) a partire dalla foce del Bevano (zona 1) fino ad arrivare alla spiaggia protetta (zona 6). Si tratta comunque di differenze molto piccole nel diametro medio, che di solito mantiene la stessa classe in φ lungo i profili di ogni zona. Per quanto riguarda la classazione (σ), essa ha un andamento simile al diametro medio, nel senso che, pur essendo buona per la quasi totalità dell'area di studio, tende comunque a migliorare dalla zona 1 alla zona 6. Le analisi calcimetriche sono state eseguite sui campioni relativi alla sola cresta della berma (posizione 3). I risultati ottenuti sono mostrati nella Tabella 2. In media lungo l'intero tratto di litorale analizzato si ha una quantità di CaCO_3 del 26.1%. Le analisi picnometriche sono state eseguite sui medesimi campioni su cui sono state realizzate le calcimetrie. Come si vede dalla Tabella 2, i valori medi di peso specifico vanno da 2.68 a 2.72. Per calcolare la velocità di caduta del sedimento, come già detto nel Paragrafo 2.3, è stata usata la formula di Le Roux (1996). Si è considerato il diametro medio (in metri) relativo al sedimento della cresta di berma, poiché, i campioni su cui sono state realizzate le analisi picnometriche sono relativi a tale posizione di campionamento. L'ordine di grandezza W di che risulta dai calcoli (vedi Tab. 2) è verosimile per una sabbia fine che si avvicina ad una sabbia media come quella presente nel tratto di litorale in studio (con φ compreso principalmente tra 2.00 e 2.50). Ciavola et al. (2000) hanno calcolato velocità di caduta comparabili per spiagge situate nella zona del delta del Po. Alla luce di risultati ottenuti dal calcolo delle velocità di caduta (W) secondo la legge di Le Roux, sono stati calcolati i valori di velocità di caduta adimensionale Ω per le 6 zone. Sono stati utilizzati valori modali di altezza d'onda alla frangenza (H_p ; pari a 0.5 m) e di periodo d'onda (T ; pari a 4.5 s), al fine di avere risultati comparabili con lo studio morfodinamico di Armaroli e Ciavola (2011), relativo alla contigua spiaggia di Lido di Dante. I risultati del parametro di Dean (Ω) sono esposti sempre nella Tabella 2.

Tabella 2 - Sintesi delle analisi di laboratorio fatte sui sedimenti campionati in corrispondenza della cresta della berma (posizione 3 nella Figura 2). Vengono illustrati oltre ai parametri sedimentologici (diametro medio M_z ; classazione σ_z) anche i valori in contenuto di carbonato di calcio, di densità e di velocità di caduta (calcolata secondo la formula di Le Roux). Tutti i parametri sono stati mediati tra i vari profili compresi nelle varie zone.

ZONE	M_z (Φ)	M_z (mm)	Granulometria	σ_z (Φ)	CaCO ₃	ρ_z (g/cm ₃)	W_s (m/s)
Zona 1	2.25 - 2.00	0.243	sabbia fine	0.385	27.0%	2.69	0.030
Zona 2	2.25 - 2.00	0.221	sabbia fine	0.382	28.0%	2.72	0.027
Zona 3	2.25 - 2.00	0.230	sabbia fine	0.382	27.5%	2.71	0.029
Zona 4	2.50 - 2.25	0.200	sabbia fine	0.360	25.5%	2.72	0.024
Zona 5	2.50 - 2.25	0.192	sabbia fine	0.353	23.0%	2.68	0.022
Zona 6	2.50 - 2.25	0.179	sabbia fine	0.362	25.5%	2.68	0.020

Classificazione morfodinamica delle sei zone di suddivisione del litorale in studio

In base alla classificazione di Masselink e Short (1993), oltre a calcolare Ω è indispensabile conoscere il parametro RTR (Relative Tidal Range), che consiste nel rapporto tra l'escursione media di marea alle sizigie MSR (Mean Spring tide Range) e l'altezza d'onda alla frangenza H_b (da Masselink e Short, 1993; in Masselink e Hegge, 1995). Il valore di RTR utilizzato è stato precedentemente proposto da Armaroli e Ciavola (2011) ed è pari a 1.66. Questo valore, anche se è relativo alla spiaggia di Lido di Dante (situata immediatamente a Nord di Foce Bevano), può essere ritenuto idoneo anche per il litorale in studio, per la prossimità tra le due spiagge e le medesime condizioni meteo-marine che le contraddistinguono. In definitiva, le sei zone distinte nell'area di studio, secondo la classificazione di Masselink e Short (1993), sono classificabili come:

- Zona 1 ($\Omega=3.66$): spiaggia intermedia caratterizzata da barre (intermediate barred beach, vedi Fig. 12). In questa prima zona è presente una barra intertidale (o interna) a tratti saldata con il basso fondo (vedi Fig. 12). Come si può vedere dalla carta geomorfologica di Fig. 12 è presente anche una barra sommersa che si trova ad una distanza di circa 130 m dalla linea di riva (in Fig. 12 è indicata come barra esterna). Tale barra, che risulta continuare anche a Nord di Foce Bevano, non subisce spostamenti in senso perpendicolare alla costa nemmeno durante le mareggiate, come provato da Armaroli e Ciavola (2011). Tali autori affermano infatti che la barra, nell'intervallo continuo di monitoraggio che va dal 2003 al 2006, non si è mai spostata, ma al massimo è stata interessata da piccole variazioni della sua forma in pianta (da ritmica a rettilinea durante eventi di mareggiata). Dai dati topo-batimetrici (nota 1) in possesso è possibile stimare se la barra sommersa sia dotata di una forma pronunciata o se sia invece piatta (come vorrebbe distinguere la classificazione di Masselink e Short, 1993; vedi Figura 12). Dalla Figura 11 si vede come la barra esterna (o sommersa) abbia qui una forma più o meno simmetrica ed appuntita.
- Zona 2 ($\Omega=4.09$): spiaggia intermedia caratterizzata dalla presenza di barre (intermediate barred beach, vedi Fig. 12). Anche in questa parte di litorale la spiaggia presenta due barre (una interna ed una esterna, vedi Fig. 12). Come per la zona 1 la barra esterna si trova ad una distanza di circa 130 m dalla linea di riva e ha una forma pronunciata e pressoché simmetrica (vedi Fig. 11). La barra interna, anche in questa parte di litorale, è a tratti saldata al basso fondo.
- Zona 3 ($\Omega=3.90$): spiaggia intermedia caratterizzata dalla presenza di barre (intermediate barred beach, vedi Figura 12). La situazione morfologica è identica alle due precedenti zone (vedi Fig. 12), salvo per il fatto che la barra esterna, sempre pronunciata, qui assume una forma asimmetrica (vedi Fig. 11).
- Zona 4 ($\Omega=4.69$): spiaggia intermedia caratterizzata dalla presenza di barre (intermediate barred beach, vedi Fig. 12). Anche in questa parte di litorale sono presenti i due tipi di barra, ma la barra interna si sdoppia saldandosi al basso fondo tramite due barre oblique, a circa 550 -570 m dal primo pennello giungendo da Nord (vedi Fig. 12). La barra esterna si mantiene sempre a circa 130 m dalla linea di riva, tranne per un breve tratto in cui si inarca, allontanandosi dalla linea di riva di circa 150 m (vedi Fig. 12); la sua forma è più articolata e meno pronunciata rispetto alle precedenti zone, anche se ancora asimmetrica (vedi Fig. 11).
- Zona 5 ($\Omega=5.07$): spiaggia dissipativa caratterizzata dalla presenza di barre (dissipative barred beach, vedi Fig. 12). In questa zona la spiaggia, secondo la classificazione di Masselink e Short (1993), entra nel

campo delle spiagge a profilo dissipativo. Questa è l'ultima zona del tratto di studio in cui sono ancora presenti le due barre: la barra interna scompare poco dopo il primo pennello che si incontra venendo da Nord e la barra esterna, mantenendosi alla solita distanza dei 130 m circa, termina proprio al "confine" con la zona 6, in prossimità del terzo pennello che si incontra giungendo da Nord (vedi Fig. 12). Seppure già in questa zona le morfologie di spiaggia inizino a risentire della presenza delle opere di difesa presenti (pennelli e barriere soffolte, vedi Figura 12), si è scelto comunque di classificarla, poiché sono ancora presenti elementi morfologici naturali (come la barra sommersa) individuati anche per le precedenti 4 zone. Dalla Figura 11 si nota infatti come la barra esterna diventi qui fortemente asimmetrica e più bassa rispetto alle precedenti zone prive di strutture di difesa. Inoltre, al di là della barra esterna, verso mare (a circa 230 m da costa), si nota un accumulo generato dalle barriere soffolte presenti in questo tratto di litorale (vedi Figg. 12 e 11).

- Zona 6 ($\Omega=5.61$): all'ultima zona si è deciso di non applicare la classificazione di Masselink e Short (1993). Infatti, in questa zona non sono più presenti nessuna delle due barre precedentemente descritte (barra interna ed esterna) e il generale appiattimento della spiaggia emersa e della battigia, con formazione del tombolo sommerso (vedi Fig. 12), ci dice che in questa parte di litorale nessun elemento morfologico di spiaggia si è sviluppato in modo naturale, ma la spiaggia risente delle strutture di protezione (vedi Fig. 11). Non avrebbe dunque senso utilizzare una classificazione che si basa sul riconoscimento di morfologie che si sviluppano naturalmente in una spiaggia.

In generale, dal confronto con classificazione di Masselink e Short si può dedurre che, partendo dalla zona 1 (spiaggia naturale situata nei pressi della foce del Bevano) fino ad arrivare alla zona 5 (inizio della spiaggia

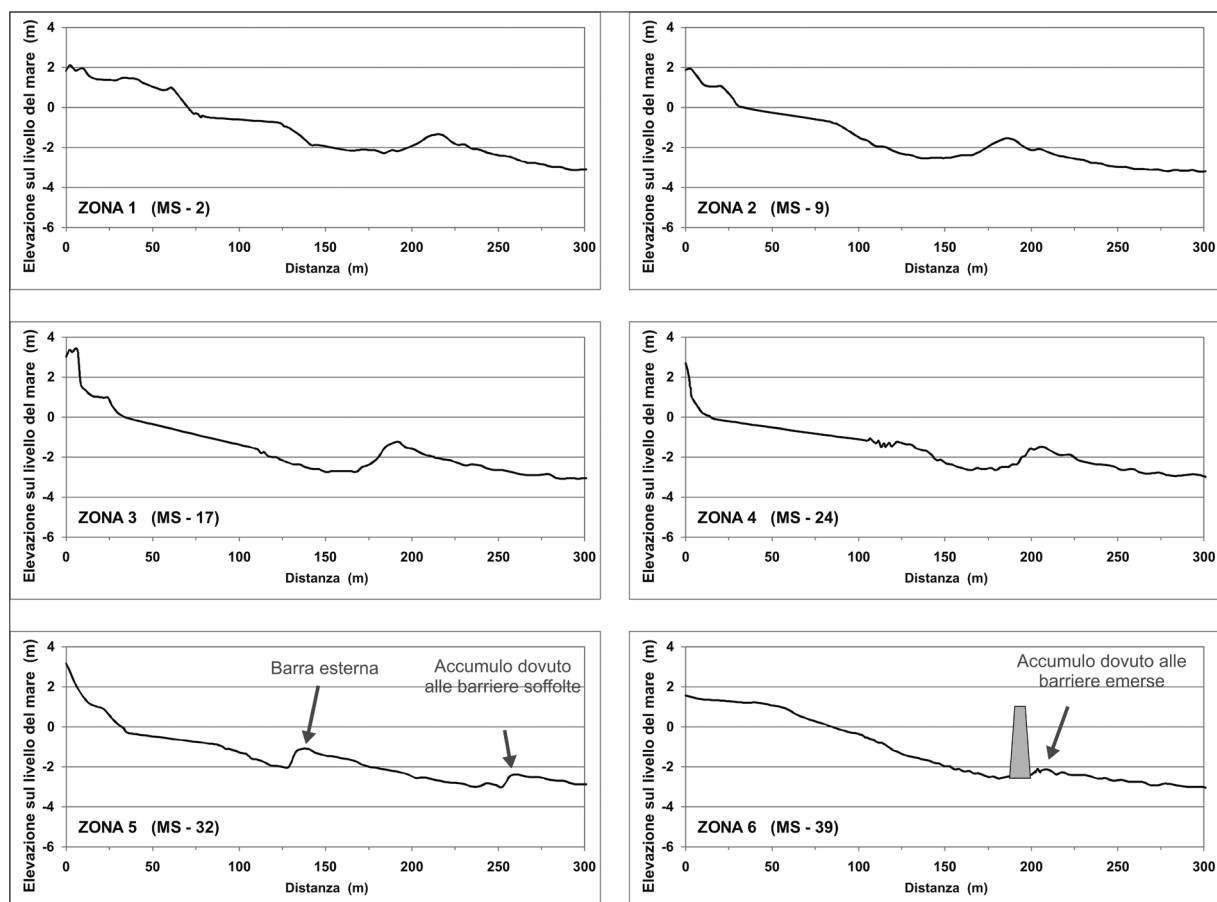


Figura 11 - Profili topo-batimetrici realizzati nel settembre 2009 dal progetto MICORE. Per ognuna delle 6 zone è stato scelto un profilo rappresentativo della situazione morfologica di quella zona. Sulle ordinate è indicata l'altezza dal livello del medio mare e in ascissa è indicata la distanza. L'esagerazione verticale è pari a 12.5.

protetta dai pennelli nei pressi di Lido di Classe), le variazioni morfologiche portano la spiaggia ad assumere un profilo via via più dissipativo (e quindi meno inclinato). Se si vanno ad osservare le pendenze si nota, infatti, come soprattutto la spiaggia emersa subisca nelle zone 5 e soprattutto 6 (cioè nella parte di spiaggia protetta artificialmente) una diminuzione di inclinazione (vedi Fig. 7).

Per quanto riguarda invece la classificazione morfodinamica di Short (1999), considerando sempre il valore di velocità di caduta adimensionale Ω , ottenuto tramite la velocità di caduta W_s secondo la legge di Le Roux (vedi Tab. 2), le varie zone sono così catalogabili:

- Zona 1 ($\Omega=3.66$): spiaggia intermedia (LBT - LTT, vedi Fig. 12). Essendo tale zona (come già spiegato in occasione della precedente classificazione) contraddistinta da una barra esterna (distante circa 130 m dalla linea di riva) e da una barra interna localmente saldata al basso fondo (vedi Fig. 12), essa potrebbe essere classificabile come Longshore bar-trough (LBT). Tuttavia vanno tenute presenti sia le dovute proporzioni riguardo alle dimensioni del trugolo e della barra tra questa spiaggia e una spiaggia oceanica per la quale è stata realizzata la classificazione di Short (1999), così come le differenti condizioni idrodinamiche tra una spiaggia oceanica, che è dominata da onde di swell e rip currents ben sviluppate, e una spiaggia di un piccolo bacino come l'Adriatico dove tali condizioni non si creano. Potrebbe altrimenti trattarsi di una Low tide terrace o ridge-runnel (LTT) se si considera come terrazzo di bassa marea l'intero basso fondo e la barra interna (vedi Fig. 12).
- Zona 2 ($\Omega=4.09$): spiaggia intermedia (LBT - LTT, vedi Fig. 12). La stessa situazione morfologica e le medesime ipotesi fatte per la zona 1 possono essere valide anche per questa zona di spiaggia.
- Zona 3 ($\Omega=3.90$): spiaggia intermedia (LBT - LTT, vedi Fig. 12). Anche in questo caso valgono le ipotesi esposte per la zona 1.
- Zona 4 ($\Omega=4.69$): anche in questo caso si tratta di una spiaggia intermedia (LBT - TBR, vedi Fig. 12). In particolare, in questa parte di litorale si nota la presenza di due barre oblique attaccate alla spiaggia (vedi Fig. 12) che potrebbero far pensare ad una Transverse bar and rip (TBR). Secondo Short (1999) la spaziatura di queste barre, per una spiaggia non oceanica, dovrebbe aggirarsi tra 150-250 m, ed in effetti misurando la distanza tra le due barre sulla carta geomorfologica (Fig. 12) si rientra in tale intervallo. Tuttavia, per la presenza della barra esterna, a tale zona si addice anche la classificazione come Longshore bar-trough (LBT, vedi Fig. 12).
- Zona 5 ($\Omega=5.07$): spiaggia intermedia (LBT - LTT, vedi Fig. 12). Pur trovandoci già all'interno della spiaggia protetta da opere di difesa (zona dei pennelli perpendicolari alla linea di riva, vedi Fig. 12) si è comunque deciso (per gli stessi motivi esposti già in occasione della precedente classificazione) di considerare classificabile questa parte di spiaggia. La morfologia di questa zona è del tutto simile a quella delle zone 1,2 e 3, pur avendo termine all'inizio di questa zona a barra interna (subito dopo il primo pennello, vedi Fig. 12).
- Zona 6 ($\Omega=5.61$): In questa zona, la spiaggia è completamente influenzata dalla presenza delle opere di difesa trasversali e parallele alla linea di riva. Ecco quindi che anche per la classificazione di Short (1999) si è deciso di non catalogare questo tratto di spiaggia.

Tabella 3 - Sintesi della classificazione morfodinamica per le 6 zone di suddivisione del litorale in studio.

ZONE	Ω	Masselink & Short (1993)	Short (1999)
Zona 1	3.66	intermediate barred beach	LBT - LTT
Zona 2	4.09	intermediate barred beach	LBT - LTT
Zona 3	3.90	intermediate barred beach	LBT - LTT
Zona 4	4.69	intermediate barred beach	LBT - TBR
Zona 5	5.07	intermediate barred beach	LBT - LTT
Zona 6	5.61	non classificata	non classificata

Tra le due classificazioni analizzate esiste una similitudine: ossia in entrambe, considerato il graduale aumento di Ω dalla zona 1 alla zona 5, si assiste ad un progressivo passaggio dei profili di spiaggia da condizioni intermedie, nel tratto di spiaggia naturale della zona di studio (zone 1, 2, 3 e 4), a condizioni tendenzialmente dissipative nella parte di litorale protetto artificialmente dai pennelli (zona 5). E' importante notare inoltre,

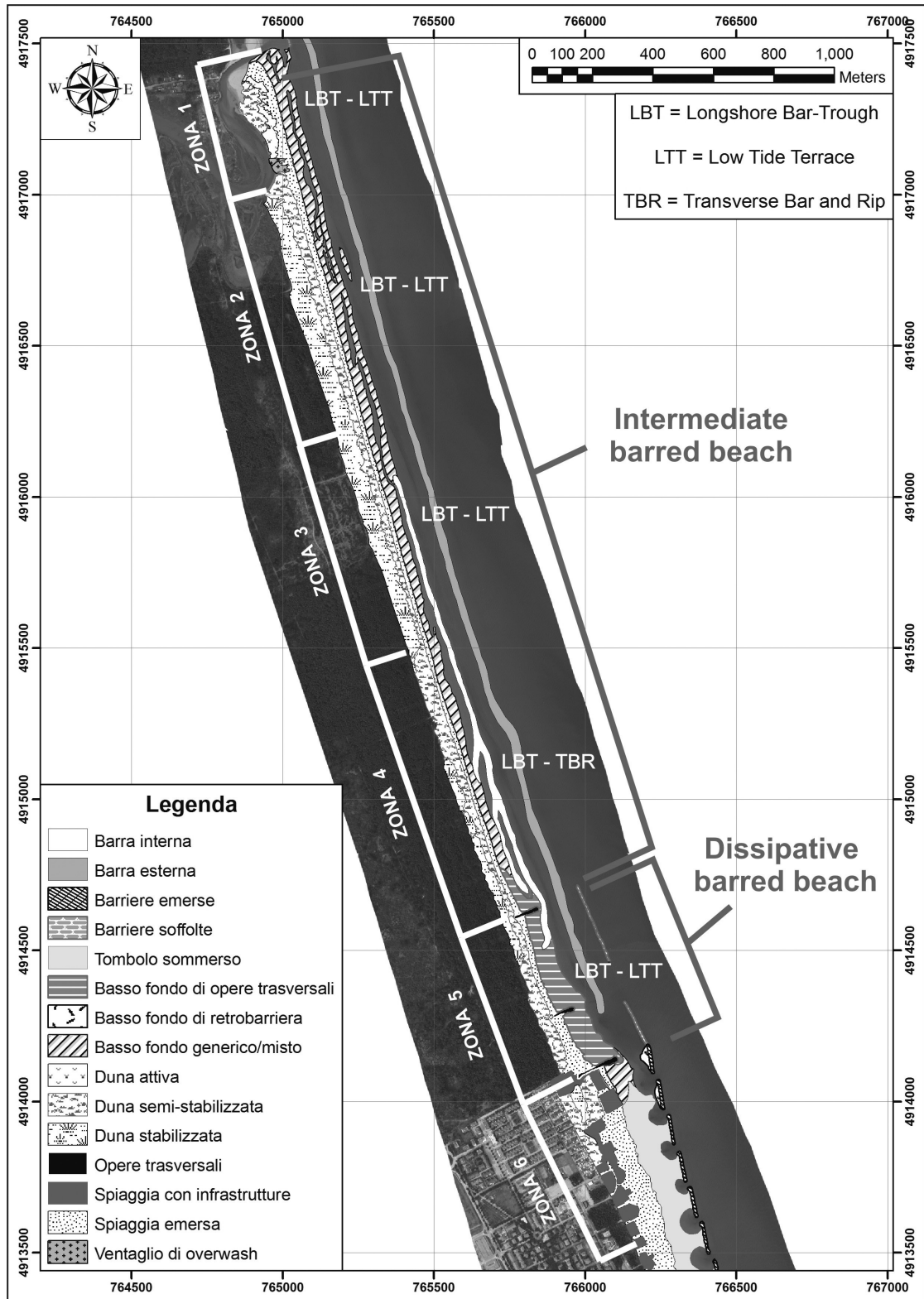


Figura 12 - Classificazione morfodinamica delle 6 zone individuate nell'area di studio. In grigio è indicata la classificazione secondo Masselink e Short (1993); in bianco è segnalata la classificazione secondo Short (1999). La base dell'immagine è una fotointerpretazione realizzata con dati LIDAR e immagini aeree entrambi relativi al marzo 2009.

come ci sia una certa corrispondenza tra la classificazione morfologica realizzata per il presente studio e quella di Armaroli e Ciavola (2011) (nota 2), la quale si riferisce però al tratto di litorale (di circa 3 km) che va da Foce Bevano alla località balneare di Lido di Dante (cioè il tratto di spiaggia immediatamente a Nord della presente area di studio). Nel lavoro sopra citato tali spiagge vengono, per la maggior parte, classificate (secondo Short, 1999) come spiagge intermedie al limite del campo dissipativo, con morfologie predominanti di RBB e TBR. Esiste, dunque, una similitudine relativamente al tipo di profilo di spiaggia (in entrambi gli studi il profilo è intermedio vicino al dissipativo nelle zone in prossimità di opere di difesa), c'è però una sostanziale differenza nella forma in pianta della barra sommersa. Essa infatti a Nord della foce del Bevano appare principalmente ritmica, mentre nel tratto di litorale studiato in questo lavoro, è pressoché rettilinea. Secondo, invece, la classificazione di Masselink e Short (1993), Armaroli e Ciavola classificano il tratto tra Lido di Dante e Foce Bevano come costituito da spiagge a profilo intermedio, con la presenza di una barra sommersa (o esterna) più o meno pronunciata, in accordo quindi con quanto stimato per il tratto di litorale oggetto di questo studio.

Conclusioni

Il presente lavoro ha riguardato lo studio morfodinamico e la risposta alle mareggiate nel breve-medio termine delle spiagge comprese tra la foce del Torrente Bevano e la località di Lido di Classe (RA), per un tratto lungo circa 4 km. Sono state classificate le 6 zone in cui si è scelto di suddividere il litorale, secondo due delle classificazioni più note nello stato dell'arte della morfodinamica di spiaggia, ossia la classificazione di Masselink e Short (1993) e la classificazione di Short (1999).

Considerando i valori di pendenza media ottenuti dall'analisi dei dati provenienti da 7 campagne di rilevamento topografico, il tratto di litorale studiato può essere suddiviso in 3 macrozone: una macrozona centrale (zone 3 e 4), dove i fronti duna e la spiaggia emersa raggiungono i valori di pendenza più elevati per l'intera area di lavoro; una macrozona intermedia (zone 2 e 5), in cui le pendenze sia dei fronti duna che della spiaggia emersa assumono valori intermedi, costituendo quindi una zona di transizione tra i massimi valori della zona centrale e i minimi valori delle aree situate agli estremi del litorale in studio; una macrozona esterna (zone 1 e 6), dove le pendenze dei fronti duna e della spiaggia emersa raggiungono valori minimi, portando la spiaggia ad un generale appiattimento. La battigia ha invece un andamento discontinuo nelle 6 zone, non ha cioè una zona preferenziale in cui presenta sempre una minore o una maggiore pendenza, l'unica evidenza è il calo d'inclinazione nella zona 6 riscontrabile in ogni rilievo per la presenza di opere di difesa rigide in quella zona. La distinzione in 3 macrozone si è visto essere sostanzialmente riscontrabile in ognuno dei 7 rilievi topografici eseguiti durante i 31 mesi complessivi di misure.

Non è stata individuata nessuna stagionalità nel variare di inclinazione del fronte duna e della spiaggia emersa, anche se il fronte duna appare comunque incrementare fortemente la sua pendenza nei periodi invernali a seguito di mareggiate soprattutto nella macrozona centrale (zone 3 e 4) dell'area di studio. La battigia, pur non avendo nessuna ricorrenza stagionale nei valori medi della sua inclinazione, ha comunque mostrato un range di valori di pendenza più ristretto nei periodi estivi e più ampio in quelli invernali. Tra le varie correlazioni indagate, si può affermare che non esiste alcuna relazione diretta, statisticamente rappresentativa, tra la pendenza media del fronte duna e la pendenza media della spiaggia emersa per questo tratto di litorale. Il fronte duna, in seguito ai fenomeni di crollo a cui è soggetto, può variare molto rapidamente la sua inclinazione al di là dello stato morfodinamico della spiaggia presente al momento del franamento.

Infine, si è trovata una certa correlazione tra il verificarsi di intense mareggiate e conseguenti aumenti di pendenza dei profili di spiaggia (soprattutto per il fronte duna e la battigia) come ad esempio è accaduto nel Marzo 2010. Gli eventi meteo-marini dell'inverno 2009-2010 sono stati quelli maggiormente destabilizzanti, soprattutto per i fronti duna della macrozona centrale (zone 3 e 4). In tale parte di litorale la vulnerabilità erosiva si è visto essere accentuata dalla massima vicinanza al mare delle dune. Ulteriori approfondimenti sugli impatti da mareggiata, riguardanti l'area di studio, sono stati proposti da Armaroli et al. (2012), dove sono state cercate delle soglie di vulnerabilità in base ai cambiamenti morfologici e ai danni causati dagli eventi meteo-marini estremi.

I valori ottenuti dalle analisi di laboratorio sono serviti a calcolare le velocità di caduta adimensionale Ω che varia da un minimo di 3.66 (per la zona 1) a un massimo di 5.61 (per la zona 6). In base ad Ω e a considerazioni sulle morfologie di spiaggia, secondo la classificazione di Short (1999) le prime tre zone (zona 1,2 e 3)

sono catalogabili come Longshore bar-trough (LBT) o anche come Low tide terrace (LTT). La zona 4 può essere considerata invece come Transverse bar and rip (TBR) oppure come Longshore bar trough (LBT). Le morfologie della zona 5, nonostante comincino ad essere influenzate dalle opere di difesa presenti in questa parte di litorale, può comunque essere classificata come LTT o LBT. Nel caso dell'ultima zona (zona 6), la presenza delle strutture di difesa in essa presenti, ha indotto alla formazione di una morfologia (tombolo sommerso e scomparsa della barra sommersa) che sarebbe stata sicuramente diversa se avesse potuto seguire uno sviluppo naturale e per tale motivo non ha senso analizzarla secondo la classificazione di Short (1999). Utilizzando invece la classificazione di Masselink e Short (1993) le 5 zone risultano distinguibili in due sole categorie: le prime quattro zone (zone 1,2,3 e 4) possono essere considerate come intermediate barred beach, mentre la zona 5 risulta come dissipative barred beach. Per lo stesso motivo esposto sopra, in occasione della classificazione di Short (1999), non è stata ritenuta classificabile la zona 6. Confrontando le due classificazioni utilizzate, quella di Masselink e Short (1993) sembra più idonea per descrivere la morfologia di una spiaggia, poiché si basa sul riconoscimento in sezione delle forme. Invece, lo schema di Short (1999), cataloga le spiagge con profilo intermedio troppo dettagliatamente e in base a morfologie riconoscibili in pianta. Nella realtà, molto spesso accade che tali forme evolvono velocemente o appaiono degli ibridi tra le varie distinzioni proposte da Short (1999), rendendo quest'ultima classificazione più complicata da applicare.

Ringraziamenti

Si ringrazia il Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli per la fornitura del rilievo LIDAR 2008 nell'ambito delle attività del progetto MICORE ed in particolare Paolo Luciani per l'assistenza nella formattazione dei dati e per l'aiuto nei rilievi di campo. Si ringraziano inoltre tutte le persone che negli anni hanno partecipato ai rilievi ed aiutato nell'analisi dati ed in particolare Clara Armaroli, Mouncef Sedrati, Elisa Fontana, Marinella Masina, Mitchell Harley e Quentin Lequeux. L'articolo è un contributo al progetto MICORE (contratto EU-202798), finanziato dall'Unione Europea nell'ambito del 7° Programma Quadro (coordinatore P. Ciavola).

Bibliografia

- Armaroli C., Balouin Y., Ciavola P. e Capatti D. (2005) - *Nearshore bars as a natural protection of beaches, field evidence from Lido di Dante beach, Adriatic sea* - Atti di: ICCM'05 Conference, Tavira, Algarve, Portogallo, pp. 295-303.
- Armaroli C., Ciavola P., Perini L. e Luciani P. (2007) - *Morfologia delle spiagge ravennati e vulnerabilità per fenomeni di inondazione* - Terzo Forum Nazionale, Pianificazione e tutela del territorio costiero; questioni, metodi, esperienze a confronto, Maggioli Editore, Santarcangelo di Romagna (RN), vol. 127: 363 - 389.
- Armaroli C. e Ciavola P. (2011) - *Dynamics of a nearshore bar system in the northern Adriatic: A video-based morphological classification* - *Geomorphology*, n.126: 201-216.
- Armaroli C., Ciavola P., Perini L., Calabrese L., Lorito S., Valentini A. e Masina M. (2012) - *Critical storm thresholds for significant morphological changes and damage along the Emilia-Romagna coastline, Italy* - *Geomorphology*, vol. 143-144: 34-51.
- Balouin Y., Ciavola P., Anfuso G., Armaroli C., Corbau C. e Tessari U. (2004) - *Morphodynamics of intertidal sand bars: field studies in the Northern Adriatic, NE Italy* - *Journal of Coastal Research*, Special Issue 39: 323-328.
- Balouin Y., Ciavola P. e Armaroli C. (2006a) - *Sediment transport pattern and coastal evolution at Lido di Dante beach, Adriatic sea* - ASCE, Reston, VA, Atti di: Coastal Dynamics 2005, Barcellona, pp. 1-13.
- Balouin Y., Ciavola P. e Michel D. (2006b) - *Support of subtidal tracer studies to quantify the complex morphodynamics of a river outlet: the Bevano, NE Italy* - *Journal of Coastal Research*, Special Issue 39: 602-607.
- Blott S.J. e Pye K. (2001) - *Gradistat: a grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments* - *Earth Surface Processes and Landforms*, n.26: 1237-1248
- Calabrese L. e Lorito S. (2009) - *Geomorfologia costiera*, in "Il sistema mare-costa dell'Emilia-Romagna" - a cura di: Perini L. e Calabrese L., Pendragon, Bologna, cap.7, 87-108.
- Ciavola P., Gatti M., Tessari U., Zamariolo A. e Del Grande C. (2000) - *Caratterizzazione della morfologia di spiaggia lungo lo Scanno di Goro tramite tecniche GPS e rilievi batimetrici* - *Studi Costieri*, vol.2: 175-188.

- Ciavola P., Billi P., Armaroli C., Preciso E., Salemi E. e Balouin Y. (2005) - *Valutazione della morfodinamica di foce del Torrente Bevano (RA): il ruolo del trasporto solido di fondo* - Geologia Tecnica ed Ambientale, vol.1: 41-57.
- Ciavola P. (2009) - *Foce Bevano: l'area naturale protetta e l'intervento di salvaguardia* - Regione Emilia-Romagna, Bologna, cap. 2, 17-18.
- Ciavola P. e Armaroli C. (2010) - *Evoluzione recente del sistema dunale di Lido di Dante-Foce Bevano (Ravenna): fattori naturali ed impatto antropico* - Studi Costieri, vol. 17: 19-37.
- Dean R.G. (1973) - *Heuristic models of sand transport in the surf zone* - Proceedings of the Conference on Engineering Dynamics of the Coastal Zone, Sidney, N.S.W., Australia, pp. 208-214.
- Dolan R. e Davis R.E. (1992) - *An intensity scale for Atlantic coast northeast storms* - Journal of Coastal Research, vol. 8: 352-364.
- Folk R.L. e Ward W.C. (1957) - *Brazos River bar: a study in the significance of grain size parameters* - Journal of Sedimentary Petrology, vol. 27: 3-26.
- Gambolati G., Giunta G., Putti M., Teatini P., Tomasi L., Betti I., Morelli M., Berlamont J., De Backer, K., Decouttere C., Monbaliu J., Yu C.S., Broeker I., Kristenser E.D, Elfrink B., Dante A. e Gonella M. (1998) - *Coastal evolution of the Upper Adriatic Sea due to Sea Level Rise, and natural and anthropic land subsidence* - CENAS, Kluwer Academic, Dordrecht, The Netherlands, pp. 1-34.
- Gardelli M., Caleffi S. e Ciavola P. (2007) - *Evoluzione morfodinamica della foce del Torrente Bevano* - Studi Costieri, vol.13: 53-74.
- IDROSER S.p.A. (1996) - *Progetto di Piano per la difesa dal mare e la riqualificazione ambientale del litorale della Regione Emilia-Romagna*, Regione Emilia-Romagna, Bologna, 365 pp.
- Kroon A. (1994) - *Sediment transport and morphodynamics of the beach and Nearshore zone, near Egmond, The Netherlands* - PhD Thesis, Univ. Utrecht (NL), 275 pp.
- Lamberti A. e Zanuttigh B. (2005) - *An integrated approach to beach management in Lido di Dante, Italy* - Estuarine, Coastal and Shelf Science, vol.62: 441-451.
- Le Roux J.P. (1996) - *An EXCEL program for computing the dynamic properties of particles in Newtonian fluids* - Computer & Geosciences, vol.23, n.6: 671-675.
- Masina M. e Ciavola P. (2011) - *Analisi dei livelli marini estremi e delle acque alte lungo il litorale ravennate* - Studi Costieri, vol.18:84-98.
- Masselink G e Hegge B. (1995) - *Morphodynamics of meso-macrotidal beaches: examples from central Queensland, Australia* - Marine Geology, vol.129: 1-23.
- Mendoza E.T. e Jimenez J.A. (2004) - *Factors controlling vulnerability to storm impacts along the Catalanian coast* - Proceedings International Conference of Coastal Engineering 2004, Lisbon, pp. 3087-3099.
- Perini L., Calabrese L., Deserti M., Valentini A., Ciavola P. e Armaroli C. (2011) - *Le mareggiate e gli impatti sulla costa in Emilia-Romagna 1946-2010* - I Quaderni di ARPA, ARPA Emilia-Romagna, 143 pp.
- Preti M., De Nigris N., Maurizio M., Monti M., Bonsignore F. e Aguzzi M. (2009) - *Stato del litorale emiliano-romagnolo all'anno 2007 e piano decennale di gestione* - I Quaderni di ARPA, ARPA Emilia-Romagna, 270 pp.
- Sedрати M, Ciavola P., Reyns J. (2008) - *Swash bar behaviour on a protected microtidal beach: Lido di Dante, Italy* - Atti di: 3rd International short conference/course on Applied Coastal Research, Nuova Editoriale Bios, Cosenza, pp. 153-164.
- Short A.D. (1999) - *Handbook of Beach and Shoreface Morphodynamics* - Wiley, Chichester , cap.7, pp.171-203.
- Wright L.D. e Short A.D. (1984) - *Morphodynamic variability of surf zones and beaches: a synthesis* - Marine Geology, vol. 56: 93-118.

Ricevuto il 05/09/2011, accettato il 13/03/2012.

Verifica delle opere di difesa e di riqualificazione ambientale del Litorale Domizio - Indagine sperimentale

Michele Di Natale¹, Stefania Di Ronza¹, Caterina Eramo¹

¹DIC-SUN, Dipartimento di Ingegneria Civile, Seconda Università di Napoli
via Roma, 29 - 81031 Aversa (CE)

Riassunto

Il presente lavoro riporta i risultati dell'indagine sperimentale effettuata presso la vasca ondogenica del laboratorio della SUN finalizzata alla verifica delle opere di difesa e di riqualificazione ambientale del Litorale Domizio in provincia di Caserta. L'intervento di difesa della baia prevede la realizzazione di una opera di protezione a gettata di tipo soffolta con l'inserimento di due varchi che suddividono l'intera struttura in tre tronchi, ciascuno di sviluppo pari a 270 m; inoltre sono stati previsti in corrispondenza delle due estremità dei pennelli trasversali emersi di collegamento a terra della scogliera soffolta. Il comportamento dell'opera è stato studiato attraverso la realizzazione di un modello in scala in similitudine di Froude che riproduce due scogliere intervallate dai due varchi e uno dei due pennelli trasversali.

I risultati dell'indagine sperimentale hanno evidenziato che il fattore di trasmissione dell'altezza d'onda di mareggiata si attesta su valori più elevati rispetto a quelli riscontrati per l'onda di modellamento. Il grado di danneggiamento delle opere a seguito dell'azione della mareggiata di progetto è risultato di modesta entità. Le modificazioni subite dalla batimetria della spiaggia mostrano un arretramento medio della linea di riva.

Parole chiave: vasca ondogenica, scogliere sommerse, varchi, comportamento idraulico e strutturale, morfobatimetria.

Abstract

To protect the beach of "Litorale Domitio" the realization of only "cell" made at edges of two semi-submerged groins taking their roots on the ground and connected, on the sea side, to a continuous submerged breakwaters. The cell is divided by some gates. 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, as well as the beach morphodynamics. The results obtained prove that the breakwaters have a remarkable defence effect on the beach, since it proves to be sound from a structural point of view.

Keywords: wave basin, submerged breakwaters, submerged groin, breakwater stability, beach morphodynamics.

Introduzione

Il litorale della provincia di Caserta, caratterizzato da spiagge ampie, basse e sabbiose, si estende per circa 45 km dalla foce del fiume Garigliano a quella del lago di Patria, con un andamento NW-SE (Fig. 1). Il settore di traversia del paraggio in esame è compreso tra le direttrici 160°N (tangente a Capo Miseno) e 310° N (tangente a Punta Stendaro-Gaeta).

Da un punto di vista evolutivo la costa è risultata soggetta nell'ultimo secolo ad accelerati fenomeni erosivi. Studi recenti (Piano Stralcio per l'Erosione Costiera (PSEC) del Litorale Domizio - Autorità di Bacino dei fiumi Liri-Garigliano e Volturno e Piano Stralcio Difesa delle Coste - Autorità di Bacino nord occidentale) hanno infatti evidenziato che l'erosione lungo il tratto oggetto di studio, esteso per circa 3 km a sud dei pennelli di Pinetamare, è prevista dell'ordine di 30-40m a 20 anni; essa è stata, inoltre, drammaticamente accelerata dall'intensa mareggiata occorsa nel mese di Dicembre 2007, che ha determinato localmente una significativa erosione della duna a tergo della spiaggia.

La soluzione progettuale proposta prevede la realizzazione di una opera di protezione a gettata di tipo soffolta con quota di sommergenza posta pari a 0.50 m.s.m. (Fig. 2). Dal punto di vista strutturale, si prevede una mantellata costituita da massi di III cat. con paramento lato mare inclinato con una scarpa pari a 5/2; lo strato filtro ed il nucleo della scogliera sono previsti in scogli di I cat. Lo sviluppo longitudinale complessivo dell'opera di difesa è di 890 m. Lungo la scogliera di protezione sono stati inseriti due varchi di ampiezza pari a 40 m con quota di sommergenza pari a -2.50 m.s.m. e tali da suddividere l'intera struttura in tre tronchi. Altri varchi (di ampiezza di circa 70 m) sono stati introdotti in corrispondenza delle due estremità dei pennelli trasversali emersi di collegamento a terra della scogliera soffolta.

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 del comportamento idraulico del manufatto;
- valutazione della stabilità delle opere a gettata;
- valutazione qualitativa degli effetti morfodinamici indotti dalla realizzazione dell'opera sul litorale a tergo della stessa.

Nella presente memoria si riportano i risultati della suindicata indagine sperimentale ottenuti utilizzando la vasca ondogeno del laboratorio di Idraulica della Seconda Università di Napoli (LIM_SUN). Il comportamento dell'opera è stato studiato attraverso la realizzazione di un modello in scala 1:50. A causa del suo notevole sviluppo lineare, l'opera non è stata riprodotta interamente, ma sono state realizzate in modello due scogliere e i due varchi. Inoltre è stato riprodotto anche uno dei due pennelli trasversali emersi di collegamento a terra della scogliera soffolta.

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 mareggiata si attesta su valori più elevati rispetto a quelli riscontrati per l'onda di modellamento. Il grado di danneggiamento delle opere a seguito dell'azione della mareggiata di progetto è risultato di modesta entità. Inoltre il materiale asportato in prossimità della linea di riva rimane contenuto all'interno della zona compresa tra la spiaggia e le scogliere a protezione della stessa.

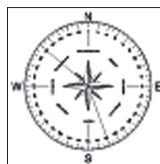


Figura 1 - Inquadramento del Litorale Domizio.

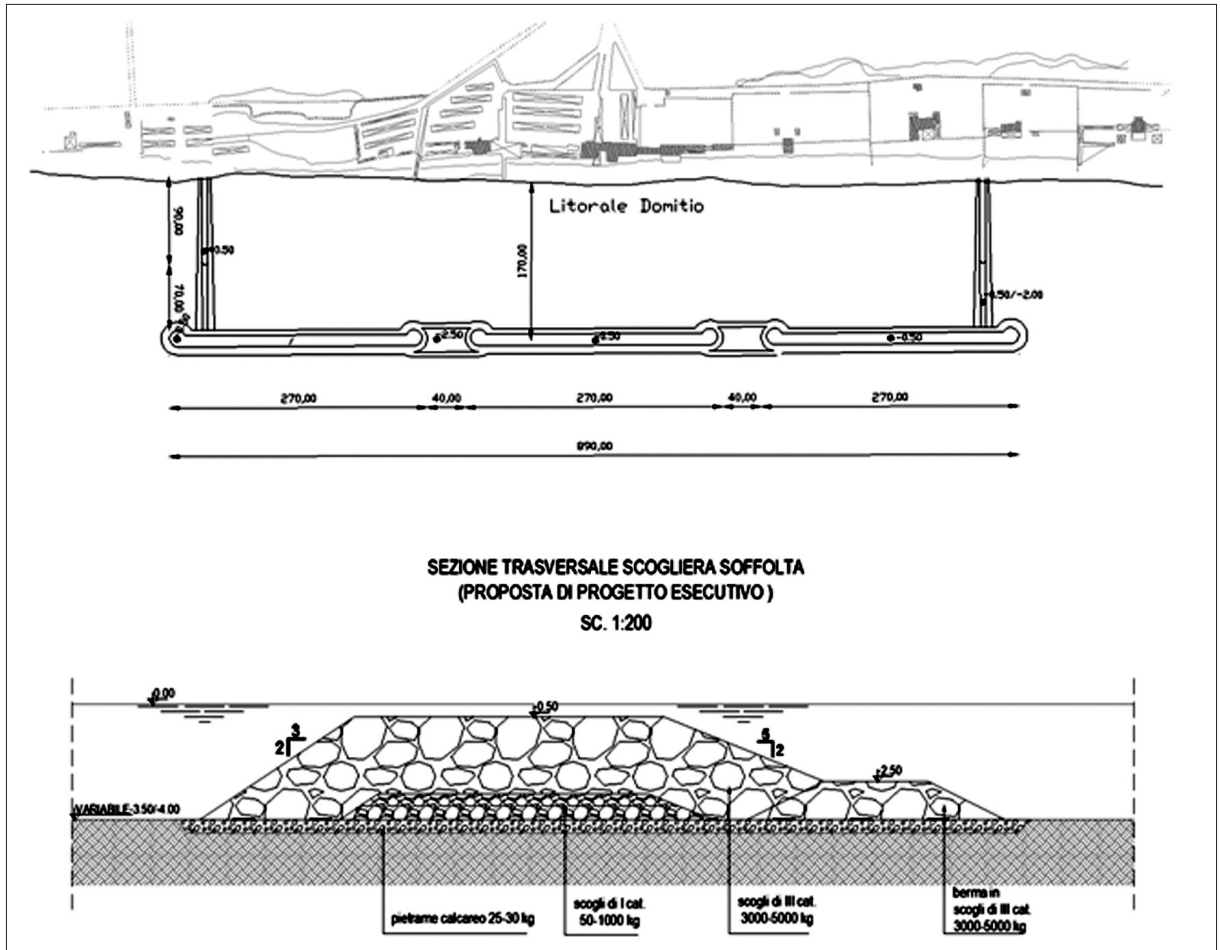


Figura 2 - Planimetria dell'opera di protezione e sezione tipo della scogliera soffolta.

Descrizione delle attrezzature utilizzate per il modello fisico

Le prove su modello fisico sono state eseguite nella vasca ondogena ubicata presso il Laboratorio di Idraulica Marittima della SUN (Fig. 3). La vasca ondogena, a pianta rettangolare, ha le dimensioni di 15.70 m x 12.45 m x 1.00 m, 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 di diametro $d_{50}=0.2$ mm che ricopre il fondo della vasca.

La generazione del moto ondoso bi-tridimensionale (2-3D) avviene mediante l'impiego di 30 battitori a pale, azionati da motori elettrici passo-passo del tipo brushless con potenza di picco pari a 2000 W. Con tale sistema è possibile simulare 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 dotato di assorbimento attivo della riflessione al battitore, implementato presso l'Hydraulics and Coastal Engineering Laboratory dell'Università di Aalborg (Frigaard e Brorsen, 1995; Frigaard e Christensen, 1994) e opportunamente adattato alla suddetta vasca (Di Natale et al., 2004a). La vasca è attrezzata, per la misura dei livelli idrici, con 30 sonde resistive che vengono opportunamente posizionate in funzione dello stato di mare che si intende riprodurre. Il tempo di campionamento delle onde generate è di 0.05 s. La variazione morfodinamica del fondo è stimata con un profilatore Laser M5L e con uno scandaglio manuale opportunamente posizionati su di un carroponete. L'M5L funziona mediante l'emissione di un laser, prodotto da un diodo laser pulsante e proiettato ortogonalmente alla superficie dell'oggetto da misurare. La luce emessa dal laser è riflessa dall'oggetto e proiettata su un PSD attraverso una lente. La misura dell'oggetto, ottenuta, applicando il principio della triangolazione, è compresa in un range tra ± 100 mm.



Figura 3 - Vasca ondogena tridimensionale.

Caratteristiche del modello utilizzato nell'indagine sperimentale

Realizzazione del modello fisico

Il comportamento dell'opera è stato studiato attraverso la realizzazione di un modello in scala 1:50 (Hughes, 1993). In Figura 4 è riportata una immagine del modello realizzato. Le scogliere sono state realizzate con pietre calcaree a spigoli vivi, di dimensioni e peso determinate in base al rapporto di scala 1:50. Il peso degli elementi lapidei è risultato pari a $P_{\min}=8$ g, per quanto riguarda il nucleo della struttura e pari a $P_{\min}=28$ g per la mantellata.

Particolare cura è stata posta nella riproduzione della batimetria del fondale in quanto essa influenza fortemente il campo di moto che si stabilisce all'interno del bacino. Il fondo della vasca è stato ricoperto con sabbia silicea fine di diametro caratteristico pari a 0.2mm che rappresenta il passante al 50% del fuso granulometrico prefissato (Di Natale et al., 2004b; 2008a; 2008b; 2008c). Tale scelta rappresenta il miglior compromesso tra le esigenze di scalatura geometrica dei sedimenti ottenuta secondo il criterio di scala proposto da Kamphuis Sand Model (Kamphuis, 1972a; 1972b; 1975) e la necessità di evitare che i sedimenti scalati siano così piccoli da manifestare proprietà colloidali e renderne il comportamento assai diverso da quello dei sedimenti reali (Kamphuis, 1991; 2000).



Figure 4 - Vista del modello.

Condizioni ondose

Le condizioni ondose assunte per la valutazione del comportamento idraulico e della stabilità delle opere a gettata, nonché per la valutazione qualitativa degli effetti morfodinamici indotti dalla realizzazione dell’opera sul litorale a tergo della stessa, desunte dallo studio meteomarinò e dalla relazione tecnica di progetto sono rappresentate da:

- 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 ($H_s=1.27\text{m}$, $T_s=4.94\text{ s}$, $DD=255\text{ N}$);
- onda di progetto, di altezza pari all’onda frangente sul fondale su cui verrà realizzata l’opera ($H_s=5.3\text{ m}$, $T_s=12.55\text{ s}$, $DD=240\text{ N}$).

Le altezze d’onda corrispondenti alle due condizioni ondose sopra descritte sono risultate rispettivamente pari a 0.025m e a 0.106m nella scala del modello. Tali condizioni ondose sono state realizzate attraverso la generazione di onde pseudocasuali di assegnato spettro. Le altezze ed i periodi delle onde sono stati misurati usando le sonde resistive mobili opportunamente posizionate in vasca. In particolare sono state registrate le caratteristiche ondose al piede e a tergo della struttura, mediante 12 sonde posizionate su di un carroponete posto ad opportuna distanza dalla struttura stessa (Fig. 5). La necessità di misurare la direzione delle onde con attacco obliquo ha reso inoltre necessario l’utilizzo di sei sonde di cui cinque posizionate ai vertici di una struttura rigida in acciaio a forma di pentagono ed una al centro dello stesso (Fig. 5). La distanza delle cinque sonde rispetto a quella centrale è stata fissata in funzione della lunghezza d’onda L riprodotta; in particolare si è posto $\lambda = 0.25 L$ (CERC, 1984; Di Natale et al., 2008d). Durante la sperimentazione le sonde sono state calibrate e controllate regolarmente per una risposta lineare.

Le prove sperimentali con l’onda morfologica sono state protratte per una durata sufficiente al raggiungimento di una configurazione in equilibrio dinamico della spiaggia pari a 8 h, corrispondenti nella scala dei tempi del prototipo a circa 56 h, durante le quali transitano circa 39000 onde (Di Natale et al., 2008b; 2008c).

L’onda di progetto è stata fatta agire per circa 2.00 h, corrispondenti nel prototipo a circa 14 h e alla generazione di 4000 onde.

In Tabella 1 è riportata la sequenza delle prove sperimentali eseguite.

In Figura 5 è inoltre raffigurato il sistema di assi cartesiani utilizzato con l’origine degli assi posizionato in corrispondenza della linea di riva iniziale. L’asse verticale è stato assunto positivo verso il basso e con origine in corrispondenza del pelo libero della vasca.

Figura 5 - Posizione delle sonde e configurazione del modello per la valutazione della stabilità.

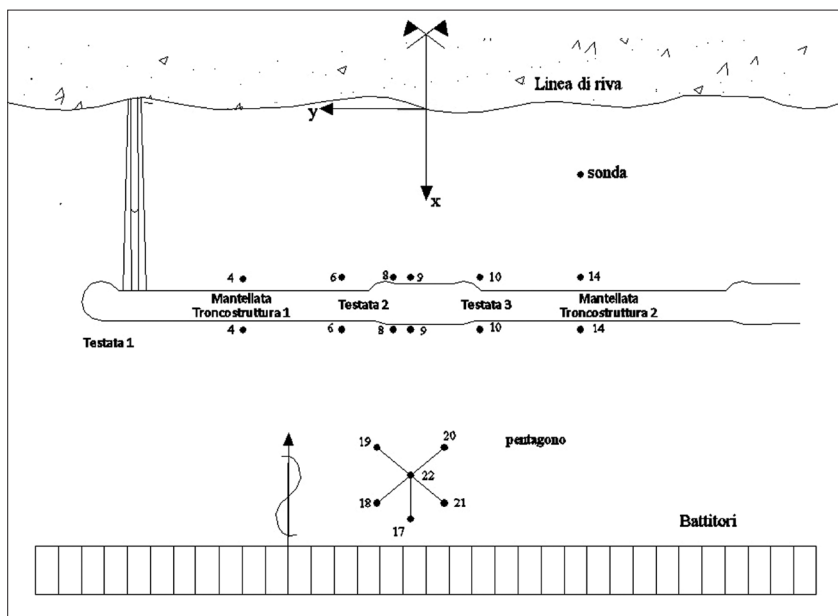


Tabella 1 - Prove sperimentali eseguite.

TEST	CONDIZIONE ONDOSA	H_{sm} [m]	T_{pm} [s]	α [°]	D [min]
A	Onda morfologica	0,025	0,7	12	480
B	Onda di progetto	0,106	1,77	0	120
C	Onda morfologica	0,025	0,7	12	480

Risultati delle prove sperimentali

Analisi del comportamento idraulico del manufatto

La valutazione dei coefficienti di trasmissione a tergo della struttura a protezione del litorale in esame è stata effettuata utilizzando due procedure di analisi del segnale ondosso acquisito al piede e a tergo dell'opera, una nel dominio del tempo, l'altra nel dominio della frequenza. Nel primo caso, la valutazione dell'altezza d'onda significativa incidente e trasmessa è stata effettuata mediando il terzo delle onde di altezza maggiore ($H_s = H_{1/3}$) ed il periodo $T_{H1/3}$ è stato ottenuto come media dei corrispondenti periodi. Nel secondo caso, l'altezza d'onda H_{mo} 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. Inoltre sono stati valutati i valori dell'altezza d'onda significativa, del periodo e dell'angolo di inclinazione del fronte d'onda in prossimità del battitore mediante le sei sonde al pentagono.

I valori dei coefficienti di trasmissione, $K_{t_{Hmo}}$ e $K_{t_{H1/3}}$, sono riportati in Tabella 2. Come si evince i valori dei coefficienti di trasmissione valutati alle diverse sonde sono più bassi per l'onda di modellamento (Test A) con valore medio stimato pari a 0.47 e più elevati per l'onda di progetto (Test B) con valore medio pari a circa 0.50. Per il Test C, i valori di $K_{t_{Hmo}}$ e $K_{t_{H1/3}}$ si attestano intorno a 0.52. Per tutte le condizioni ondose riprodotte i valori del coefficiente di trasmissione più elevati si hanno in corrispondenza delle sonde posizionate lungo il varco ed in prossimità dello stesso (Fig. 5).

I valori dei coefficienti di trasmissione misurati sono risultati in buono accordo con quelli valutati, in fase progettuale con la nota formula di Van der Meer e Stam (1992). Si precisa che, dal momento che il sistema di difesa è costituito da scogliere soffolte intervallate da varchi, il valore di progetto del coefficiente di trasmissione è stato ricavato da una media pesata sulle lunghezze dei coefficienti di trasmissione relativi, rispettivamente, alle scogliere ed ai varchi.

Tabella 2 - Valori dei coefficienti di trasmissione, $K_{t_{Hmo}}$ e $K_{t_{H1/3}}$.

TEST				Sonda	Coefficiente di trasmissione	
	H_{sm} [m]	T_{sm} [s]	D [h]	n°	$K_{t_{Hmo}}$	$K_{t_{H1/3}}$
A	0,025	0,70	8,00	4	0,34	0,31
				6	0,42	0,38
				8	0,41	0,38
				9	0,55	0,55
				10	0,69	0,68
				14	0,41	0,40
B	0,106	1,77	2,00	4	0,43	0,42
				6	0,41	0,40
				8	0,41	0,40
				9	0,57	0,58
				10	0,70	0,70
				14	0,45	0,43
C	0,025	0,70	8,00	4	0,44	0,39
				6	0,44	0,41
				8	0,44	0,40
				9	0,67	0,68
				10	0,74	0,72
				14	0,42	0,40

Analisi della stabilità del manufatto

La stabilità dei massi è stata registrata usando sia la tecnica del confronto fotografico da una postazione fissa prima e dopo le prove che contando il numero di massi dislocati e rapportandoli a quello totale costituente la zona in esame. In particolare le foto sono state riportate in un programma per l'elaborazione delle immagini per consentire il confronto delle sequenze di prova.

L'assestamento della struttura è stato valutato tenendo conto del criterio secondo cui il dislocamento di un masso si verifica se questo si sposta di una quantità maggiore a una volta il diametro nominale del masso medio della struttura (D_{n50}); se il masso si sposta di una quantità compresa tra 0.5-1.0 D_{n50} il relativo dislocamento è ritenuto trascurabile (Burchart et al., 2006).

Le percentuali di danneggiamento valutate per la sola onda di progetto sono riportate in Tabella n 3 (Fig. 5). E' evidente che la mantellata del tronco struttura e della testata risulta stabile dal punto di vista strutturale con valori del grado di danneggiamento praticamente trascurabili e compresi tra 0.6% e 2%. Il grado di danneggiamento relativo ai varchi è risultato nullo.

Le verifiche di stabilità delle scogliere soffolte di progetto sono state effettuate mediante l'applicazione della relazione di Van der Meer e Pilarczyk (1990) e secondo le indicazioni riportate nelle "Istruzioni tecniche per la progettazione delle dighe marittime" emanate dalla III Sez. del Consiglio Superiore LL. PP. nel 1994. I valori misurati del grado di danneggiamento (Tab. 3) rientrano pienamente nel range dei valori proposti dalla formula di Van der Meer ($S=2$ - danneggiamento nullo).

Tabella 3 - Grado di danneggiamento.

TEST B	LATO STRUTTURA	GRADO DI DANNEGGIAMENTO S
Testata 1	Lato mare	0,0%
	Lato terra	0,0%
Mantellata Troncostruttura 1	Lato mare	0,5%
	Lato terra	0,4%
Testata 2	Lato mare	0,0%
	Lato terra	0,0%
Varco	Lato mare	0,0%
	Lato terra	0,0%
Testata 3	Lato mare	1,2%
	Lato terra	1,9%
Mantellata Troncostruttura 2	Lato mare	0,4%
	Lato terra	0,6%

Analisi della evoluzione della morfobatimetria a tergo delle opere

L'evoluzione della morfobatimetria a tergo delle opere è stata studiata sottoponendo il litorale ad una sequenza temporale caratterizzata da una prima onda di modellamento ($H_{sm}=0.025$ m, corrispondenti a 1.27 m nel prototipo), per una durata sufficiente al raggiungimento di condizioni di equilibrio dinamico del fondale, da un'onda di progetto ($H_{sm}=0.106$ m, corrispondenti a 5.30 m nel prototipo), per una durata di 2 h, corrispondente alla generazione di 4000 onde e infine da una seconda onda di modellamento per una durata sufficiente al raggiungimento di un nuovo equilibrio dinamico del fondale (Tab. 1).

Durante l'azione della prima onda di modellamento, ad intervalli re-

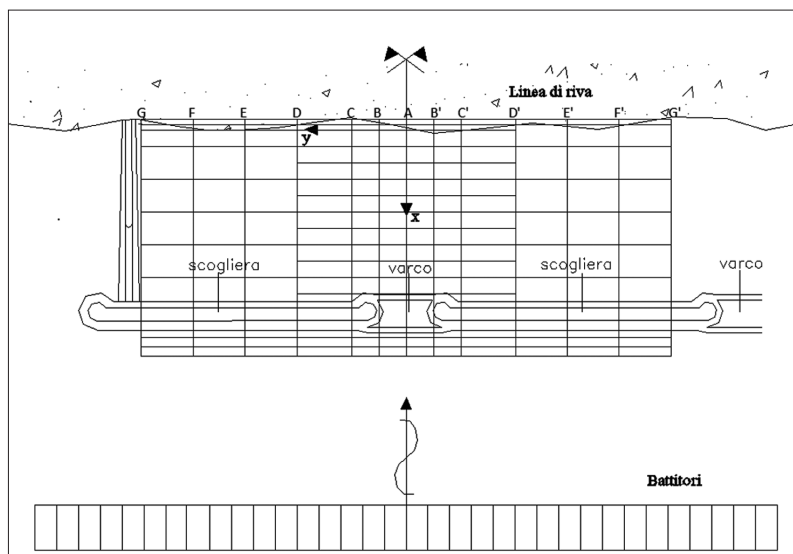


Figura 6 - Ubicazione delle sezioni di misura.

golari è stato eseguito il rilievo del fondale mediante la misura di 13 profili trasversali alla struttura posti ad opportuna distanza tra loro (Fig. 6). La prova è stata protratta fino a quando si è riscontrata un'assenza di variazioni significative tra due rilievi successivi. Successivamente si è fatta agire la mareggiata di progetto per la durata di 2 h ed è stato eseguito il rilievo del fondale nei punti prefissati al termine della prova stessa. Infine sono stati rilevati i nuovi profili di equilibrio, nelle stesse sezioni di misura, stabilitisi per effetto dell'azione della seconda onda di modellamento.

Il raggiungimento delle condizioni di equilibrio del fondale è stato osservato, durante la prima prova, dopo un tempo di circa 7,36 h. I rilievi acquisiti a tergo delle scogliere sommerse, lungo le sezioni di misura, mostrano chiaramente lo stabilirsi di un profilo di equilibrio caratterizzato da una pendenza pressoché coincidente con quella iniziale pari al 14%, per una fascia di 0.50 m. Analogamente la pendenza del fondale rimane costante e coincidente con quella iniziale pari a 1.0% nel restante tratto fino alle scogliere a protezione della spiaggia. Le figure 7 e 8 mostrano i profili di equilibrio stabilitesi lungo le diverse sezioni di misura e la rappresentazione per curve di livello della batimetria di equilibrio a tergo delle scogliere dopo l'azione della

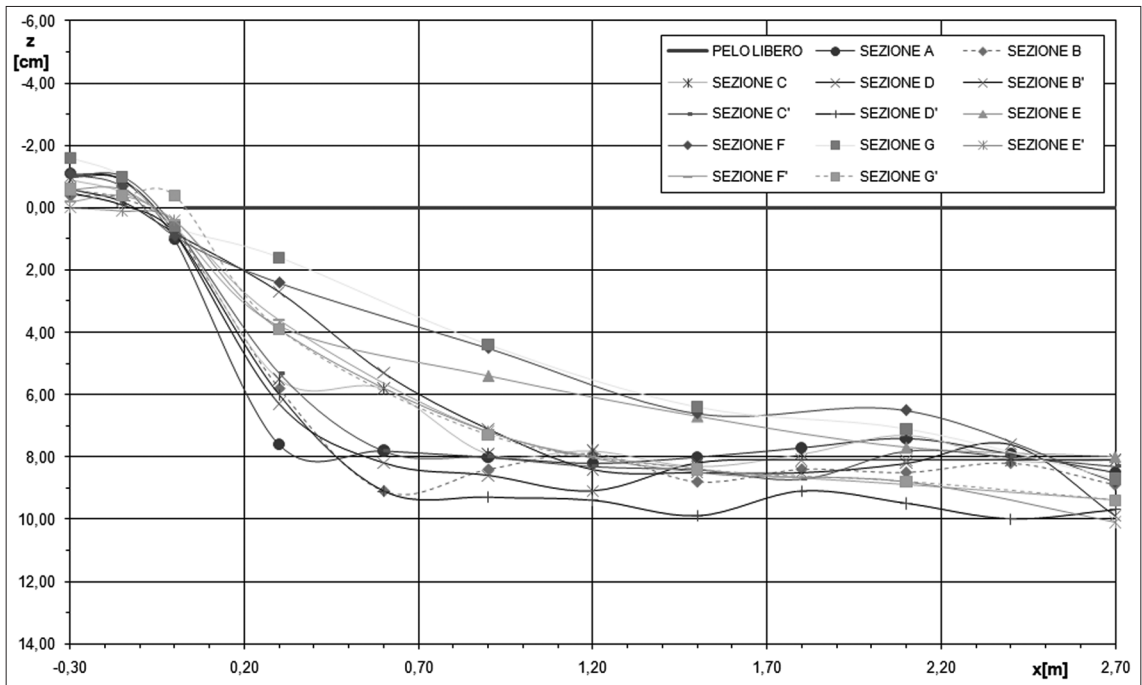


Figura 7 - Profili trasversali della spiaggia al termine della prima onda di modellamento.

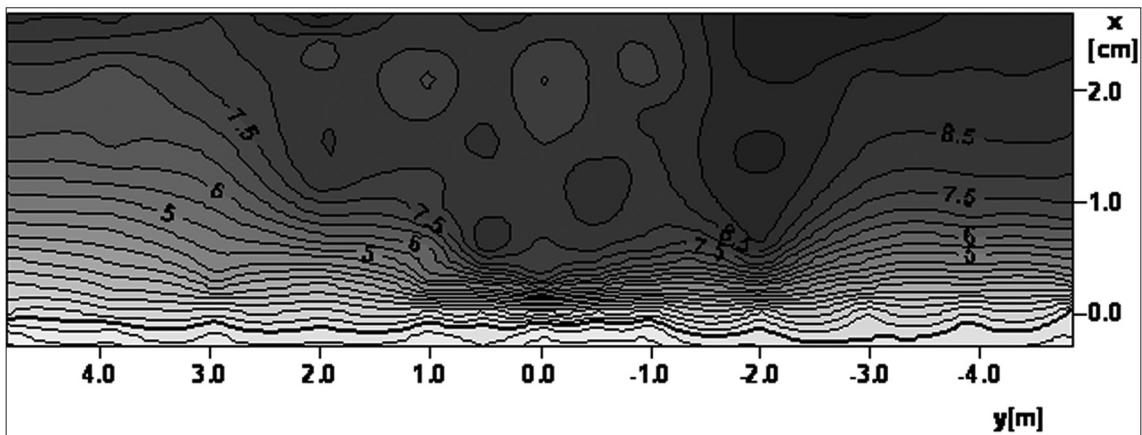


Figura 8 - Batimetria a tergo delle scogliere al termine della prima onda di modellamento.

prima onda di onda di modellamento. Nelle Figure 9 e 10 sono riportati invece i profili trasversali lungo le sezioni di misura e le curve di livello del fondale relativi all'onda di mareggiata.

Si evidenzia, come era da aspettarsi, la formazione di un profilo piuttosto ripido nella zona di azione dei frangenti, a partire dalla linea di riva che risulta arretrata di circa 0.12 m rispetto alla configurazione precedentemente stabilitasi. Il profilo di equilibrio è caratterizzato a partire dalla linea di riva da un primo tratto a pendenza pari a 16% esteso per circa 0.50 m e da un secondo, a pendenza pari a 2.0%, fino alle scogliere di protezione della spiaggia. Il materiale asportato dalle sezioni di misura più prossime al varco si ritrova accumulato nelle sezioni poste in prossimità delle testate del tronco struttura. In tale zona infatti tende a stabilirsi un profilo con pendenza pari a circa 1.0%.

La successiva azione dell'onda di modellamento ha determinato un lento raggiungimento di una nuova configurazione di equilibrio dinamico ed una trascurabile variazione della posizione della linea di riva.

Giova osservare pertanto che i profili di equilibrio stabilitasi al termine della sequenza temporale riprodotta risultano più ripidi in prossimità del varco centrale e meno ripidi in prossimità del pennello laterale; inoltre

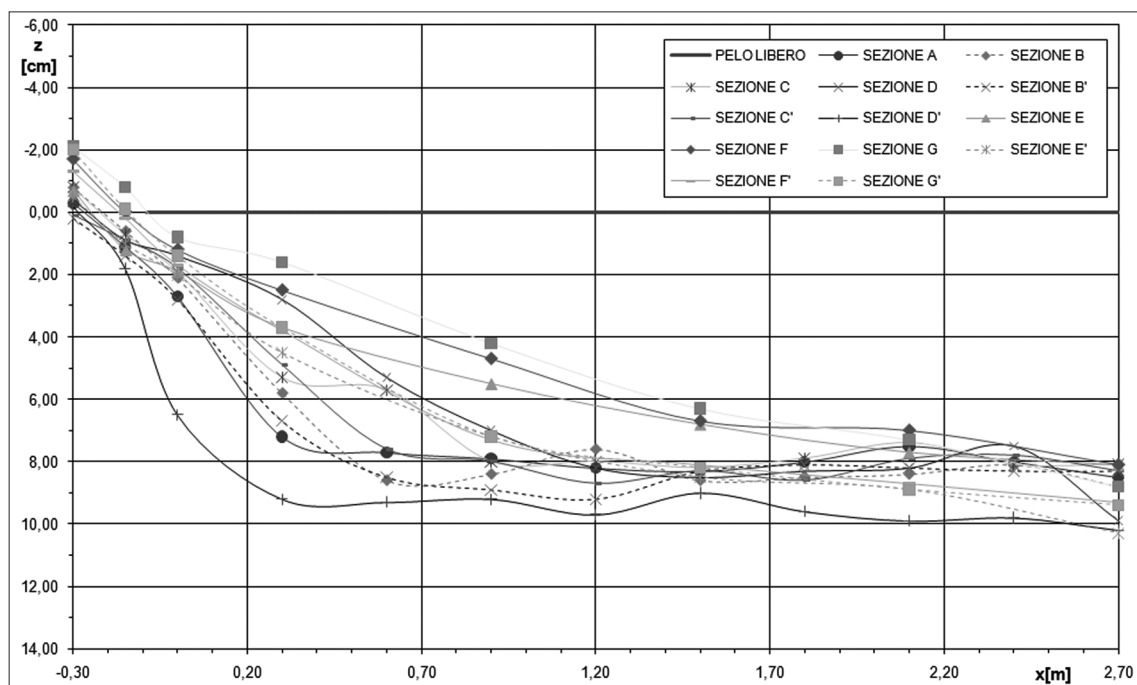


Figura 9 - Profili trasversali della spiaggia al termine della mareggiata.

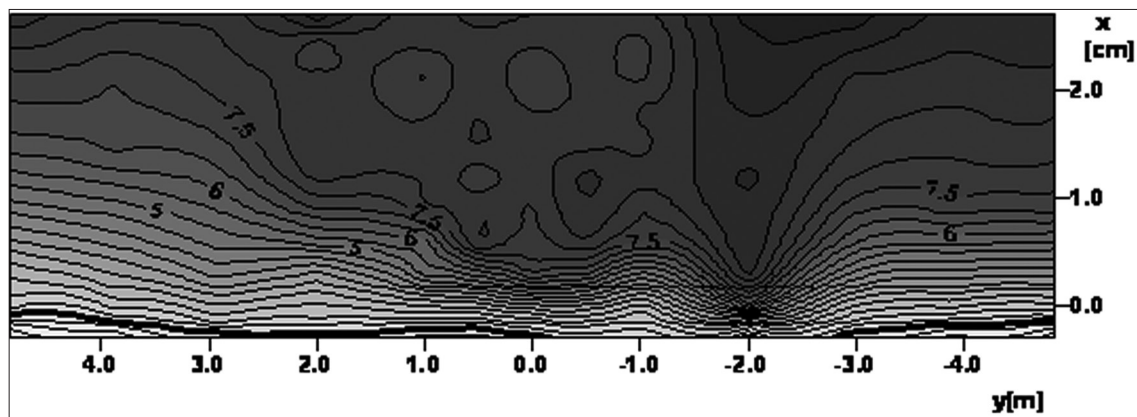


Figura 10 - Batimetria a tergo delle scogliere al termine della mareggiata.

l'arretramento della linea di riva è più marcato in corrispondenza del varco centrale raggiungendo il valore massimo lungo l'asse di simmetria.

L'arretramento medio della linea di riva è risultato pari a circa 0.12 m, corrispondenti a 6.0 m nel prototipo. Il materiale asportato rimane quindi contenuto all'interno della zona compresa tra la spiaggia e le scogliere a protezione della stessa.

La Figura 11 mostra la variazione morfologica subita dalla linea di riva.

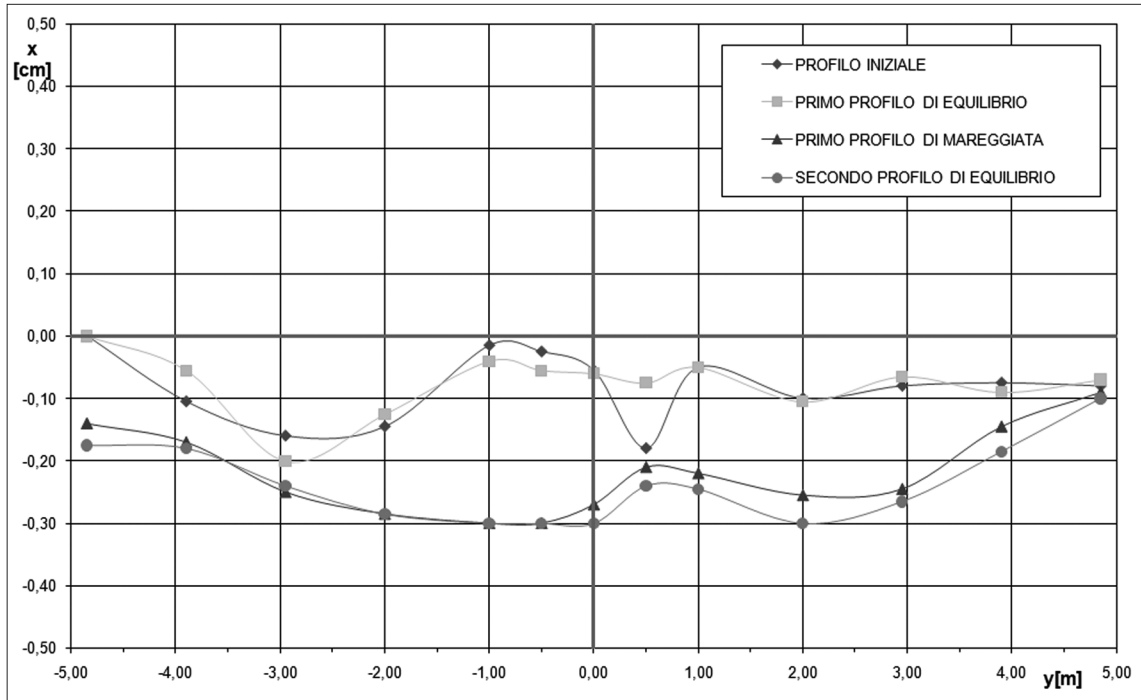


Figura 11 - Dinamica della linea di riva durante il ciclo di prove.

Considerazioni conclusive

L'indagine sperimentale svolta presso il laboratorio LIM_SUN è stata finalizzata alla valutazione del comportamento idraulico, della stabilità dell'opera a protezione del litorale Domizio nonché alla valutazione qualitativa degli effetti morfodinamici indotti dalla sua realizzazione sul litorale a tergo della stessa.

Il comportamento dell'opera è stato studiato attraverso la realizzazione di un modello in scala 1:50 che riproduce due scogliere, due varchi e uno dei due pennelli trasversali emersi di collegamento a terra della scogliera soffolta.

I risultati ottenuti possono essere così riassunti:

- valutazione del comportamento idraulico: il coefficiente di trasmissione dell'altezza d'onda a tergo del sistema di scogliere sommerse è risultato pari a circa 0.50 in corrispondenza della mareggiata di progetto, mentre assume valori pari a 0.47 in corrispondenza dell'onda di modellamento. I valori dei coefficienti di trasmissione misurati sono risultati in buono accordo con quelli valutati, in fase progettuale, con la nota formula di Van der Meer;
- valutazione della stabilità del manufatto: il grado di danneggiamento delle opere a seguito dell'azione della mareggiata di progetto è risultato compreso tra 0.6% e 2.0%. I valori misurati del grado di danneggiamento rientrano pienamente nel range dei valori proposti dalla formula di Van der Meer ($S=2$ -danneggiamento nullo);
- valutazione qualitativa degli effetti morfodinamici indotti dalla realizzazione dell'opera sul litorale a tergo della stessa: i profili di equilibrio stabilitesi al termine della sequenza temporale riprodotta risultano più ripidi in prossimità del varco centrale e meno ripidi in prossimità del pennello laterale; inoltre

l'arretramento della linea di riva è più marcato in corrispondenza del varco centrale raggiungendo il valore massimo lungo l'asse di simmetria. L'arretramento medio della linea di riva è risultato pari a circa 0.12m, corrispondenti a 6.0m nel prototipo. Il materiale asportato rimane quindi contenuto all'interno della zona compresa tra la spiaggia e le scogliere a protezione della stessa.

Bibliografia

- Burchart H.F., Kramer M., Lamberti A. e Zanuttigh B. (2006) - *Structural stability of detached low crested breakwaters*. Coastal Engineering, 53: 381-394.
- Coastal Engineering Research Center – CERC (1984) - *Shore Protection Manual*. U.S. Army Corps of Engineers.
- Di Natale M., Di Ronza S. e Vicinanza D. (2004a) - *Sul problema della doppia riflessione nelle vasche per la simulazione del moto ondoso tridimensionale*. Atti XXIX Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche. Trento, pp. 769-776.
- Di Natale M., Eramo C. e Vicinanza D. (2004b) - *Realizzazione di un impianto sperimentale per lo studio degli effetti della subsidenza sulla dinamica di una spiaggia emersa*. Atti XXIX Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche. Trento, pp. 761-768.
- Di Natale M., Eramo C. e Vicinanza D. (2008a) - *Experimental investigation on beach morphodynamics in presence of subsidence*. Journal of Coastal Research, 24: 222-231.
- Di Natale M., Di Ronza S., Eramo C. e Greco R. (2008b) - *Indagine sperimentale in vasca ondogenica per la verifica della stabilità degli interventi di ripascimento sul litorale di Spinesante e San Francesco ad Ischia*. Studi Costieri, vol. 14: 103-115.
- Di Natale M., Di Ronza S., Eramo C. e Greco R. (2008c) - *Verifica sperimentale di strutture per la protezione al piede di un intervento di ripascimento: il caso della spiaggia dei Maronti ad Ischia*. Studi Costieri, vol. 14: 117-134.
- Di Natale M., Di Ronza S., Eramo C. e Vicinanza (2008d) - *Il laboratorio di idraulica marittima della SUN: caratteristiche e potenzialità*. Atti 31° Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche. Perugia, pp. 1-8.
- Frigaard P. e Christensen M. (1994) - *An absorbing wave-maker based on digital filters*. Coastal Engineering, 13: 168-180.
- Frigaard P. e Brorsen M. (1995) - *A time domain method for separating incident and reflected irregular waves*. Coastal Engineering, 24 (3-4): 205-215.
- Hughes S.A. (1993) - *Physical Models and Laboratory Techniques in Coastal Engineering*. World Scientific Ed., Advanced Series on Ocean Engineering, 7: 568 pp.
- Kamphuis J.W. (1972a) - *Scale selection for wave models*. Report no 71 of Queen's University C.E, Ontario, Canada. pp. 173-1196.
- Kamphuis J.W. (1972b) - *Scale selection for mobile bed wave models*. Proc. of 13th Conf. on Coast. Eng.. Vancouver, Canada, 63: 1173-1195.
- 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, pp. 993-1009.
- Kamphuis J.W. (1991) - *Alongshore Sediment Transport*. SJ. Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng. ASCE, 117: 624-640.
- Kamphuis J.W. (2000) - *Introduction to Coastal Engineering and Management*. World Scientific Ed., Advanced Series on Ocean Engineering, 16: 43 pp.
- Van der Meer J.W. e Pilarczyk K.W. (1990) - *Stability of low-crested and reef breakwaters*. Proc. 22nd International Conference on Coastal Engineering. Delft, The Netherlands. pp. 1375-1388.
- Van der Meer J.W. e Stam C.J.M. (1992) - *Wave runup on smooth and rock slopes*. ASCE, Journal of WPC and OE, 188 (5): 534-550.

Ricevuto il 27/06/2011, accettato il 15/04/2012.

Associazioni biocenotiche su opere di difesa costiera parallele emerse: uno studio preliminare

Irene Ortolani, Monica Giovacchini, Claudia Becchi

Dipartimento di Biologia Evoluzionistica, Università di Firenze, via Romana, 17 - 50139 Firenze
Tel: +39 055 2288314, Fax: +39 055 222565, E-mail: irene.ortolani@gmail.com

Riassunto

Le opere di difesa costiera offrono un substrato adatto alla colonizzazione da parte di fito- e zoobentos; nello stabilirsi della successione ecologica intervengono certamente le caratteristiche strutturali delle barriere, come orientamento, materiale o età, ma anche il contesto locale risulta essere fortemente determinante. Le associazioni bentoniche risultanti si aggiungono al contesto ecologico dei substrati naturali, e possono rappresentare una minaccia per la biodiversità e la diffusione di specie aliene. Nell'ottica di una gestione integrata delle coste, e dato il carattere spesso locale delle strutture, è necessario caratterizzare le biocenosi delle barriere, per valutarne il loro ruolo in termini di impatto sugli ecosistemi circostanti.

Questo lavoro presenta i risultati preliminari derivanti da un anno di studio su quattro opere costiere toscane, simili per tipologia e struttura, mirato a descriverne lo stato di colonizzazione biocenotica mediante rilievi visivi della copertura algale e zoobentonica.

In ogni località sono state individuate specie caratteristiche, che permettono di discriminare con precisione fra le quattro stazioni analizzate, confermando così la tipicità di ogni singola struttura: l'identificazione di associazioni algali differenti è in accordo con i diversi contesti locali in cui le strutture analizzate sono inserite. Considerando poi la copertura algale in termini di gruppi morfofunzionali, le quattro località presentano comunità simili per struttura e funzionalità: una predominanza di forme filamentose, tipiche di ambienti "nuovi", e di forme arbustive, poca diversità e presenza specie tipiche di ambienti disturbati e ad alta energia.

La grande abbondanza di copertura algale composta da specie indigene e la scarsissima presenza di specie invasive non disegna un quadro allarmante, e risalta invece l'impatto positivo che queste strutture possono avere in termini di ruolo ricreativo, essendo poste in località altamente antropizzate.

Parole chiave: opere di difesa costiera, habitat artificiali, caratterizzazione biocenotica, organismi bentonici, biodiversità, impatto ambientale, gestione costiera.

Parole chiave: barriere artificiali, biodiversità, biocenosi, colonizzazione bentonica.

Abstract

Hard coastal defense structures provide a suitable substrate for colonization by phyto- and zoobenthos; the structural characteristics of barriers, such as orientation, material, or age, are certainly involved in the establishment of ecological succession, but also the local context has a key role in this process. The resulting benthic assemblages can represent a threat to biodiversity and facilitate the spreading of alien species. For an integrated coastal management, it is necessary to characterize the biocenosis on the artificial barriers, in order to assess their impact on surrounding ecosystems.

This paper presents the preliminary results from a study of coastal Tuscan barriers, similar in type and structure; data from a one-year sampling are used to describe benthic communities, using zoobenthic and algal cover visual surveys.

Characteristic species for each locality have been identified, which allow to discriminate accurately between the four stations analyzed, thus confirming the peculiarity of each structure: identification of different algal groups is consistent with the different local contexts in which the four structures are inserted. Considering however algal cover in terms of morphofunctional groups, the benthic assemblages have similar structure and function: a high predominance of filamentous forms, typical of "new" environments, a small number of species and the presence of species typical of disturbed and high energy environments.

The abundance of indigenous algal cover and the very low presence of invasive species does not seem to be alarming, while it might be interesting to focus on the positive impact that these structures, placed in highly populated and touristic places, for their potential recreational role.

Keywords: *hard coastal defense structures, biodiversity, biocenosis, benthos colonization.*

Introduzione

L'ambiente costiero rappresenta una risorsa di straordinario valore, per il ruolo fondamentale nello sviluppo economico, sociale e politico di molti paesi. Il suo degrado comporterebbe notevoli danni economici oltre che ambientali, in termini di perdita di paesaggio e dei suoi ecosistemi (Chapman e Underwood, 2011; Martin et al., 2005). Recenti studi mostrano che le minacce alla biodiversità marina, come modifiche nella composizione, dimensione e abbondanza delle popolazioni bentoniche (Moreira et al., 2006), o addirittura perdita o diminuzione della ricchezza di alcune specie (Chapman, 2003), o ancora diminuzione della capacità riproduttiva (Chapman e Underwood, 2011), possono avere conseguenze importanti per il funzionamento degli ecosistemi, modificando la produttività e il ciclo dei nutrienti e in ultima analisi possono colpire anche risorse e servizi per l'uomo (Loreau et al., 2002).

La tutela dell'ambiente marino e costiero, e quindi l'equilibrio idrogeologico delle aree costiere, è uno degli impegni prioritari assunti dalla Regione Toscana negli ultimi anni, e la proposta del Piano Regionale di Gestione Integrata della Costa è stato approvato dalla Giunta con la delibera n. 1214 del Novembre 2001. Le spiagge della Toscana sono largamente interessate da fenomeni erosivi, e dei 191 chilometri di litorale sabbioso continentale circa 70 sono in arretramento; a questo si aggiunge il dato preoccupante dell'entità di tale arretramento, che in alcuni casi supera i 3 metri l'anno (GNRAC, 2006); le opere di difesa costiera, ampiamente utilizzate sul territorio toscano, sono ormai integranti di molti tratti di costa.

Le scogliere artificiali utilizzate come difese costiere hanno il compito di opporre una resistenza meccanica all'azione erosiva del mare; oltre al loro ruolo "meccanico", però, finiscono col rappresentare un substrato roccioso ottimale per la colonizzazione delle comunità sessili zoo- e fitobentoniche, accompagnato solitamente da un fenomeno tigmotropico (attrazione esercitata da substrati duri ed in genere da corpi solidi sommersi nei confronti dei pesci, Breder e Nigrelli, 1935), che risulta di maggiore intensità se i substrati solidi sono rari, che è il caso dei fondali sabbiosi, detritici o fangosi dove maggiormente vengono impiegate le strutture di difesa costiera. Il bentos che colonizza le barriere diventa a sua volta una piattaforma alimentare sufficiente a soddisfare le esigenze di organismi sempre più grandi, avviando così una catena alimentare il cui ultimo anello è formato dalle specie commestibili per l'uomo (Pondella et al., 2002). Questa evidenza, unita alla crescente necessità di gestione delle zone costiere, ha stimolato l'incorporazione di conoscenze ecologiche in pratiche di ingegneria (Bergen et al., 2001).

Il substrato offerto dalle barriere artificiali può essere considerato simile a quello roccioso naturale, ma differisce da questo in termini di età, materiale, porosità, altezza, lunghezza, posizione, tipologia dei fondali circostanti, e viene inoltre interessato da fattori fisico-chimici e meteo marini diversi. Come primo passo nella valutazione dell'impatto degli interventi di difesa è quindi necessario caratterizzare le biocenosi di questi substrati, per capire se e quanto queste strutture artificiali ricalchino, per ricchezza di specie, distribuzione e abbondanze, i substrati di roccia naturale o se invece se ne discostino in modo sostanziale.

Le LCS (low-crested structures) possono essere colonizzate da alghe e invertebrati marini sessili che si trovano comunemente sugli habitat rocciosi naturali (Duffy-Anderson et al, 2003; Connell e Glasby, 1999; Knott et al., 2004; Bulleri, 2005; Moschella et al., 2005; Burt et al., 2009a, b, 2010): secondo alcuni studi,

in Italia, le specie dominanti sulle barriere sono specie comuni sulle sponde rocciose naturali, quali verdi efimere (*Ulva* spp.), cozze (*Mytilus* spp.), ostriche (*Ostrea edulis* e *Crassostrea gigas*), denti di cane (*Chthamalu* spp., *Balanus perforatus*) e patelle (*Patella* spp.).

Tuttavia il numero totale di specie e la densità di popolazione registrati sulle strutture artificiali sono stati generalmente inferiori rispetto alle sponde rocciose naturali adiacenti (Chapman, 2003; Moschella et al., 2005), mentre in alcuni casi l'abbondanza di pesci e organismi bentonici è stata registrata come superiore sulle barriere rispetto a quella delle scogliere naturali vicine, al contrario della biodiversità che è risultata minore (Pondella et al., 2002; Burt et al., 2009 a, b): la diversità complessiva del tratto di costa dove sono costruiti frangiflutti tende tuttavia ad aumentare e di conseguenza tende a crescere la diversità delle specie (Martin et al., 2005).

Uno dei principali fattori di disturbo per la vita gli organismi bentonici sembra essere la sedimentazione di argilla, limo, sabbia e detriti che circondano le LCS, portando a cambiamenti sia nella composizione e abbondanza di specie (Davis et al., 2002; Barros et al., 2001; Martin et al., 2005) che nella loro distribuzione e diversità, a un aumento della mortalità e a un ridotto insediamento.

Un secondo fattore limitante per la colonizzazione è la scarsa presenza di anfratti e piccole fratture, determinanti per la sopravvivenza di alcune specie, sulle barriere artificiali. Crepe e anfratti forniscono riparo dal moto ondoso e dalla predazione (Fretter e Manly, 1977; Underwood e Chapman, 1998), ma anche una minore esposizione all'essiccazione e insolazione (Raffaelli e Hughes, 1978; Mak e Williams, 1999; Chapman, 2003). La presenza di fessure e anfratti dipende a sua volta dal tipo di materiale utilizzato: le barriere artificiali in massi naturali come l'arenaria ospitano una maggiore abbondanza di bentos situato a livello di marea, come microalghe, molluschi e crostacei, rispetto a quelle in cemento, che presentano una minor rugosità superficiale (Moreira, 2006).

Altro fattore importante è l'età delle strutture: antozoi e poriferi presentano un basso tasso di crescita su substrati nudi, perciò sono meno abbondanti su siti artificiali di età recente, rispetto a substrati naturali (PerkolFinkel e Benayahu, 2005; Burt et al., 2009a). E' stato suggerito che siano necessari almeno dieci anni per lo sviluppo di comunità paragonabili a quelle di barriere naturali (Aseltine-Neilson et al., 1999; Abelson e Shlesinger, 2002; PerkolFinkel e Benayahu, 2005).

Altri importanti fattori da considerare nello studio della colonizzazione dei frangiflutti artificiali sono orientamento e posizione, determinanti a loro volta per l'ombreggiatura, l'idrodinamismo e la distanza dal fondo marino: la diversità è più alta su barriere poste a profondità maggiori e in generale sulla parte inferiore e più profonda delle barriere, dove essiccazione e sollecitazioni termiche sono ridotte a causa di brevi periodi di emersione (Moschella et al., 2005).

In molti casi la creazione di superfici rigide nelle regioni in cui non esistevano in precedenza (Bacchiocchi e Airoldi, 2003) facilita la diffusione di specie alloctone (Lambert e Lambert, 2003; Bulleri e Airoldi, 2005): insieme alla distruzione degli habitat, questa è ritenuta una delle più grandi minacce della biodiversità nativa (Gray, 1997; Sala et al., 2000). Esperimenti mostrano che le specie esotiche tendono a invadere gli habitat disturbati più facilmente di quelli indisturbati (Ceccherelli et al., 2000; Valentine e Johnson, 2003; Scheibling e Gagnon, 2006): sulle scogliere naturali sono state trovate più specie autoctone rispetto alle strutture artificiali. Inoltre il maggior numero di specie non indigene è stato ritrovato su frangiflutti di calcestruzzo. (Glasby et al., 2007).

E' inoltre da considerare l'impatto della necessaria gestione tecnica delle barriere: ci sono buone evidenze che frequenti manutenzioni per rafforzare o ristabilizzare le strutture o l'introduzione di funzionalità aggiuntive, abbiano un significativo impatto negativo soprattutto nei confronti delle specie più vulnerabili e in generale sulle comunità (Bacchiocchi e Airoldi, 2003): alcune specie presenti possono scomparire ma, allo stesso tempo, le nuove condizioni possono permettere a nuove specie di colonizzare il nuovo tipo di habitat (Martin et al., 2005). Per ogni nuova struttura introdotta nell'ambiente marino, ci vorrà del tempo per l'instaurarsi di nuove comunità biologiche. Così, le opere di difesa costiera devono essere stabili e costruite in modo tale che la manutenzione futura sia minima (Moschella et al., 2005).

In questo contesto regionale, nell'ambito dello studio della biodiversità costiera Toscana inserisce il progetto "Studio delle Barriere Artificiali nell'ambito della tutela della Biodiversità costiera Toscana – BiBAT" (Becchi et al., 2010), finanziato dalla Regione Toscana. Il progetto propone di descrivere gli effetti ecologici delle barriere artificiali utilizzate nell'ambiente costiero toscano, con l'obiettivo di definirne il valore biolo-

gico (anche in termini di impatto) attraverso il monitoraggio ed il campionamento di flora e fauna presenti sulle barriere, al fine di implementare il Piano di Gestione della Costa.

Il presente lavoro tratta alcuni risultati preliminari di questo progetto, riguardante la caratterizzazione delle biocenosi che popolano le strutture artificiali poste lungo le coste toscane. Lo scopo è stato quello di descrivere lo stato di colonizzazione biocenotica di barriere artificiali parallele di quattro località toscane, simili per tipologia e struttura: per la conformazione stessa della costa toscana che alterna tratti sabbiosi a rocciosi, si trovano spesso nelle vicinanze dei substrati rocciosi naturali, e quindi potenzialmente colonizzabili dalle specie presenti su questi. D'altra parte, i contesti fisici in cui sono inserite, cioè i fondali sabbiosi e dolcemente degradanti, sono caratterizzati da minore profondità, diverso idrodinamismo e differente tasso di sedimentazione rispetto ai fondali rocciosi naturali, e questi fattori ambientali potrebbero rappresentare un ostacolo all'instaurarsi di comunità biocenotiche simili a quelle presenti sulle vicine coste rocciose.

Le informazioni ricavate costituiscono un utile contributo preliminare per calibrare gli interventi di gestione e per garantire una migliore integrazione tra pianificazione degli usi e tutela dell'ambiente e della biodiversità.

Siti di campionamento

Come stazioni di rilievo sono state scelte le barriere artificiali situate nelle località Gombo (PI), Mazzanta (LI), Pratoranieri (GR) e Castiglione della Pescaia (GR), tutte scogliere parallele emerse e discoste dalla linea di riva poche decine di metri, quindi simili per struttura, orientamento e posizione.

Gombo

Situata all'interno della tenuta di San Rossore, la spiaggia di sabbia del Gombo è affacciata sul mar Ligure (provincia di Pisa, 43°43'N, 10°24'E).

Questa zona è sottoposta a tutela perchè costituisce un'area di elevato pregio naturalistico e presenta tassi di arretramento della linea di riva di oltre 5 metri all'anno (Pranzini, 2004): perciò la Regione ha ritenuto necessario l'uso, nel tratto meridionale, di strutture di difesa ortogonali alla costa e, in quello centrale, di opere parallele (scogliere) messe in loco a fine anni '60 e poi frequentemente rimaneggiate e mantenute; queste ultime sono state scelte come stazione di rilievo.

Mazzanta

La spiaggia della Mazzanta si affaccia sul mar Ligure e si trova nella provincia di Livorno (LI, 43°19'N, 10°27'E).

Le spiaggia, composta in alcuni tratti da sabbia e in altri da ghiaia, è caratterizzata da un fondale poco profondo. In seguito alla registrazione di un arretramento della linea di riva molto intenso negli ultimi decenni, nel 1997 la Regione ha posto numerose barriere parallele e pennelli per impedire l'erosione che hanno favorito la formazione di tomboli. I rilievi sono stati effettuati sui tratti di barriera paralleli alla linea di riva.

Pratoranieri

Frazione posta sul litorale a nord di Follonica, è bagnata dal mar Tirreno (GR, 42°55'N, 10°45'E). La gravità del fenomeno erosivo che caratterizza quest'area dagli anni cinquanta è da ricercarsi nei minori apporti sedimentari da parte dei corsi d'acqua, in particolare dal fiume Cornia. È probabile che gli interventi che avevano innescato il processo erosivo (bonifiche per colmata, costruzione di moli guardiani agli sbocchi a mare dei canali e opere di difesa all'esterno del settore), abbiano gradualmente smorzato il loro effetto ed oggi si stia procedendo verso una dinamica meno accentuata dei processi costieri. Probabilmente i litorali di Follonica non soffrono oggi nella loro globalità di un vero deficit sedimentario e sicuramente locali processi erosivi alternati a cospicui processi di accumulo e "tombolizzazione" a tergo delle opere di difesa parallele e distaccate sono indici nella loro complessità di un disequilibrio nei processi fisici di dinamica costiera, quindi di una mal ripartizione dei sedimenti in gioco nel trasporto netto sotto costa (Regione Toscana, 2001). I rilievi sono stati effettuati sulle barriere poste in località Pratoranieri, messe in loco in un lungo arco di tempo compreso fra il 1979 e il 1997.

Castiglione della Pescaia

Situata in provincia di Grosseto, la lunga spiaggia sabbiosa dell'omonimo paese si affaccia sul mar Tirreno

(GR, 42°45'N, 10°52'E). L'erosione della spiaggia, avvenuta nei decenni passati (soprattutto nel periodo 1983-1999), è imputabile alla presenza del porto canale di Castiglione della Pescaia che intercetta gran parte del trasporto litoraneo diretto verso nord-ovest.

Dal Documento Preliminare alla Progettazione della Regione Toscana risulta prioritario l'obiettivo di ristabilire l'equilibrio del tratto di litorale in erosione con l'utilizzo di barriere parallele alla costa e la riforma della spiaggia perduta negli ultimi anni. Tenendo conto della peculiare vocazione turistica di questo territorio e di tratti di costa sottoposta a tutela da normative speciali (SIR), che rappresentano una importante risorsa anche economica, gli interventi sono stati realizzati in modo da garantire il mantenimento della qualità del paesaggio e degli arenili. I rilievi sono stati eseguiti sulle barriere parallele a sud del porto, messe in loco negli anni '70.

Protocollo di campionamento

Il campionamento è avvenuto nel periodo primaverile-estivo del 2011. In ognuna delle quattro località sono stati scelti randomicamente due siti (A e B), per ognuno dei quali sono state effettuate più repliche di campionamento sia nel lato offshore che nel lato inshore, ad eccezione della località Mazzanta, in cui il rilievo inshore non è stato possibile vista la scarsissima profondità del fondale. Dopo un'analisi statistica della varianza condotta su dati provenienti da un primo rilievo esplorativo, il numero minimo di repliche per sito è stato fissato a tre sia per il lato esterno che per quello interno. Al Gombo ne è stato realizzato un numero maggiore: 3 interne e 4 esterne nel sito A, 4 interne e 5 esterne nel sito B. Alla Mazzanta il rilievo interno non è stato effettuato a causa della scarsa profondità del fondale, mentre nel lato esterno sono state fatte 4 repliche per sito.

Il campionamento consisteva nel rilievo visivo in loco (Bianchi et al., 2003), effettuato durante immersione, della copertura algale nelle diverse stazioni. Oltre a questo, veniva annotato il numero di fauna vagile e sessile che rientrava nel quadrato sperimentale. Bisogna specificare però che questa metodologia di campionamento, adatta allo studio della copertura algale e di conseguenza alla caratterizzazione dei substrati intertidali e subtidali, non è ottimale per un censimento esaustivo dello zoobentos: permette infatti il conteggio della macrofauna sessile ma non di quella vagile, per la quale andrebbe effettuato un campionamento più invasivo mediante sorbonatura (Bianchi et al., 2003). Pertanto i dati concernenti la fauna vagile devono essere considerati più da un punto di vista qualitativo (presenza segnalata di alcune specie) che quantitativo. Per ogni replica veniva posizionato randomicamente un quadrato di rilievo di 25x25 cm, diviso in 25 quadrati di 5x5 cm, ad una profondità di 1-2 metri e su superfici orizzontali. L'abbondanza veniva stimata visivamente in termini di percentuale di copertura per le specie vegetali (macroalghe) e di numero di individui presenti per fauna mobile e sessile non coloniale.

Per tutte le specie algali individuate è stata registrata la copertura in ogni quadrato di 5x5 cm, indicando valori da 1 (presenza) a 4 (copertura dell'intero quadrato). Dal momento che le alghe possono avere diverso portamento e pertanto disporsi su piani e strati diversi, la somma totale delle abbondanze relative in ogni quadrato può essere superiore a 100. Allo stesso modo, pur non essendo alghe, sono stati conteggiati i generi *Mytilus* e *Sabellaria*, in quanto tipicamente la loro presenza si traduce in copertura del substrato, e la fauna sessile coloniale come poriferi e briozoi.

Delle specie di non immediata identificazione è stata registrata l'abbondanza; sono state quindi prelevate per essere identificate in laboratorio con ausilio di binocolare e microscopio ottico. Alcune alghe e invertebrati sono stati identificati fino a livello di specie; tutti gli altri sono stati suddivisi in taxa superiori. Il fitobentos identificato tassonomicamente è stato anche classificato in categorie morfofunzionali, utili alla descrizione degli habitat marini (Volpi e Benvenuti, 2009).

Analisi dei dati

La struttura delle comunità bentoniche è stata valutata mediante un approccio multivariato: MDS (non-Metric Multidimensional Scaling) e PCO (Principal Coordinates analysis) per l'analisi esplorativa dei dati, e i test statistici PERMANOVA (PERMutational ANalysis Of VAriance) con disegno sperimentale a tre fattori, Canonical Analysis of Principal Coordinates (CAP) e DistLM (Distance Linear Model). Tutte le analisi sono state condotte utilizzando il software PRIMER e PERMANOVA+ (Clarke e Warwick, 2001; Anderson et al., 2008).

Risultati

Le specie algali identificate sono state 23 in totale, ma non di ognuna di esse è stata rilevata la presenza in tutte le stazioni di rilievo (Tab.1). Queste specie non sono in realtà le uniche presenti: sono infatti state rilevate numerose alghe di cui nell'identificazione non è stato possibile raggiungere il livello di genere o specie, ma che comunque contribuiscono a caratterizzare gli ambienti; in tabella ne viene indicato il gruppo morfofunzionale di appartenenza.

Tabella 1 - Lista delle specie presenti nelle diverse località. Di ogni specie o genere identificato è indicata l'appartenza a alghe rosse, verdi o brune e al rispettivo gruppo morfofunzionale. I valori fuori parentesi indicano la percentuale di copertura media di ogni specie nelle singole località; i valori in parentesi indicano invece la percentuale di distribuzione della specie stessa. La somma delle coperture relative può non raggiungere 100; il valore mancante è da attribuire alla presenza di patch sabbiosi o creste di scoglio nude. Per la corrispondenza dei gruppi morfofunzionali si veda la legenda della Tabella 2.

Divisione	Gruppo morfofunzionale	Genere / Specie	GOMBO	MAZZANTA	PRATO RANIERI (FOLLONICA)	CASTIGLIONE DELLA PESCAIA
Chlorophyta	FA	<i>Acetabularia acetabulum</i>		0,02 (0,18)	0,06 (0,82)	
Chlorophyta	FA	<i>Caulerpa prolifera</i>		0,01 (0,71)	<0,01 (0,29)	
Chlorophyta	FAL	<i>Caulerpa racemosa</i>	0,01 (0,08)	0,12 (0,51)	0,08 (0,41)	
Chlorophyta	FFF	<i>Chetomorpha</i> sp.		0,02 (0,54)	0,01 (0,44)	<0,01 (0,02)
Chlorophyta	FA	<i>Cladophora</i> sp.			<0,01 (0,25)	<0,01 (0,75)
Chlorophyta	FA	<i>Codium vermilara</i>		0,02 (1)		
Rhodophyta	CATE	<i>Corallina elongata</i>	0,03 (0,45)		0,03 (0,26)	0,05 (0,29)
Phaeophyta	FA	<i>Dictyota dichotoma</i>	0,18 (0,77)	<0,01 (0,01)	0,07 (0,17)	0,02 (0,05)
Phaeophyta	FA	<i>Dictyota linearis</i>	<0,01 (1)			
Chlorophyta	FA	<i>Flabellia petiolata</i>		0,01 (0,1)	0,01 (0,9)	
Rhodophyta	FA	<i>Gastroclonium clavatum</i>	0,04 (0,66)		0,02 (0,17)	0,02 (0,17)
Rhodophyta	FCCA	<i>Haliptilon virgatum</i>			0,01 (0,84)	<0,01 (0,16)
Rhodophyta	FA	<i>Halopithys incurva</i>	<0,01 (0,4)	0,01 (0,35)	<0,01 (0,05)	<0,01 (0,2)
Phaeophyta	FA	<i>Halopteris scoparia</i>			0,05 (0,99)	<0,01 (0,01)
Rhodophyta	FA	<i>Hypnea</i> sp.	0,04 (1)			
Rhodophyta	FCCA	<i>Jania</i> sp.	<0,01 (0,01)	0,01 (0,07)	<0,01 (0,06)	0,08 (0,86)
Rhodophyta	FA	<i>Laurencia</i> sp.			0,01 (1)	
Phaeophyta	FA	<i>Padina pavonica</i>		0,39 (0,95)	0,01 (0,02)	0,01 (0,03)
Rhodophyta	FC	<i>Peyssonnelia</i> sp.			<0,01 (1)	
Chlorophyta	FA	<i>Pseudochlorodesmis furcellata</i>		<0,01 (1)		
Rhodophyta	FA	<i>Radicilingua reptans</i>			0,03 (1)	
Phaeophyta	FA	<i>Taonia atomaria</i>	<0,01 (0,04)		0,08 (0,96)	
Chlorophyta	FA	<i>Ulva</i> sp.	0,07 (0,53)		0,11 (0,42)	0,02 (0,05)
Vari	CATE		0,01 (1)			
Rhodophyta	CC		0,03 (0,8)	<0,01 (0,05)	<0,01 (0,1)	<0,01 (0,05)
Vari	FC		<0,01 (0,35)		<0,01 (0,55)	<0,01 (0,1)
Vari	FFF	Feltro	0,2 (0,2)	0,3 (0,1)	0,4 (0,3)	0,78 (0,4)

Sono state identificate rispettivamente 12 specie a Castiglione della Pescaia, 19 a Pratoranieri, 11 alla Mazzanta e 11 al Gombo. Oltre a queste, in tutti i siti è stata registrata una grande quantità di feltro, gruppo FFF, la cui abbondanza varia da un 21% di copertura al Gombo fino a oltre il 70% a Castiglione, contrapposta ad una scarsissima presenza di corallinacee crostose (CC) e forme crostose (FC). All'interno di questi gruppi non si è proceduto all'identificazione delle specie, in quanto il valore biologico di questo gruppo non varia a seconda della sua composizione algale, e pertanto non è biologicamente rilevante.

Tutte le specie individuate sono da ritenersi autoctone, ad eccezione di *Caulerpa racemosa*, alga verde arbustiva invasiva che risulta presente sui substrati artificiali ad eccezione di Castiglione della Pescaia, ed inoltre

particolarmente importante nell'abbondanza specifica della Mazzanta (13% del totale). Essendo invasiva, è inserita nel gruppo Forme aliene (FAL) come indicato in Tabella 1; nell'analisi che segue è stata però considerata come Forma arbustiva in base alle sue caratteristiche morfofunzionali.

Le specie sono state successivamente raggruppate nei rispettivi gruppi morfofunzionali (Tab. 2). I gruppi rilevati su questi substrati sono 7 (sui 12 presenti sulle coste rocciose naturali toscane, BioMarT 2009), e fra questi i più rappresentati sono i gruppi Forme arbustive (FA) e Feltro – forme filamentose (FFF), che rispettivamente rappresentano il 39,4% e il 40,2% della copertura totale rilevata, oltre ad essere i gruppi più rilevanti in ognuna delle località considerata.

Tabella 2 - Gruppi morfofunzionali rappresentati nelle quattro località di rilievo. In grassetto è riportata la percentuale di copertura media. Quando presente, il numero fra parentesi indica il numero di specie che compongono il gruppo; se non indicato, non si è proceduto all'identificazione specifica all'interno del gruppo (CC, FFF). Nell'ultima colonna è riportata l'abbondanza relativa (%) di ogni gruppo rispetto alla copertura totale rilevata. CATE: corallinacee articolate erette; CC: corallinacee crostose; FA: forme arbustive; FCCA: forme corallinacee articolate; FFF: feltro forme filamentose; FPS: forme plagiotrope sciafile. ZOO: *Mytilus* e *Sabellariasp.*

GRUPPI MORFO FUNZIONALI	GOMBO	MAZZANTA (PISA)	PRATO RANIERI (FOLLONICA)	CASTIGLIONE DELLA PESCAIA	Copertura totale dei GMF (%)
CATE	0,04 (1)		0,03 (1)	0,05 B	3,6
CC	0,03	<0,01	<0,01	<0,01	1,4
FA	0,36 (8)	0,59 (9)	0,51 (14)	0,08 (7)	39,4
FC	<0,01 (1)		<0,01 (1)	<0,01 (1)	0,4
FCCA	<0,01 (1)	0,01 (1)	0,02 (2)	0,08 (2)	2,1
FFF	0,22	0,35	0,42	0,79	40,2
ZOO	0,35 (1)	0,06 (2)			12,9

Per quanto riguarda lo zoobentos, sulle barriere del Gombo sono stati rilevati diversi gruppi di interesse, nonostante il metodo di campionamento non mirato al conteggio della fauna. In Tabella 3 sono riportati esclusivamente i taxa sessili, dal momento che presenza e abbondanza della fauna vagile rilevata non sono realmente indicative della comunità bentonica. Fra i taxa segnalati in tabella sono di particolare importanza i primi due, *Mytilus* sp. e *Sabellaria* sp.: entrambi, quando presenti, tendono a coprire interi patch, colonizzando in modo massivo il substrato; la presenza di entrambi è stata rilevata al Gombo, dove rappresentano oltre il 35% della copertura totale. Il genere *Sabellaria* è stato rilevato anche in località Mazzanta, con una copertura di circa il 6%.

Tabella 3 - Zoobentos sessile rilevato nelle quattro stazioni di campionamento. I generi *Mytilus* e *Sabellaria* sono stati conteggiati in termini di copertura (%), mentre per gli altri taxa è stato conteggiato il numero di individui, di cui in tabella è riportato il valore medio fra le repliche.

TAXON	Specie o nome comune	GOMBO (PISA)	MAZZANTA (LIVORNO)	PRATO RANIERI (FOLLONICA)	CASTIGLIONE DELLA PESCAIA (GR)
Bivalvia	<i>Mytilus</i> sp.	33,4 (%)			
Polychaeta	<i>Sabellaria</i> sp.	5,1 (%)	6,1 (%)		
Balanomorpha	Balani	0,63			
Bivalvia	<i>Gastrochaena dubia</i>	1,63			
Bryozoa	(Briozoi incrostanti)	3,13		0,45	
Gastropoda	<i>Patella</i> sp.				0,08
Gastropoda	Vermetidi	0,56			
Hydrozoa	Idrozoi	0,06			
Polychaeta	Serpulidi	0,63			0,08
Porifera	Spugna incrostante	0,31			
Porifera	<i>Cliona</i> sp.	0,13			

La Analisi delle Coordinate Principali (PCO), un'analisi esplorativa che permette di correlare la distanza fra i punti con le variabili utilizzate, è in grado di separare le quattro località (Fig.1A); le specie vegetali più correlate con tale separazione risultano essere *Gastroclonium clavatum*, *Hypnea* sp., *Ulva* sp., *Dictyota dichotoma*, *Corallina elongata*, che nel loro insieme contraddistinguono per abbondanza buona parte delle repliche del Gombo e pesano nella distanza fra Pratoranieri (dove sono più abbondanti), Castiglione e Mazzanta (dove sono assenti). E' invece il feltro, il "tappeto" algale compatto, a separare il Gombo, dove è molto poco abbondante, dalle altre località che ne sono invece caratterizzate. A distinguere il Gombo dalle altre località contribuisce altrettanto fortemente, anche se in senso opposto, la specie *Mytilus* sp.: risulta estremamente abbondante al Gombo, in alcune repliche in particolare, mentre scarsa o assente nelle altre località. Infine *Padina pavonica*, *Jania* sp., *Chaetomorpha* sp. e *Caulerpa racemosa* sono fortemente correlate con la separazione della Mazzanta, in cui risultano estremamente più abbondanti.

La stessa analisi, condotta per indagare eventuali differenze fra lato interno ed esterno delle varie località mostra invece come i due lati non siano nettamente separati dall'analisi (Fig. 1B); tutte le repliche interne presentano sicuramente grande abbondanza di feltro e assenza di *Mytilus* sp., anche se questo carattere non risulta distintivo essendo proprio anche di molte repliche esterne.

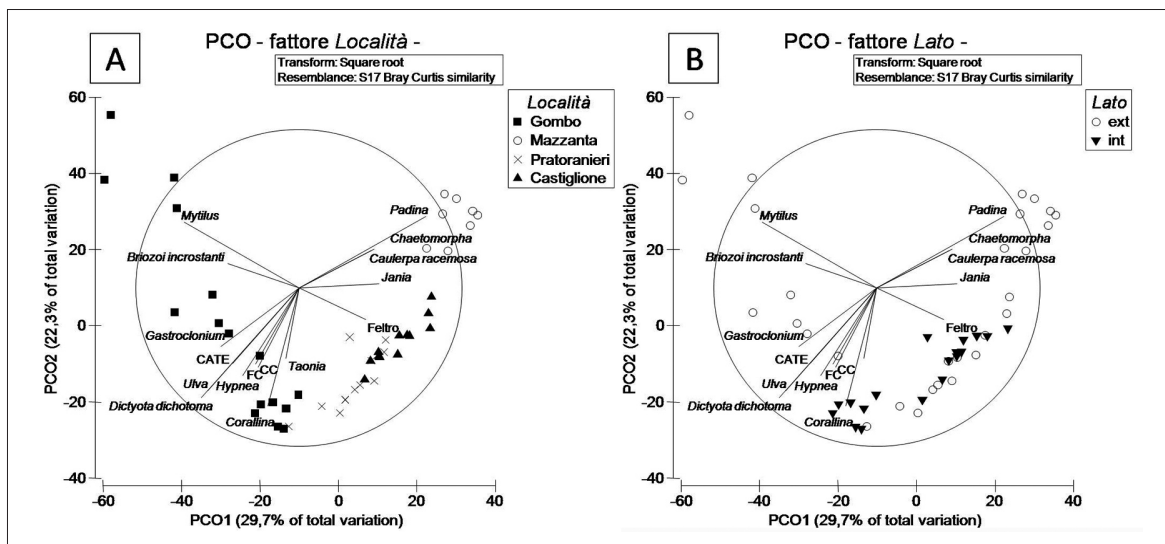


Figura 1 - (A) Output grafico della PCO; le repliche delle diverse località sono plottate secondo le prime due componenti principali (PCO1, PCO2). Il valore riportato sugli assi indica la loro incidenza percentuale sulla varianza totale dei dati. I vettori riportati in figura mostrano le variabili correlate (Spearman) con gli assi per un valore $>0,5$; la lunghezza del vettore è proporzionale al loro valore di correlazione (r circonferenza = 1), la loro proiezione sugli assi indica, oltre al valore, il verso di correlazione. (B) Output grafico della PCO in cui sono mostrate le repliche interne (bianche) ed esterne (nere) senza distinzione fra località. Il valore riportato sugli assi, come in Fig.1A, indica la loro correlazione con la distribuzione dei punti.

La Permanova, analisi multidimensionale della varianza, a tre fattori e permutazionale è stato condotto con il MonteCarlo test. Sono stati considerati tre fattori: Località, ortogonale e fisso, a quattro livelli (Gombo, Mazzanta, Pratoranieri, Castiglione); Lato, ortogonale e fisso, a due livelli (esterno, interno); Sito, e nidificato in Latoe Località random, a due livelli (A, B). Il test individua differenze significative per i fattori Localitàe Lato, ed anche nell'interazione fra questi (Tab. 4). In accordo col disegno sperimentale non risultano invece differenze significative nel fattore Sito.

Il PairWise condotto sul fattore Località mostra che tutte le località sono diverse fra loro, mentre quello condotto sull'interazione dei fattori Località e Lato mostra che in tutte le località testate, Castiglione, Pratoranieri e Gombo, il lato interno è significativamente diverso da quello esterno (Tab. 5).

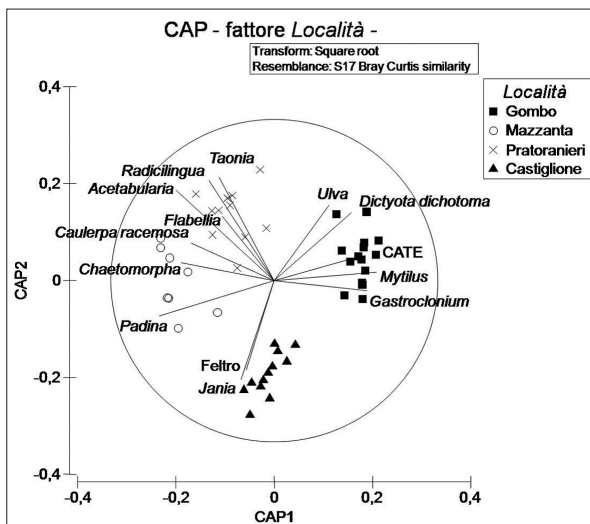
Tabella 4 - Risultati della Permanova. Sono riportati i valori di Pseudo-F e la significatività del MonteCarlo test (P(MC)). Il test segnala celle vuote nell'interazione "lo x la" dovute all'assenza di repliche nel lato interno in località Mazzanta.

PERMANOVA -tabella dei risultati-					
Fattore	df	SS	MS	Pseudo-F	P(MC)
Lo	3	47186	15729	18,999	0,0001
La	1	5676,1	5676,1	7,0208	0,0003
loxla	2	9838,9	4919,5	6,0772	0,0001
si(loxla)	7	5714,8	816,4	1,247	0,1746
Res	34	22259	654,69		
Total	47	94780			

Tabella 5 - Risultati dei Post Hoc Test per dati accoppiati condotti sul fattore Località e sull'interazione dei fattori Località e Lato; sono riportati i valori di t e la significatività del MonteCarlo test (P(MC)).

Post- Hoc TEST, dati accoppiati			
Fattore "Località"	Gruppi	t	P(MC)
	Castiglione, Pratoranieri	4,3661	0,0001
	Castiglione, Mazzanta	4,6082	0,0002
	Castiglione, Gombo	4,2473	0,0001
	Pratoranieri, Mazzanta	5,0667	0,0002
	Pratoranieri, Gombo	3,4946	0,0003
	Mazzanta, Gombo	4,4445	0,0002
fattori "Local. x Lato"	Località	Gruppi	P(MC)
	Castiglione	ext, int	0,33
	Pratoranieri	ext, int	0,0217
	Gombo	ext, int	0,0164

Infine, è stata condotta l'Analisi Canonica delle Coordinate Principali (CAP) sul fattore Località; come



mostra la figura 2, le quattro località risultano nettamente separate, come confermato dagli altissimi valori di correlazione delle prime CAP. Questa analisi mostra a quali variabili sono attribuibili le differenze fra le località: *Ulva* sp., *Dictyota dichotoma*, *Mytilus* sp., *Gastroclonium clavatum* il gruppo CATE risultano distintivi della località Gombo. Feltro e *Jania* sp. caratterizzano invece Castiglione, mentre *Taonia pseudociliata*, *Radicilingua reptans*, *Acetabularia acetabulum* e *Flabellia petiolata* sono invece distintive di Pratoranieri. Infine, *Chaetomorpha* sp., *Padina pavonica* e *Caulerpa racemosa* sono le specie che caratterizzano la Mazzanta.

Figura 2 - Output grafico della CAP; sono plottate le quattro diverse località e i vettori corrispondenti alle variabili con correlazione di Spearman > 0,5. Valori di correlazione degli assi: CAP1= 0,947; CAP2= 0,873.

Il Leave-one-out Allocation Test assegna correttamente il 100% dei casi alle rispettive località (Tab. 6).

Tabella 6 - Risultati del test di validazione incrociato (Leave-one-out Allocation Test). Nell'ultima colonna sono riportati i valori % di correttezza dell'attribuzione dei singoli casi. La correttezza totale è di 48/48 (100%) mentre l' "Errore di attribuzione" è dello 0%.

Gruppo	Castiglione	Pratoranieri	Mazzanta	Gombo	Totale	% correttezza
Castiglione	12	0	0	0	12	100
Pratoranieri	0	12	0	0	12	100
Mazzanta	0	0	8	0	8	100
Gombo	0	0	0	16	16	100

Discussione e conclusioni

Questo studio preliminare, basato su un solo anno di campionamento, mette in luce come le comunità bentoniche, in particolare quelle fitobentoniche, differiscano significativamente fra le quattro stazioni analizzate. Le barriere artificiali su cui sono stati condotti i campionamenti sono paragonabili sia per la tipologia di intervento sia per i fattori ambientali cui sono sottoposte: sono infatti parallele alla linea di costa, parzialmente emerse, e realizzate in roccia naturale; inoltre, sono circondate da fondi molli e poste a profondità comparabili. Offrono pertanto un substrato potenzialmente simile alla colonizzazione da parte delle specie bentoniche. Ciononostante, i rilievi condotti mostrano come ognuna delle quattro località sia colonizzata da associazioni bentoniche caratteristiche. Questo è in accordo con le aspettative, dal momento che ogni intervento ha necessariamente portato con sé una specificità legata al contesto locale in cui veniva inserito: granulometria della sabbia, quantità del sedimento sospeso, idrodinamismo, correnti, torbidità delle acque, temperature massime e minime stagionali influiscono infatti sulla successione ecologica che si avrà su un dato substrato, e sulla conseguente associazione bentonica che ne risulta. Le quattro stazioni, pur accomunate da barriere strutturalmente simili, presentano certamente differenze in termini di fattori ambientali, oltre che di substrato (composizione delle rocce utilizzate per l'intervento, loro porosità, ecc...).

La località del Gombo, all'interno del Parco di San Rossore (Pisa) è risultata la più ricca come numero di specie se si considerano le specie sia fito- che zoobentoniche; prendendo in esame solamente il fitobentos è invece Pratoranieri (Follonica, Grosseto) a presentare un numero più elevato di specie algali. D'altra parte, alcuni gruppi morfofunzionali (CC e FFF, per approfondimenti si veda BioMarT, Volpi e Benvenuti, 2009), come spiegato nelle metodologie di rilievo, sono stati rilevati senza identificarne la composizione specifica; il numero di specie individuato non può quindi essere utilizzato per un confronto reale della biodiversità, pur restando un'indicazione utile sulla composizione algale dei diversi siti.

E' invece interessante soffermarsi sulle diverse specie che caratterizzano le quattro località.

Il Gombo presenta, come detto, un maggior numero di specie zoobentoniche; fra queste è di particolare importanza la presenza di *Mytilus* sp., che concorre per oltre il 30% nella copertura del substrato, e come si evince dai grafici e dalle analisi pesa significativamente nella distinzione di questa località. I tappeti di cozze risultano in effetti caratteristici del lato offshoredelle barriere del Gombo; sono invece pressochè assenti nel lato interno, probabilmente per il minor movimento delle acque e la presenza maggiore di sedimento, poco sopportato da questi bivalvi.

Insieme al genere *Mytilus*, nella caratterizzazione del Gombo è determinante un altro animale, *Sabellaria* sp., un anellide polichete che utilizza granelli di sabbia per costruire i tubi in cui vive, arrivando a creare veri e propri reefslà dove è abbondante: al Gombo rappresenta circa il 6% della copertura, ed è più abbondante sul lato esterno. Oltre allo zoobentos, di particolare rilievo in questa località sono le alghe del genere *Hypnea*, non rilevate nelle altre località, e il gruppo morfofunzionale delle Corallinacee crostose (CC). Ancora, le specie *Ulva* sp., *Dyctiota dichotoma*, *Gastroclonium clavatum* e *Corallina elongata*, pur non rappresentando percentuali di copertura particolarmente notevoli, sono state registrate in questo sito ma non negli altri, ad eccezione di alcuni record a Pratoranieri. Infine è da segnalare, essendo specie notoriamente invasiva nel Mar Mediterraneo, la presenza di *Caulerpa racemosa*, se pure rappresente solo l'1% di copertura del substrato.

Le barriere della Mazzanta presentano una copertura di feltro (FFF) che supera il 30%; sono inoltre caratterizzate da alcune specie poco presenti o assenti nelle altre località: *Codium vermilara*, *Chaetomorpha* sp. e, particolarmente importante nella caratterizzazione di questo sito, *Padina pavonica*. Quest'alga bruna dalla caratteristica forma a ventaglio è tipica di acque poco profonde, sopporta bene temperature anche molto alte e l'illuminazione forte ma non l'emersione. Alla Mazzanta rappresenta quasi il 40% della copertura totale, e

negli altri siti è stata rilevata in quantità minime; insieme a *Caulerpa racemosa* e *Chaetomorpha* sp. ha infatti correlazione >0,5 nella CAP, che assegna correttamente il 100% delle repliche alle rispettive località. Per quanto riguarda *C. racemosa*, oltre il 60% della quantità totale rilevata nelle quattro stazioni è concentrata in questo sito, dove rappresenta circa il 13% di copertura totale. Quest'alga invasiva, sopporta bene i fondi sabbiosi e melmosi, e trova evidentemente un substrato favorevole alla colonizzazione alla Mazzanta, in cui la copertura a feltro è spesso associata a grandi quantità di sedimento.

Le barriere analizzate a Castiglione sono invece nettamente caratterizzate da una predominante copertura di feltro, che raggiunge quasi l'80%. Il feltro è un'associazione algale che sopporta bene la frequente e prolungata emersione ed in generale si ritrova in ambienti ad alta energia, oltre che negli ambienti di recente formazione: le Forme filamentose sono infatti fra le prime, assieme a *P. pavonica* ad attecchire sui substrati nuovi. Inoltre, è considerata tipica di ambienti disturbati, anche se non necessariamente impattati o inquinati: il disturbo può essere un elevato idrodinamismo, un elevato tasso di sedimentazione o appunto una frequente esposizione a luce diretta e emersione. Le barriere a sud del porto di Castiglione considerate in questo studio si trovano a profondità in certa misura minori rispetto alle altre analizzate, e molto a ridosso della linea di riva; le condizioni ambientali cui sono sottoposte le associazioni algali sono probabilmente più impattati rispetto alle altre stazioni.

Come emerge dalla CAP, insieme al feltro sono le alghe del genere *Jania* a caratterizzare le barriere di Castiglione. rappresentano circa l'8% di copertura e sono state individuate principalmente in questa località.

Infine, a Pratoranieri è stato registrato il più alto numero di specie algali identificato; ad eccezione del gruppo feltro e del genere *Ulva*, di cui comunque non è stata indagata la composizione specifica, nessuna delle specie individuate rappresenta una percentuale di copertura superiore al 10%; l'assenza di specie nettamente dominanti è tipica di ambienti in equilibrio e colonizzati da comunità stabili. Fra queste, sei non sono state ritrovate sugli altri substrati artificiali: *Taonia pseudociliata*, *Halopteris scoparia*, *Haliptylon virgatum*, *Radicilingua reptans*, *Peyssonelia* sp. e *Laurencia* sp.; in aggiunta, pur coprendo percentuali minime di substrato, su queste barriere è stata registrata la presenza di corallinacee crostose, presenti solo al Gombo. E' presente anche *Caulerpa racemosa*, se pure in percentuale di copertura inferiore all'1%.

La differente età di queste strutture influisce probabilmente nel determinare le differenze nel tipo di associazioni presenti: ne è esempio la varietà di flora e fauna riscontrata al Gombo, che è in accordo con l'età dell'intervento (in loco dagli anni '60). I successivi interventi di manutenzione possono aver introdotto nuovi massi o rimaneggiato quelli precedentemente posizionati, ma i nuovi substrati potevano facilmente essere colonizzati dalla vicina flora già insediata.

I fattori ambientali concorrono, assieme all'età, alla caratterizzazione dei siti: le barriere di Castiglione, posizionate negli anni '70, sono più vecchie di circa dieci anni rispetto a quelle di Pratoranieri, eppure presentano una minore ricchezza di specie: in questa "povertà" incidono probabilmente la vicinanza alla riva, la minore profondità complessiva e la maggior esposizione del substrato analizzato (circa 1 metro di profondità) all'azione del sedimento sospeso.

La barriere della Mazzanta, coeve di quelle a Pratoranieri, ne risultano statisticamente ben distinte, così come dalle altre località. I rilievi effettuati sui fondali circostanti hanno in effetti evidenziato una sostanziale differenza rispetto agli altri siti: le barriere sono circondate, fino al piede, da una prateria di *Cymodocea nodosa*, da matte morta di *Posidonia oceanica* e da spot di *Caulerpa prolifera*, la caulerpacea indigena dei nostri mari. Inoltre, i fondali circostanti sono ricoperti da uno spesso strato di detrito di origine organica, risultando parzialmente fangosi e rendendo l'acqua torbida anche con bassa turbolenza.

A prescindere dalle differenze riscontrate a livello di composizione specifica, le barriere artificiali appaiono abbondantemente colonizzate, e presentano forti somiglianze nel tipo di associazione instaurata. Tutte sono accomunate dalla presenza di specie euriecie, cioè largamente tolleranti e particolarmente adatte ad ambienti variabili; ne sono esempio il feltro, così come *Ulva* sp. e *Dictyota dichotoma*. Sono invece quasi assenti alghe più specializzate che sono tipiche dei nostri substrati rocciosi naturali (come ad esempio i generi *Halopteris* e *Halopytis*), e il numero di specie non è elevato. D'altra parte, se pure con una minore diversità rispetto ai siti naturali non sembrano essere particolarmente abitate da specie invasive: è stata ritrovata solo *C. racemosa*, che è però ormai considerata ubiquitaria nelle coste toscane, in particolare nella zona circostante Livorno (BioMarT, Volpi e Benvenuti 2009). Oltre il 60% di *C. racemosa* rilevata in questo studio è stata individuata sulle barriere della Mazzanta, nella zona meridionale della provincia Livorno; pertanto, la presenza di *C. ra-*

cecosa su queste barriere non è da attribuire alla presenza in sé di substrato artificiale, ma più probabilmente alla vicinanza di questo alla zona di maggior infestazione dell'alga invasiva. Il rilevamento di quantità minori ma sempre importanti (oltre il 30% del totale rilevato) di quest'alga invasiva nella località Pratoranieri, ancora più a sud di Livorno, sembra confermare quest'ipotesi.

Considerando le associazioni algali in termini di gruppi morfofunzionali (Tab. 2) la composizione delle quattro stazioni risulta piuttosto comparabile: non solo dalla netta predominanza dei gruppi Feltro forme filamentose (FFF) e Forme arbustive (FA), ma anche dalle abbondanze relative degli altri gruppi presenti. Questi substrati artificiali, pur mostrando differenze locali, appaiono quindi accomunati da tipologie associative simili, da una ricchezza di specie non elevate e da una predominanza di specie generaliste. D'altra parte, questo scenario è in accordo con il contesto in cui sono inserite le strutture artificiali: i bassi fondali sabbiosi circostanti fanno sì che le comunità bentoniche siano sottoposte all'azione erosiva di importanti quantità di sedimento, a periodiche emersioni di alcune parti del substrato e a forti escursioni termiche. Gli stessi fattori determinano anche le significative differenze riscontrate nella composizione algale fra lato interno ed esterno delle strutture: gli specchi d'acqua interni hanno profondità molto ridotte a causa delle grandi quantità di sedimento che vi si depositano; l'acqua può raggiungere temperature elevate, l'idrodinamismo è molto ridotto rispetto al lato esterno ed il sedimento stesso copre buona parte del substrato artificiale.

Infine, è certamente da prendere in considerazione l'impatto che queste strutture possono avere sugli ambienti naturali circostanti. Importante è ad esempio il potenziale ruolo delle barriere artificiali come stepping stones: i substrati rocciosi possono infatti costituire vere e proprie "stazioni di passaggio" per le specie di substrato duro, siano esse indigene o invasive, permettendo loro di attraversare lunghi litorali sabbiosi che altrimenti rappresenterebbero barriere geografiche sufficienti al loro contenimento (Airoldi e Beck, 2007). In quest'ottica, le barriere artificiali potrebbero contribuire a una migrazione più rapida, o più capillare, di specie di habitat rocciosi, invasive o meno, lungo le coste del Mediterraneo. Le conseguenze negative sono evidenti per quanto riguarda le specie invasive, ma non è da sottovalutare il rischio cui questo fenomeno sottopone le stesse comunità indigene, in termini di perdita di ricchezza e biodiversità.

In ultima analisi vanno anche sottolineati i potenziali impatti positivi di queste strutture. Il fatto di essere comunque abbondantemente colonizzate e con una ricchezza di specie in parte correlata con l'età dell'intervento è uno di questi: le strutture infatti costituiscono una grande risorsa per molta fauna marina, che vi si concentra; in particolare, è nota l'attrazione che esercitano sui pesci, dovuto sia al naturale effetto tigmotropico sia per l'abbondante risorsa di cibo che costituiscono. Questo potrebbe tradursi in un importante ruolo di questi substrati in termini di produzione di specie indigene, ma soprattutto è da considerare l'impatto positivo che questi aspetti possono avere sulla fruibilità della zona: le strutture sono solitamente poste a difesa di luoghi turistici e di spiagge frequentate, e la grande abbondanza di forme vegetali e animali attorno alle barriere di certo contribuisce al ruolo ricreativo di queste zone.

Bibliografia

- Abelson A. e Shlesinger Y. (2002) - *Comparison of the development of coral and fish communities on rock-aggregated artificial reefs in Eilat, Red Sea*. Journal of Marine Science, 59: 122-126.
- Airoldi L. e Beck M.W. (2007) - *Loss, status and trends for coastal marine habitats of Europe*. Oceanography and Marine Biology: An Annual Review, 45: 345-405.
- Anderson M.J., Gorley R.N. e Clarke K.R. (2008) - *PERMANOVA+ for PRIMER: Guide to Software and Statistical Methods*. PRIMER-E Ed., Plymouth, UK.
- Aseltine-Neilson D., Bernstein B., Palmer-Zwahlen M., Riege L. e Smith R. (1999) - *Comparisons of turf communities from Pendleton Artificial Reef Torrey Pines*. Artificial Reef, and a natural reef using multivariate techniques. Bulletin of Marine Science, 65: 37-57.
- Bacchiocchi F. e Airoldi L. (2003) - *Distribution and dynamics of epibiota on hard structures for coastal protection*. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 56: 1157-1166.
- Barros F., Underwood A.J. e Lindgarth M. (2001) - *The influence of rocky reefs on the structure of benthic macrofauna in nearby soft-sediments*. Estuarine Coastal and Shelf Science, 52: 191- 199.
- Becchi C., Cannicci S. e Ortolani I. (2010) - *Progetto di ricerca "Studio per la gestione delle Barriere Artificiali nell'ambito della tutela della Biodiversità costiera Toscana - Bi.B.A.T.* In: Il monitoraggio costiero mediterraneo: problematiche e tecniche di misura. F. Benincasa Ed. Atti del III Convegno IBIMET: 405-412.

- Bergen S.D., Bolton S.M. e Fridley J.L. (2001) - *Design principles for ecological engineering*. Engineering, 18: 201-210.
- Bianchi C.N., Pronzato R., Cattaneo-Vietti R., Benedetti Cecchi L., Morri C., Pansini M., Chemello R., Milazzo M., Fraschetti S., Terlizzi A., Peirano A., Salvati E., Benzoni F., Calcinai B., Cerrano C. e Bavestrello G. (2003) - Capitolo 6 - *I fondi duri*. In: Manuale di metodologie di campionamento e studio del benthos marino mediterraneo. M.C. Gambi, M. Dappiano Eds., Livorno. Biologia Marina Mediterranea, 10 (suppl.): 199-231.
- Breder C.M. Jr e Nigrelli R.F. (1935) - *The influence of temperature and other factors on the winter aggregation of the sunfish, Lepomis auritus, with critical remarks on the social behavior of fishes*. Ecology, 16: 33-47.
- Bulleri F. (2005) - *The introduction of artificial structures on marine soft- and hardbottoms: ecological implications of epibiota*. Environmental Conservation, 32: 101-102.
- Bulleri F. e Airoldi L. (2005) - *Artificial marine structures facilitate the spread of a nonindigenous green alga, fragile ssp. tomentosoides in the north Adriatic Sea*. Journal of Applied Ecology, 42: 1063-1072.
- Burt J., Bartholomew A., Bauman A., Saif A. e Sale P.F. (2009a) - *Coral recruitment and early benthic community development on several materials used in the construction of artificial reefs and breakwaters*. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 373: 72-78.
- Burt J., Bartholomew A., Usseglio P., Bauman A. e Sale P.F. (2009b) - *Are artificial reefs surrogates of natural habitats for corals and fish in Dubai United Arab Emirates?* Coral Reefs, 28: 663-675.
- Burt J., Feary D., Bauman A., Usseglio P. e Sale P.F. (2010) - *The influence of wave exposure on coral community development on man-made breakwater reefs, with a comparison to a natural reef*. Bulletin of Marine Science, 86: 839-859.
- Ceccherelli G., Piazzini L. e Cinelli F. (2000) - *Response of the non-indigenous racemosa (Forsskal) J-Agardh to the native seagrass oceanica (L.) Delile: effect of density of shoots and orientation of edges of meadows*. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 243: 227-240.
- Chapman M.G. (2003) - *Paucity of mobile species on constructed seawalls: effects of urbanization on biodiversity*. Marine Ecology Progress Series, 264: 21-29.
- Chapman M.G. e Underwood A.J. (2011) - *Evaluation of ecological engineering of "armoured" shorelines to improve their value as habitat*. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 400: 302-313.
- Clarke K.R. e Warwick R.M. (2001) - *Change in marine communities: an approach to statistical analysis and interpretation*, 2nd edition. PRIMER-E Ed., Plymouth, UK.
- Connell S.D. e Glasby T.M. (1999) - *Do urban structures influence local abundance and diversity of subtidal epibiota? A case study from Sydney Harbour, Australia*. Marine Environmental Research, 47: 373-387.
- Davis J.L.D., Levin L.A. e Walther S.M. (2002) - *Artificial armored shorelines: sites for open-coast species in a southern California bay*. Marine Biology, 140: 1249-1262.
- Duffy-Anderson J.T., Manderson J.P. e Able K.W. (2003) - *A characterization of juvenile fish assemblages around man-made structures in the New York New Jersey Harbor Estuary, USA*. Bulletin of Marine Science, 72 (3): 877-889.
- Fretter V. e Manly R. (1977) - *The settlement and early benthic life of Littorina neritoides (L.) at Wembury, S. Devon*. Journal of Molluscan Studies, 43 (3): 255-262.
- Glasby T.M., Connel S.D., Holloway M.G. e Hewitt C.L. (2007) - *Nonindigenous biota on artificial structures: could habitat creation facilitate biological invasions?* Marine Biology, 151: 887-895.
- GNRAC (2006) - *Le spiagge della Toscana*. Studi costieri, 10: 15-20.
- Gray J.S. (1997) - *Marine biodiversity: patterns, threats and conservation needs*. Biodiversity and Conservation, 6:153-175.
- Knott N.A., Underwood A.J., Chapman M.G., Glasby T.M. (2004) - *Epibiota on vertical and on horizontal surfaces on natural reefs and on artificial structures*. Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom, 84: 117-130.
- Lambert C.C., Lambert G. (2003) - *Persistence and differential distribution of nonindigenous ascidians in harbors of the Southern California Bight*. Marine Ecology Progress Series, 259: 145-161.
- Loreau M., Naem S. e Inchausti P. (2002) - *Biodiversity and Ecosystem Functioning - Synthesis and Perspectives*. Oxford University Press, Oxford.
- Mak Y.M. e Williams G.A. (1999) - *Littorinids control high intertidal biofilm abundance on tropical, Hong*

- Kong rocky shores*. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 233 (1): 81-94.
- Martin D., Bertasi F., Colangelo M.A., de Vries M., Frost M., Hawkins S.J., Macpherson E., Moschella P.S., Satta M.P., Thompson R.C. e Ceccherelli V.U. (2005) - *Ecological impact of coastal defence structures on sediment and mobile fauna: evaluating and forecasting consequences of unavoidable modifications of native habitats*. Coastal Engineering, 52: 1027-1051.
- Moreira J. (2006) - *Patterns of occurrence of grazing molluscs on sandstone and concrete seawalls in Sydney Harbour (Australia)*. Molluscan Research, 26: 51-60.
- Moreira J., Chapman M.G. e Underwood A.J. (2006) - *Seawalls do not sustain viable populations of limpets*. Marine Ecology Progress Series, 322: 179-188.
- Moschella P.S., Abbiati M., Åberg P., Airolidi L., Anderson J.T., Bacchiocchi F., Bulleri F., Dinesen G.E., Frost M., Gacia E., Granhag L., Jonsson P.R., Satta M.P., Sundelöf A., Thompson R.C. e Hawkins S.J. (2005) - *Low-crested coastal defence structures as artificial habitats for marine life: using ecological criteria in design*. Coastal Engineering, 52: 1053-1071.
- Perkol-Finkel S. e Benayahu Y. (2005) - *Recruitment of benthic organisms onto a planned artificial reef: shifts in community structure one decade post-deployment*. Marine Environmental Research, 59: 79-99.
- Pondella D., Stephens J. e Craig M. (2002) - *Fish production of a temperate artificial reef based on the density of embiotocids*. Journal of Marine Science, 59: S88-S93.
- Pranzini E. (2004) - *La forma delle coste*. Zanichelli Ed., Bologna.
- Raffaelli D.G. e Hughes R.N. (1978) - *The effects of crevice size and availability on populations of Littorina rudis and Littorina neritoides*. Journal of Animal Ecology, 47 (1): 71-83.
- Regione Toscana (2001) - *Studio della dinamica morfologica e sedimentaria del Golfo di Follonica*. A cura di E. Pranzini per il Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università degli Studi di Firenze. Relazione inedita, Comune di Follonica.
- Sala O.E., Chapin F.S., Armesto J.J., Berlow E., BloomWeld J., Dirzo R., Huber-Sanwald E., Huenneke L.F., Jackson R.B., Kinzig A., Leemans R., Lodge D.M., Mooney H.A., Oesterheld M., Poff .N.L., Sykes M.T., Walker B.H., Walker M. e Wall D.H. (2000) - *Global biodiversity scenarios for the year 2100*. Science, 287:1770-1774.
- Scheibling R.E. e Gagnon P. (2006) - *Competitive interactions between the invasive green alga Codium fragile ssp tomentosoides and native canopy-forming seaweeds in Nova Scotia (Canada)*. Marine Ecology Progress Series, 325: 1-14.
- Underwood A.J. e Chapman M.G. (1998) - *Variation in algal assemblages on wave-exposed rocky shores in New South Wales*. Marine and Freshwater Research, 49 (3): 241-254.
- Valentine J.P. e Johnson C.R. (2003) - *Establishment of the introduced kelp Undaria pinnatifida in Tasmania depends on disturbance to native algal assemblages*. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 295: 63-90.
- Volpi C. e Benvenuti D. (2009) - *BioMarT – Atlante della Biodiversità. Individuazione di biocenosi vulnerabili e hotspot di biodiversità in ambiente costiero di substrato duro e censimento di specie rare nel mare della Toscana*. Regione Toscana Ed., Firenze.

Ricevuto il 7/05/2012, accettato il 30/05/2012.

La dinamica delle barre nell'evoluzione morfologica della spiaggia di Terracina (Lazio, LT): risultati preliminari

Luca Parlagreco¹, Renata Archetti², Umberto Simeoni³, Saverio Devoti¹,
Andrea Valentini⁴, Sergio Silenzi¹

¹ISPRA, email: luca.parlagreco@isprambiente.it

²DICAM, Università di Bologna

³Dipartimento di Scienze della Terra, Università degli Studi di Ferrara

⁴ARPA-SIMC Emilia Romagna

Riassunto

L'evoluzione morfologica di una porzione (1 km) del litorale di Terracina (Lazio centro meridionale) è stata analizzata tramite dati di video-monitoraggio e topo-batimetrici. Dati di previsione ondosa a cadenza oraria, basata sul modello SWAN, sono stati utilizzati per confrontare la variabilità morfologica all'energia ondosa incidente. Il tratto analizzato rappresenta una porzione di un settore ripasciuto nel 2006 dove, su 1.6 km di litorale, sono stati sversati 345800 m³ di inerti. Le attività di video-monitoraggio sono iniziate circa un anno e mezzo dopo l'intervento di ripascimento, omettendo quindi l'analisi dell'evoluzione morfologica del periodo immediatamente dopo il rinascimento. Complessivamente, i dati di monitoraggio hanno coperto un periodo di osservazione di 34 mesi, da Gennaio 2008 a Ottobre 2010. Indicatori per il posizionamento della linea di riva e delle barre sommerse sono stati estratti dalle immagini video acquisite dalla centralina di monitoraggio e comparati con rilievi topo-batimetrici eseguiti lungo la stessa porzione di spiaggia. A circa un anno e mezzo dal ripascimento, non si registrano forti arretramenti del cuneo di ripascimento e i fondali sono caratterizzati da una barra sommersa lineare e disposta parallelamente a riva. Tale assetto morfologico rimane pressoché inalterato durante i primi 17 mesi di video-monitoraggio finché una serie di violente mareggiate dai quadranti meridionali, con massime altezze d'onda di 4 m, rimodellano profondamente i fondali a fine Novembre 2008. La linea di riva arretra di circa 20 m, si origina una nuova barra sottomarina e quella pre-esistente migra verso mare. Sebbene la linea di riva sia arretrata notevolmente, a tre anni dal ripascimento il tratto analizzato presenta un bilancio netto nullo, compensato da una forte crescita dei fondali antistanti. Negli ultimi 5 mesi di osservazioni la cresta di barra esterna perde la sua evidenza morfologica e induce la migrazione verso mare della barra interna, che essendo più esposta all'energia del moto ondoso incidente, sviluppa una morfologia lineare e uniforme lungo costa.

Parole chiave: video-monitoraggio, ripascimento, trasporto sedimentario, migrazione della barra, dissipazione energetica delle onde.

Abstract

The morphologic evolution of a 1 km-long stretch of the Terracina beach (Tyrrhenian Sea, Italy) is analyzed based on a data set of time-exposure video-images collected during a 34-month period (January 2008 - October 2010). Proxies for shoreline and sandbar crest positions were extracted from video-images and compared with topographic and bathymetric surveys. Forecasted wave data (from SWAN-MEDITARE operational chain) have been used to

constrain the morphologic variability to external forcing. Along the studied sector a beachface nourishment was executed in June 2006, 345800 m³ of materials were pumped along 1.6 km of beach. The video-monitoring activity started one year and half after the nourishment, thus the early morphologic evolution after the nourishment remained unresolved. Anyway, the first video-observation (January 2008) depicts a modest retreat of the nourished wedge and the restoration of a shore-parallel linear bar. This morphology lasted until a cluster of southerly storms (with maximum wave height of 4 m drastically reshaped the nearshore morphology at the end of November 2008. As a consequence the shoreline retreats 20 m, a new inner bar gets generated close to the shoreline and the previous one migrates off-shore. Even if the shoreline experienced a considerable retreat, three years later the nourishment was executed the analyzed stretch of beach is characterized by a null net balance due to the high sedimentation on the bars zone. During the last 5 months of observations the outer bar crest lost its morphologic evidence and contemporaneously inner bar moved 20 m offshore and straightened.

Keywords: *video-monitoring, beach face nourishment, sediment transport, sand bar migration, Tyrrhenian Sea.*

Introduzione

La gestione del fenomeno erosivo rappresenta uno dei maggiori problemi che la politica costiera deve affrontare. Il ripascimento artificiale della spiaggia è una delle tecniche più utilizzate per ripristinarne il budget sedimentario.

Le esperienze nazionali nella pianificazione e nel monitoraggio di tali interventi sono demandate alle amministrazioni locali (Comuni e Regioni). In Italia, nel periodo 1995-2007 sono stati dragati e sversati circa 17.2 milioni di m³ di volumi di inerti (ISPRA, 2009). La tecnica più diffusa di attuazione dell'intervento consiste in refluenti limitati alla sola spiaggia emersa (beachface nourishment) con impiego di inerti principalmente sabbiosi e solo in rari casi ghiaiosi o commisti a sabbia (Evangelista et al. 1992; Benassai et al., 1997; Aminti et al., 2002; Cammelli et al., 2006; Ferri et al., 2008; Pranzini, 2008).

Durante il monitoraggio del post-ripascimento non si può prescindere dall'effettuare ripetuti rilievi topografici al fine di accertare la corretta evoluzione dell'opera e per porre riparo ad eventuali inconvenienti insorti (*erosional hot spots*). La frequenza di questi rilievi, variando da mesi ad anni, pregiudica però l'accertamento di variazioni morfologiche a breve termine, spesso importanti per comprendere il comportamento della nuova spiaggia soprattutto durante eventi singoli o ripetuti di mareggiata. Per ovviare a questa carenza di osservazione continuativa, il video-monitoraggio rappresenta un potente strumento di osservazione ad alta frequenza, per lunghi periodi e con elevate risoluzioni spaziali, quindi utile soprattutto per registrare quella vasta gamma di rapidi aggiustamenti morfologici che è tipica del post-ripascimento (Elko et al., 2005). Le tecniche di video-monitoraggio, inoltre, forniscono numerose informazioni sulla dinamica costiera ad un costo contenuto (Archetti et al., 2008).

In Italia il video-monitoraggio è stato adottato solo in alcune regioni, le serie temporali più lunghe sono state registrate dalla Regione Emilia Romagna, presso le stazioni di Lido di Dante (Armaroli et al., 2006; 2007; Kroon et al., 2007, Archetti, 2009; Archetti e Lamberti, 2009; Armaroli e Ciavola, 2011) e Igea Marina (Archetti et al., 2008; Archetti e Zanuttigh, 2010). Anche nel panorama Mediterraneo questa tecnica non ha ancora conosciuto un impiego adeguato alle sue potenzialità, essendo attiva solo una stazione Argus operante dal 2003 presso la marina di Barcellona (Ojeda e Guillén, 2006; 2008) e alcune stazioni KOSTA (www.kostasystem.com) installate lungo la costa francese (Rihouey et al., 2009).

Nel Giugno 2007, successivamente ad un intervento di ripascimento eseguito in Maggio-Giugno 2006, è stata installata dalla Regione Lazio una stazione di video-monitoraggio SVM (Sistemi di Video Monitoraggio) presso la spiaggia di Terracina, denominata *Torre del Sole*. Il presente lavoro, utilizzando i dati da essa acquisiti (Gennaio 2008 - Ottobre 2010), mira ad identificare il comportamento di questa spiaggia che risente, almeno per l'abbondanza di inerti ancora in loco, dell'intervento del 2006. Il lavoro, si basa su un'analisi che integra dati SVM, informazioni sul moto ondoso e dati di rilievi topografici ripetuti nel tempo.

Sito di studio

Il sito video-monitorato si estende per circa 1 km lungo la spiaggia di Terracina (lungomare Circe) e corrisponde per buona parte al tratto (1.6 km) interessato dal ripascimento del Maggio-Giugno 2006. Più in generale il sito si colloca nel settore orientale dell'unità fisiografica sud-pontina (Lazio centro-meridionale),

un arco litorale che fronteggia il Mar Tirreno e raccorda il promontorio del Circeo alle propaggini orientali dei Monti Ausoni (Fig. 1). Il sedimento di questo litorale è costituito da sabbie fini e medio-fini con a luoghi materiali più grossolani (granuli e ghiaie medio-fini) in genere concentrati in prossimità della riva e derivanti da alcuni ripascimenti anche recenti. Il litorale, cronicamente in erosione, è difeso quasi ovunque da opere rigide e i numerosi interventi morbidi che si sono susseguiti dal 1980 ad oggi hanno introdotto un ingente quantitativo di sedimento “estraneo” a questa costa, pari a 2.3 milioni di m³ (ISMAR, 2009; Centro di Monitoraggio GIZC).

La costa dell'unità fisiografica è esposta ai mari da sud, sud-ovest e sud-est che determinano un *drift* litoraneo netto diretto verso est (Evangelista et al., 2004). Generalmente, la variabilità stagionale dell'energia ondosa incidente è caratterizzata da un consistente numero di mareggiate nel periodo Ottobre-Maggio e periodi di minore intensità dell'attività ondosa nell'intervallo Giugno-Settembre.

L'urbanizzazione e la pressione turistica hanno notevolmente alterato gli ambienti naturali di questo tratto costiero. Già verso la fine degli anni '50 il cordone dunale preesistente veniva distrutto e la mobilità dei sedimenti lungo costa veniva notevolmente compromessa dalla costruzione di opere rigide di difesa longitudinali e trasversali. Queste influenze hanno riguardato anche la spiaggia di Terracina, oggi confinata dalla foce armata del Fiume Portatore (Porto Badino), dal porto di Terracina e, all'interno, dalla strada del lungomare Circe. Appare rilevante il ruolo delle prime due strutture sul trasporto litoraneo verso est, così come si evince dalla vistosa asimmetria della spiaggia ai due lati della foce armata, dal progressivo ampliamento del litorale sopraflutto del porto (Fig. 1) e dal frequente interrimento all'entrata dello stesso, aspetti questi già presenti prima dell'intervento di ripascimento del 2006. Per quest'ultimo intervento sono stati utilizzati 345800 m³ di sabbie-ghiaiose (ghiaia 28%) sversate sulla spiaggia emersa che da Porto Badino prosegue verso est per 1.6 km. In Figura 1 è riportata la linea di riva, intesa come 0 m slm, della spiaggia appena ripasciuta (Giugno 2006). Nell'estate del 2007 il *budget* sedimentario dell'unità fisiografica sud-pontina è stato ulteriormente implementato con lo

sversamento di circa 1 milione di m³ di inerti su una porzione di circa 4 km di litorale presso la foce del Fiume Sisto, posizionato 7 km sopraflutto del lungomare di Terracina (Fig. 1).

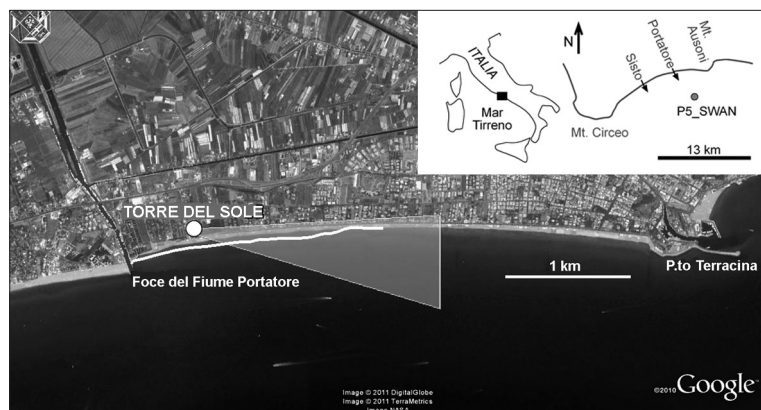


Figura 1 - Localizzazione dell'area di studio all'interno dell'unità fisiografica sud-pontina. Tematismi acquisiti dal portale Centro di Monitoraggio GIZC della Regione Lazio. In particolare si evidenziano la linea di riva di giugno 2006 (tratto continuo bianco) e la porzione di litorale inquadrato da una delle camere della stazione di video-monitoraggio Torre del Sole.

Materiali e metodi

Forzanti marine

I dati ondometrici utilizzati sono stati ottenuti dalle uscite del sistema di previsione dello stato del mare del Servizio IdroMeteoClima di ARPA Emilia-Romagna, denominato MEDITARE (MEDiterraneo-ITALia-REgione, Valentini et al., 2007). Questo sistema è basato sul modello SWAN (Booij et al., 1999), versione 40.51AB, e consiste in una sequenza di corse annidate che parte da un modello sull'intera area mediterranea ad una risoluzione di circa 25 km. Questo primo *run* fornisce le condizioni al contorno per il calcolo delle onde sull'intero dominio italiano ad una risoluzione di 8 km. Nella fase successiva, infine, la risoluzione viene aumentata tramite la precedente tecnica di *nesting* ma localizzata ai domini costieri.

Il dato di input del modello è rappresentato dai valori orari del vento a 10 m previsti dal modello meteorologico COSMO-I7 (COSMO Newsletter, 2004) e dal modello IFS-ECMWF per il dominio geografico esterno a quello di COSMO.

La serie temporale di onde utilizzata in questo studio è stata estratta su un nodo della griglia di calcolo localizzata a circa 1200 m da riva e approssimativamente ad una profondità di 21 m (P5_SWAN in Fig. 1). La lun-

ghezza del *dataset* di onde (713 giorni) è minore della serie di dati video (1025 giorni), ma sufficientemente lunga per avere tutte le informazioni ondamiche necessarie a coprire un arco temporale di due stagioni invernali consecutive.

Dai dati di onda sono stati identificati e isolati 28 eventi di mareggiata attraverso la metodologia sviluppata durante il progetto europeo CADSEALAND (2004-2006, INTERREG IIIB CADSES – EU Project), che identifica come mareggiata le condizioni di moto ondoso in cui l'altezza significativa è maggiore della soglia di 1.5 m per almeno sei ore consecutive.

In seguito è stato calcolato il flusso energetico per ogni evento secondo il metodo di Dail et al. (2000), ovvero l'integrale tra i momenti di inizio e di fine della mareggiata della potenza ondosa

$$\int \frac{1}{8} \rho g H^3 c_g dt$$

dove c_g è la celerità di gruppo, ρ la densità dell'acqua marina, g l'accelerazione di gravità ed H l'altezza d'onda.

Rilievi di campo

La Regione Lazio (Centro di Monitoraggio) ha eseguito un rilievo topo-batimetrico nel Giugno 2006 per valutare il nuovo assetto morfologico e il volume di spiaggia ripasciuta. Per tutto il 2007 e 2008 non sono stati eseguiti ulteriori rilievi topo-batimetrici, se non mappature del posizionamento della linea di riva (reperibili sul portale internet del progetto Beachmed-e). Da Marzo 2009 ad Ottobre 2010 quattordici rilievi topografici eseguiti tramite dGPS con tecnica Real Time Kinematic (RTK) hanno fornito informazioni sull'evoluzione morfologica del tratto monitorato dalla stazione video di *Torre del Sole*. La griglia di campionamento è stata impostata per assicurare una copertura di 25 m e 2 m rispettivamente nelle direzioni *alongshore* e *cross-shore*. Sono stati eseguiti due rilievi batimetrici completi in Agosto 2009 e Aprile 2011, con profili spaziatosi ogni 100 m, a cui si aggiungono misure ripetute su specifici transetti per monitorare la persistenza temporale delle morfologie sommerse. Sia per i rilievi topografici che batimetrici è stato definito un sistema di riferimento locale centrato sul posizionamento della stazione di video-monitoraggio. Gli assi del nuovo sistema di riferimento locale sono stati ruotati di circa 5°N per far coincidere la direzione media

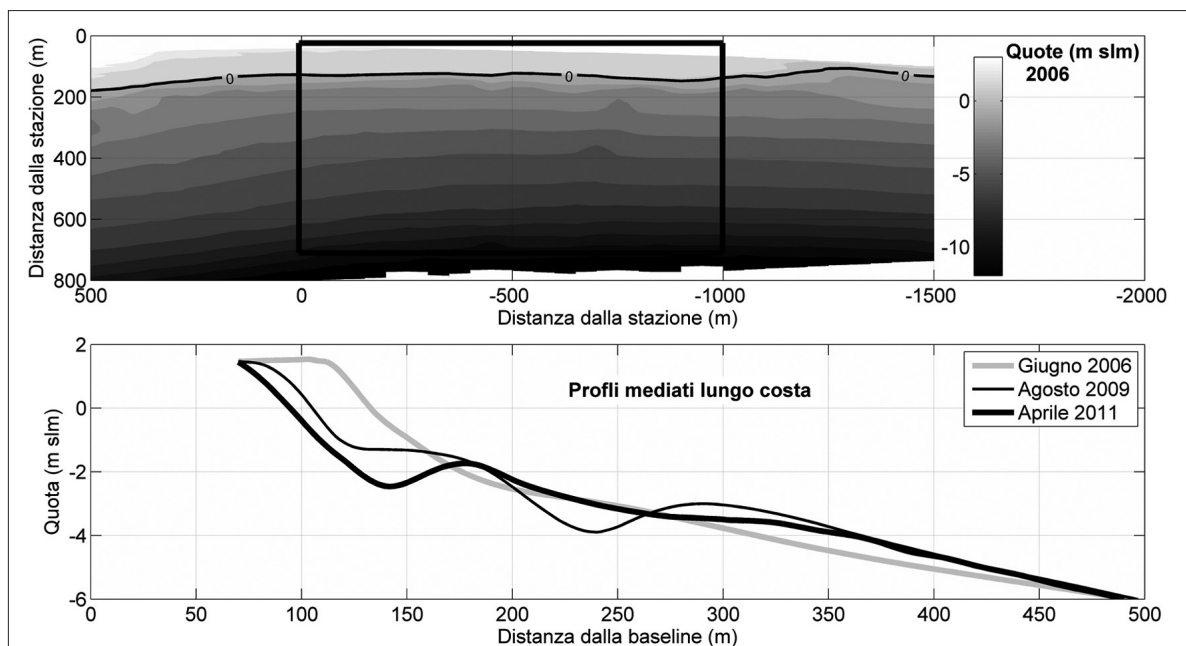


Figura 2 - Profili rappresentativi dell'area di studio. Nel pannello superiore è riportata la finestra entro cui sono stati mediati i profili, riferita alla morfologia del post-ripascimento 2006. I profili mediati sono riportati nel pannello inferiore. Sia i profili che la mappa sono riportati nel sistema di riferimento metrico locale.

della spiaggia con l'asse x e la direzione media *cross-shore* con l'asse y.

I dati topo-batimetrici sono stati sintetizzati tramite l'estrazione di alcuni indicatori morfologici. In particolare, la profondità minima della barra è stata scelta come rappresentativa della sua cresta ed è stata mediata lungo costa a rappresentare il posizionamento delle barre. Per quanto riguarda la spiaggia emersa, per ogni rilievo topografico è stato mediato lungo costa il posizionamento *cross-shore* delle quote 0 e +1 m slm. Le deviazioni tra il valore mediato e il dato originale sono state rappresentate dalla deviazione standard. In questo modo i movimenti *cross-shore* di queste isoipse sono stati evidenziati dai valori mediati lungo costa e la loro variabilità di forma planimetrica è stata documentata dall'andamento (temporale) della deviazione standard. In Figura 2 sono riportati i profili mediati lungo 1 km di costa rispettivamente per i rilievi di Giugno 2006, Agosto 2009 e Aprile 2011 e l'areale su cui è stata computata la loro media spaziale (riferito al settore ripasciuto nel 2006).

Dati video

Durante l'estate 2007 è stata installata una stazione di video-monitoraggio SVM sul tetto dell'albergo Torre del Sole, a 44 m slm e a circa 100 m dalla linea di riva. Il sistema è costituito da due fotocamere programmate per collezionare cinque foto a lunga esposizione (*timex*) ogni giorno.

Per ottenere informazioni morfologiche quantitative dalle foto, sono state utilizzate procedure fotogrammetriche standard per proiettare le viste prospettiche delle foto su una superficie piana, generalmente coincidente con il livello marino locale (Holland et al., 1997). Le soluzioni geometriche della procedura di ribaltamento (proiezione) sono state vincolate con diversi punti di controllo a terra (*Ground Control Points*, GCPs), ovvero porzioni chiaramente visibili dalla foto di cui si conoscono le coordinate sia nel piano immagine che nel sistema di riferimento locale. Le geometrie sono state calcolate per ogni immagine selezionata, dopo una correzione della distorsione ottica utilizzando il metodo proposto da Zhang (2000). Successivamente, queste immagini corrette da distorsione sono state trasformate (proiettate) in viste piane con un ricampionamento dei *pixel* a produrre una griglia di 2.5 m x 2.5 m (Holland et al., 1997). Le dimensioni delle immagini rettificate sono state scelte in funzione dell'andamento della risoluzione nominale del *pixel footprint*, e come conseguenza i limiti *cross-shore* e *alongshore* sono stati fissati ad una distanza di 500 m e 1000 m dalla stazione, dove le risoluzioni spaziali dei *pixel* ricampionati sono rispettivamente di 1.2 m e 14 m. In questa nota vengono presentati i risultati della sola camera guardante a Levante (Fig. 3). Negli ultimi anni, sono stati implementati diversi metodi di estrazione semi-automatica delle morfologie da foto. Seguendo il metodo proposto da Van Enckevort e Ruessink (2001), il posizionamento della cresta di barra è stato computato tramite il campionamento (sulla foto) dei picchi di intensità luminosa lungo costa. Il posizionamento del frangimento a riva, utilizzato come indicatore del posizionamento della linea di riva, è stato estratto in maniera analoga.

La posizione della cresta di barra estratta da video, però, devia di un certo valore (Δx) dalla posizione reale in funzione della batimetria, della marea e dell'altezza d'onda (Van Enckevort e Ruessink, 2001). In questo lavoro, Δx è stato calcolato per la sola influenza dell'altezza d'onda, trascurando il contributo minimo legato alla batimetria e alla variazione di marea. A tale fine di calcolo, sono state utilizzate due differenti campagne batimetriche eseguite nel 2009 e nel 2010. Le massime deviazioni calcolate sono state quindi utilizzate per vincolare le risoluzioni di posizionamento planimetrico delle video-morfologie estraibili da foto, 20 m per la barra interna e 50 m per quella esterna.

Durante il periodo di analisi, 1025 giorni, sono state campionate le video-morfologie 112 volte per la linea

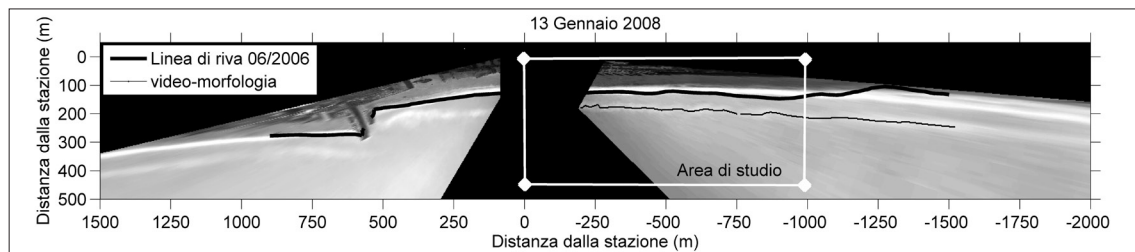


Figura 3 - Immagini timex rettificate della spiaggia di Terracina. Sistema di riferimento locale metrico.

di riva, 46 e 102 volte per le barre, implicando una diversa frequenza di osservazione per le differenti video-morfologie. In media la frangenza sulla linea di riva e sulla barra interna (bar2) è stata osservata (e misurata) con una frequenza bi-settimanale (Tab. 1). Similmente al processamento dei dati topo-batimetrici, da ogni foto rettificata è stata estratta la posizione *cross-shore* mediata lungo costa e la deviazione standard di ogni video-morfologia identificata.

Tabella 1 - Statistiche degli intervalli temporali (giorni) intercorsi tra due osservazioni consecutive delle video-morfologie campionate.

Giorni tra due osservazioni consecutive	Linea di riva	Bar1	Bar2
Valore massimo	127	149	127
Valore medio	9.2	17.5	6.5
Deviazione standard	17.6	27.2	14.6

Risultati

I risultati presentati di seguito si riferiscono all'evoluzione morfologica della spiaggia video-monitorata nei primi 4 anni successivi al ripascimento. L'evoluzione immediatamente successiva all'opera di ripascimento non è stata tuttavia analizzata, visto che l'attività di video-monitoraggio è iniziata circa un anno e mezzo dopo l'intervento (da Gennaio 2008) e la campagna di rilievi topo-batimetrici quasi 3 anni dopo l'intervento (da Marzo 2009).

A partire da Gennaio 2008, circa un anno e mezzo dopo l'esecuzione del rinascimento la morfologia della spiaggia sommersa si caratterizza per la presenza di un sistema a barra singola (nominata bar1) localizzata a 50 m dalla riva (Fig. 4). Anche se gli spostamenti *on/offshore* di bar1 ricadono spesso nei *range* di incertezza di posizionamento, qualitativamente si può riconoscere una migrazione diretta verso mare durante gli eventi di mareggiata ed un suo successivo spostamento verso la posizione occupata precedentemente alla mareggiata. Nella sua posizione più generale, tale barra non si posiziona mai ad una distanza minore di 50 m dalla riva (Fig. 5).

Alla fine di Novembre 2008 una serie di mareggiate provenienti dai settori meridionali, con massime altez-

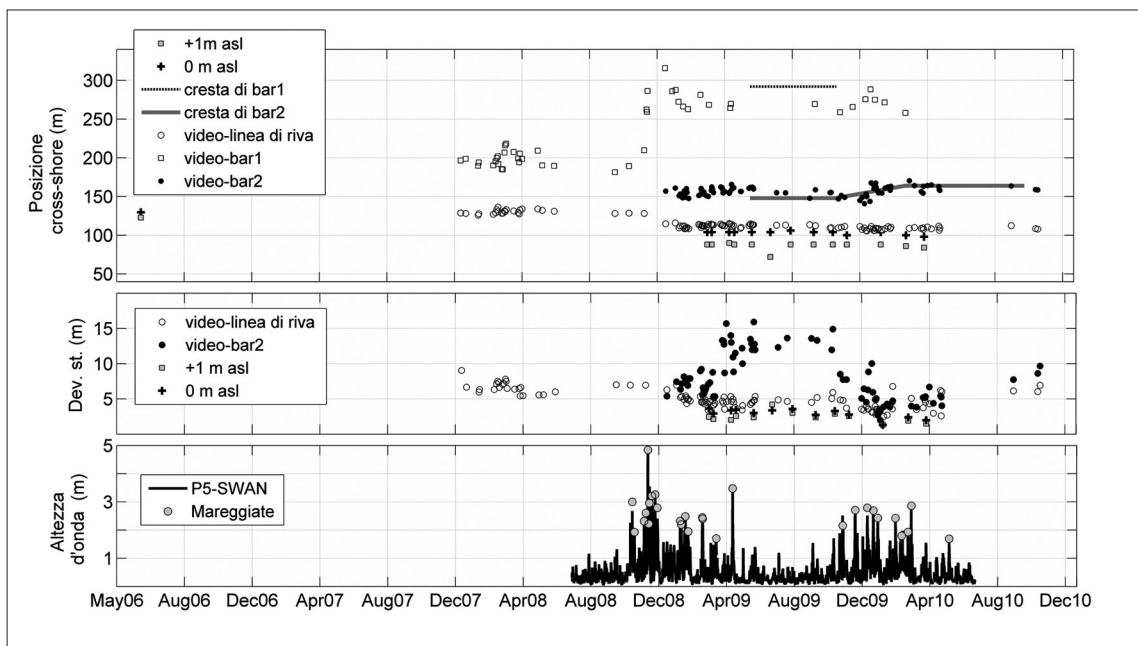


Figura 4 - Serie temporale delle morfologie (video e misurate) mediate lungo il tratto di studio (panello superiore) e loro deviazione standard (pannello intermedio). I dati onda metrici da modello SWAN-MEDITARE insieme alle mareggiate classificate sono riportati nel pannello inferiore.

ze d'onda maggiori di 4 m e periodi di picco di circa 11 secondi, rimodellano drasticamente la morfologia della spiaggia sommersa. In pochi giorni bar1 si sposta 50 m verso mare, si origina una nuova barra interna (bar2) e la linea di riva arretra di circa 20 m (Fig. 4).

Durante la primavera/estate 2009 la dinamica morfologica della barra interna (bar2) si attua prevalentemente con variazioni della sua forma planimetrica, gli spostamenti *on/offshore* della stessa sono minimi e permangono sempre nei *range* di incertezza (20 m circa). La nuova barra interna si posiziona sempre ad una distanza da riva minore rispetto alla precedente condizione a singola barra (bar1 in Fig. 5). Sia i dati video che quelli batimetrici evidenziano una morfologia lineare e parallela a costa e la presenza di culminazioni della cresta di barra esterna nella porzione antistante il tratto ripasciuto. I preliminari calcoli volumetrici eseguiti indicano che, a tre anni dal ripascimento, la volumetria della barra esterna nel settore del ripascimento è paragonabile alla quantità di materiali asportati dal fronte della spiaggia emersa (bilancio nullo). All'occorrenza delle mareggiate invernali del 2010 un'ulteriore modifica interessa i fondali in esame. La cresta di barra esterna perde la sua evidenza morfologica (si vedano i profili di Fig. 2) e ciò induce una diminuzione del numero di foto in cui essa è chiaramente identificabile dalla frangenza delle onde. Contestualmente, la barra interna (bar2) assume una morfologia lineare (diminuisce la deviazione standard) e si sposta 20 m verso mare (Fig. 4). Il sistema costiero è ora costituito da una barra interna lineare ben sviluppata e da una barra esterna meno evidente con morfologia tipo *bar terraced* (si veda il profilo in Fig. 2). Durante lo stesso periodo la linea di riva è soggetta ad un progressivo arretramento di circa 5 m lungo tutto il fronte di spiaggia (Fig. 4).

Da Giugno 2008 a Giugno 2010 (estensione della serie temporale dei dati SWAN-MEDITARE) la mareggiata più lunga proviene da sud-est (Scirocco) con altezze d'onda sopra soglia per 86 ore e altezze maggiori di 3 m. Anche le onde maggiori provengono da Scirocco con altezze superiori a 4 m e periodi di picco oltre i 10 secondi. Gli eventi ondosi provenienti da sud-ovest (Libeccio), contrariamente, non hanno mai raggiunto valori di altezza d'onda maggiori di 3 m (Fig. 5).

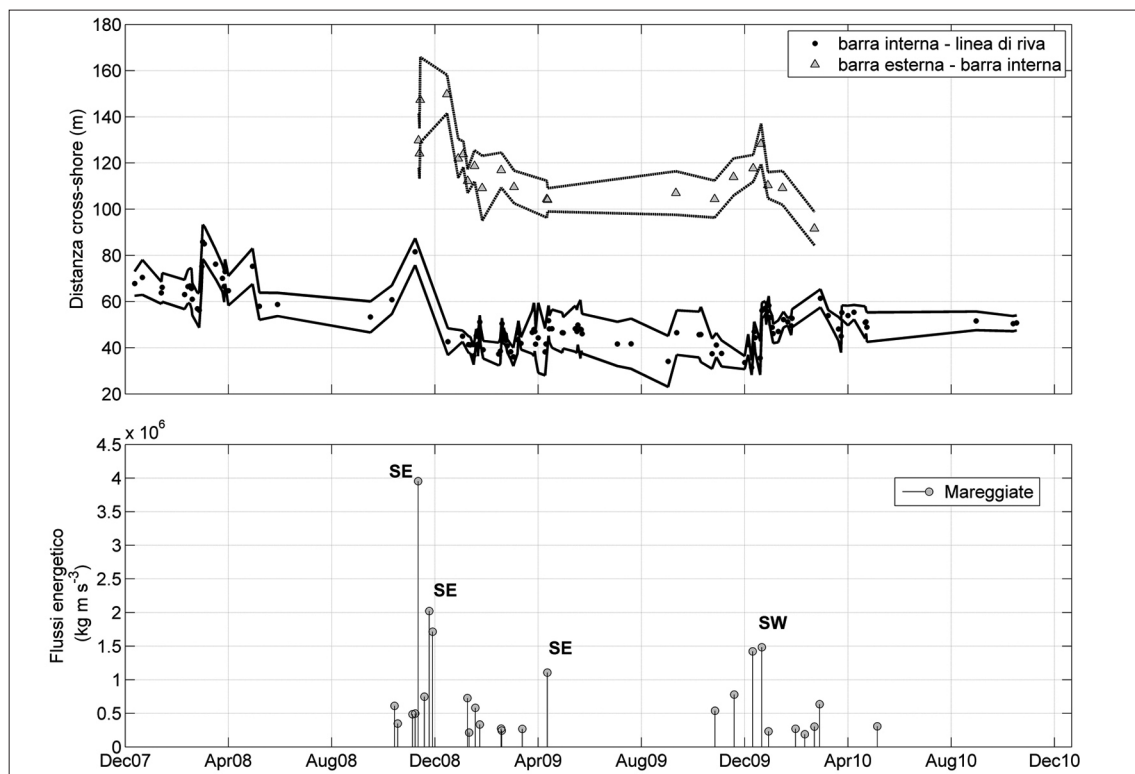


Figura 5 - Serie temporale delle distanze tra le video-morfologie mediate lungo costa più l'involuppo di ± 1 deviazione standard (pannello superiore) e flusso energetico calcolato per ogni evento di mareggiata (pannello inferiore).

Discussioni e conclusioni

L'evoluzione morfologica di una porzione (1 km) del litorale di Terracina è stata analizzata tramite dati di video-monitoraggio e topo-batimetrici. Il tratto analizzato è stato ripasciuto nel 2006 con un volume unitario di circa 216 mc/m di sabbie-ghiaiose (ghiaia 28%). Le attività di monitoraggio sono iniziate circa un anno e mezzo dopo l'intervento di ripascimento, permettendo un'analisi del tratto ripasciuto che già era stato rimodellato dalle mareggiate del 2006 e 2007. Da un confronto tra il posizionamento della linea di riva di Giugno 2006 (intesa come 0 m slm) e quello della prima linea di riva estratta da video (Fig. 4), tuttavia, sembra che durante questo intervallo temporale la volumetria della porzione emersa del cuneo di ripascimento sia diminuita in maniera molto modesta. Dalla Figura 2 è bene evidente l'assenza di morfologie sommerse nel tratto di ripascimento immediatamente dopo il reflui mento dei materiali. Se si considera il minimo spostamento della linea di riva tra Giugno 2006 e Gennaio 2008, l'emersione della nuova barra (visibile a partire da Gennaio 2008) sarebbe maggiormente ascrivibile ad un rimodellamento dei fondali ad opera delle mareggiate più che ad una redistribuzione degli inerti ripasciuti verso mare. Fatte tali assunzioni, le maggiori movimentazioni dei sedimenti ripasciuti si sono registrate durante le mareggiate di fine Novembre 2008, inducendo evidenti variazioni morfologiche. I meccanismi di tali variazioni sono stati prodotti da notevoli gradienti di trasporto sedimentario diretti verso mare ad opera delle elevate altezze d'onda (Gallagher et al., 1998, Marino Tapia et al., 2007). Ciò ha prodotto l'erosione dei materiali dalla spiaggia emersa, la formazione di una nuova barra sotto riva e la migrazione verso mare della barra pre-esistente (Figg. 4 e 5). Risposte similari ad eventi molto energetici sono state osservate anche lungo altre spiagge non-protette nel Mediterraneo (Certain e Barusseau, 2005) e in altri contesti oceanografici (Ruessink et al., 2009).

La serie temporale di osservazioni video-morfologiche fornisce la possibilità di analizzare e confrontare le differenti risposte della spiaggia analizzata alle mareggiate incidenti, soprattutto in funzione delle morfologie a barra singola e a barra doppia. Anche se non sono disponibili i valori di altezza d'onda che hanno caratterizzato la condizione a barra singola da Gennaio a Novembre 2008, in generale si riconosce una ben definita tendenza allo spostamento verso mare della barra durante le mareggiate (visibili dalle foto) ed un successivo lento recupero della posizione che la barra occupava in precedenza, come osservato già da Gallagher et al. (1998) e Armaroli et al. (2006) e generato dall'aumento della velocità dei flussi di ritorno al fondo (*undertow*) durante le mareggiate. Differentemente, durante lo stadio a barra doppia barra interna ed esterna reagiscono differentemente alle mareggiate. La dinamica della barra interna si esplica tramite lo sviluppo di morfologie festonate più o meno regolari (elevati valori della deviazione standard), come già osservato da Ruessink et al. (2000). La barra esterna, invece, rimane inattiva la maggior parte del tempo, mantenendo una morfologia lineare e parallela a riva durante tutte le condizioni energetiche. I maggiori movimenti di tale barra vengono registrati solo nel periodo immediatamente successivo alle violente mareggiate di Novembre 2008, in seguito essa si sposta verso riva e permane ad una distanza costante da questa, fino a perdere la sua evidenza morfologica (Figg. 4 e 5). Le morfologie festonate, o più generalmente non uniformi lungo costa, assunte dalla barra interna (bar2) sono degli importanti indicatori dei *pattern* di circolazione nel sotto costa. Esse sono state osservate esclusivamente durante lo stadio morfologico a barra doppia, innescandosi al diminuire della distanza tra le due barre (Figg. 4 e 5). Come già osservato da Ruessink et al. (2007) lo sviluppo di tali morfologie può dipendere, infatti, da interazioni tra barra interna ed esterna e/o da una auto-organizzazione della prima (*self-organization*). Similmente, l'evidente diminuzione della deviazione standard a fine 2009 indica un repentino passaggio a morfologie lineari della barra interna per il restante periodo di osservazione. Quest'ultimo fenomeno è relazionabile all'aumento della profondità della cresta di barra e alla diminuita capacità di dissipazione dell'energia ondosa ad opera della barra stessa, capace di indurre frangimento solo durante le mareggiate più intense (meno frequenti). All'aumentare del contenuto dell'energia ondosa incidente la barra interna compie un passaggio ad uno stadio morfodinamico più dissipativo (Wright e Short, 1984; Lippmann e Holman, 1990; Ranasinghe et al., 2004).

I meccanismi sedimentari che durante il 2010 hanno portato al passaggio dalla morfologia a barra doppia a quella a barra singola necessitano ulteriori analisi, poiché le osservazioni disponibili sono limitate alla sola stagione autunnale e, generalmente, sono le mareggiate invernali quelle che causano i maggiori effetti morfologici. Tuttavia, un'interpretazione preliminare dei dati di video-monitoraggio e topo-batimetrici pone alcune interessanti questioni sulla dinamica delle barre. Se la dinamica evolutiva fosse stata interessata esclusivamente da un trasporto *cross-shore* del sedimento, la transizione da un sistema a barra doppia ad uno

a barra singola sarebbe ascrivibile alla diminuzione del frangimento sulla barra esterna e al conseguente aumento del trasporto sedimentario diretto verso riva a causa delle correnti al fondo generate dalla crescente asimmetria d'onda (Hoefel e Elgar, 2003). Tali dinamiche trasversali vanno tuttavia inquadrare all'interno dell'intera unità fisiografica sud-pontina. L'ingente quantitativo di materiale sversato a circa 7 km a nord-ovest del sito di studio durante l'estate 2007, 649000 m³ e 412500 m³ rispettivamente in sinistra e destra della foce del F. Sisto (si veda la Fig. 1), lascia ipotizzare che il bilancio nullo riscontrato tra il 2006 e il 2009 non sia interamente dovuto ad una redistribuzione trasversale del sedimento. Più ragionevolmente tale bilancio può essere dovuto ad una sovralimentazione dei fondali nel tratto analizzato per l'afflusso laterale di parte del materiale sversato nel 2007 nei settori di sopraflutto (si veda la posizione di F. Sisto in Fig. 1). La barra esterna, infatti, a circa 8 mesi dalle mareggiate che ne hanno determinato la migrazione *off-shore*, presenta un volume paragonabile al quantitativo di materiali asportati dal cuneo di ripascimento tra il 2006 e il 2009.

Il rilievo batimetrico di Agosto 2009 (eseguito lungo tutto il tratto litorale di Terracina) indica che la cresta della barra esterna sviluppa evidenti culminazioni nella zona del ripascimento 2006, evidenziando elevati tassi di crescita della barra. Contrariamente prima dell'intervento di ripascimento del 2006 (dati 2003/2004 della Regione Lazio) la cresta della barra esterna presentava un progressivo innalzamento nel senso della deriva litoranea, come risultante della decelerazione del flusso sedimentario indotta dall'ostacolo del porto di Terracina (3 km a sottoflutto dal tratto ripasciuto). La degenerazione del sistema barra/truogolo esterno durante il 2010, oltre che innescato da un disfacimento della cresta di barra esterna ad opera delle correnti al fondo generate dall'asimmetria d'onda (e quindi ad opera del trasporto sedimentario diretto verso riva), potrebbe risultare anche dal così detto *lee effect* (Van Duin et al., 2004; Grunnet e Ruessink, 2005) causato dalle inusuali dimensioni della barra esterna a seguito delle mareggiate di fine Novembre 2008. Tale morfologia avrebbe indotto un ulteriore rallentamento dei flussi lungo costa, già influenzati dall'azione idraulica della foce armata del F. Portatore, con deposizioni preferenziali nei pressi della barra stessa e parziale depauperamento delle sabbie che avrebbero raggiunto i fondali sottoflutto.

In conclusione, l'evoluzione delle barre presso il sito analizzato è il risultato di una complessa interazione tra dinamiche sedimentarie trasversali e disponibilità di materiali lungo costa. L'analisi della risposta alle singole mareggiate della spiaggia analizzata dipende sia dalla natura delle mareggiate stesse (direzione, altezza e periodo d'onda) che dalla morfologia dei fondali (forma e numero delle barre). Ulteriori analisi, attualmente in corso, potranno inquadrare meglio l'influenza della disponibilità sedimentaria lungo costa sull'evoluzione trasversale delle barre sommerse e quindi sulla loro minore o maggiore capacità di dissipazione del contenuto energetico che raggiunge la costa.

Ringraziamenti

Si ringrazia Paolo Lupino, Fabio Fabbri e Alessandro Bratti del CMGIZC della Regione Lazio (www.cmgizc.info) per la completa autonomia lasciataci nel consultare i dati di video-monitoraggio, Daniele Sigismondi e Matteo Paita della SVM (www.svm.it) per il supporto fornitoci durante la calibrazione del sistema video di Torre del Sole. Si ringrazia Paolo Ciavola per le utili indicazioni e chiarimenti circa le problematiche inerenti la dinamica delle barre nel contesto Mediterraneo. Le utili osservazioni dei revisori (Paolo Tortora e Marco Ferrari) hanno migliorato molto la struttura del lavoro.

Bibliografia

- Aminti P., Pelliccia F. e Pranzini E. (2002) - *Evoluzione del profilo di spiaggia a seguito di un ripascimento artificiale in ghiaia su di una spiaggia altamente protetta*. Studi Costieri, 5: 47-57.
- Archetti R. (2009) - *Study of the evolution of a beach protected by low crested structures using video monitoring*. Journal of Coastal Research, 25(4): 884-899.
- Archetti R. e Lamberti A. (2009) - *Storm-driven shore changes of a beach protected by a low crested structure*. Proceedings International Conference on Coastal Engineering, Hamburg. Jane McKee Smith (ed.), 2: 1977-1989. ISBN-13 978-981-4277-38-9.
- Archetti R. e Zanuttigh B. (2010) - *Integrated monitoring of the hydro-morphodynamics of a beach protected by low crested detached breakwaters*. Coastal Engineering, 57(10): 879-891.
- Archetti R. Torricelli E. Erdman R. e Lamberti A. (2008) - *First application of a new imaging system for the coastal monitoring*. Proceedings of the 5th Coastal Structures International Conference, Coastal Structures

- 2007, Venice, 2-4 July 2007: 1964-1975.
- Armaroli C. e Ciavola P. (2011) - *Dynamics of a nearshore bar system in the northern Adriatic: A video-based morphological classification*. *Geomorphology*, 126: 201-216.
- Armaroli C., Balouin Y., Ciavola P. e Gardelli M. (2006) - *Bar changes due to storm events using ARGUS: Lido di Dante, Italy*. *Proceedings of Coastal Dynamics 2005*, ASCE, New York, USA, ISBN: 0-7844-0855-6.
- Armaroli C., Ciavola, P. Caleffi, S. e Gardelli M. (2007) - *Morphodynamics of nearshore rhythmic forms: an energy-based classification*. *Proceedings of 2007 International Conference on Coastal Engineering*, ASCE: 4009-4021.
- Benassai E., Gentilomo M., Ragone A., Setaro F. e Tomassichio U. (1997) - *Littoral restoration by means of protected beach nourishment-recent Italian works*. *PIANC Bulletin*, 94: 43-55.
- Booij N., Ris R.C. e Holthuijsen L.H. (1999) - *A third-generation wave model for coastal regions. Part I - Model description and validation*. *Journal of Geophysical Research*, 104 (C4): 7649-7666.
- CADSEALAND Project, <http://www.cadses.net/en/projects>
- Cammelli C., Jackson N.L., Nordstrom K.F. e Pranzini E. (2006) - *Assessment of a gravel nourishment project fronting a seawall at Marina di Pisa (Italy)*. *Journal of Coastal Research*, SI 39: 770-775.
- Centro di Monitoraggio GIZC, <http://www.cmzgizc.info/>
- Certain R. e Barousseau J.P. (2005) - *Conceptual modelling of sand bars morphodynamics for a microtidal beach (Sete, France)*. *Bulletin de la Societe Geologique de France*, 176: 343-354.
- COSMO Newsletter (2004) - *Operational Applications*. ARPA-SIM (BOLOGNA). Deutscher WetterDienst (DWD), Offenbach, 6: 25-26.
- Dail H.J., Marrisfield M.A. e Bevis, M. (2000) - *Steep beach morphology changes due to energetic wave forcing*. *Marine Geology*, 162: 443-458.
- Elko N.A., Holman R.A. e Gelfenbaum G. (2005) - *Quantifying the rapid erosion of a nourishment project with video imagery*. *Journal of Coastal Research*, 21: 633-645.
- Evangelista S., Full W.E., La Monica G.B. e Nelson D. (2004) - *Aspects of littoral dynamics along the Circeo-Terraacina coastal area (Lazio-Italia Centrale)*. *Geologica Romana*, 37: 127-130.
- Evangelista S., La Monica G.B. e Landini B. (1992) - *Artificial beach nourishment using crushed limestone gravel: first data about short and long-term beach response at Terracina (Latium, Italy)*. *Bolettino di Oceanografia Teorica e Applicata*, 10: 273-278.
- Ferri S., Pelliccia F., Pranzini E., Rizzo M.G. e Vitale G. (2008) - *Prima risposta della spiaggia di Marina di Carrara ad un ripascimento artificiale non protetto*. *Studi costieri*, 15: 57-72.
- Gallagher E., Elgar L., S. e Guza R., T. (1998) - *Observations of sand bar evolution on a natural beach*. *Journal of Geophysical Research*, 103: 3203-3215.
- Grunnet N.M. e Ruessink B.G. (2005) - *Morphodynamic response of a nearshore bars to a shoreface nourishment*. *Coastal Engineering*, 52: 119-137.
- Hoefel F. e Elgar S. (2003) - *Wave-induced sediment transport and sandbar migration*. *Science*, 299: 1885-1887.
- Holland K.T., Holman R., Lippmann T., Stanley J. e Plant N. (1997) - *Practical use of video imagery in nearshore oceanographic field studies*. *Journal of Oceanic Engineering*, 22: 81-92.
- ISMAR (2009) - *Climatologia delle coste del Lazio per la determinazione delle correlazioni tra clima meteo marino e presenza di posidonia oceanica mediante simulazioni da modello, ricerca dei budget sedimentari e stime a grande scala delle dinamiche del trasporto solido litoraneo*. Scaricabile da <http://www.cmzgizc.info>.
- ISPRA (2009) - *Annuario dei dati ambientali*. Scaricabile da <http://www.isprambiente.gov.it/site/it-IT/>.
- Kroon A., Aarninkhof S.G.J., Archetti R., Armaroli C., Gonzalez M., Medri S, Osorio A., Aagaard T., Davidson M.A., Holman R.A. e Spanhoff R. (2007) - *Application of remote sensing video systems for coastline management problems*. *Coastal Engineering*, 54(6-7): 493-505.
- Lippmann T.C. e Holman R.A. (1990) - *The spatial and temporal variability of sand bar morphology*. *Journal of Geophysical Research*, 95: 11575-11590.
- Marino-Tapia I., Russel J., O'Hare P. E, Davidson T. J., e Huntley D. A. (2007) - *Cross-shore sediment transport on natural beaches and its relation to sandbar migration patterns: 1. Field observations and derivation of a transport parametrization*. *Journal of Geophysical Research*, 112.
- Ojeda E. e Guillén J. (2006) - *Monitoring beach nourishment based on detailed observations with video measu-*

- rements. *Journal of Coastal Research*, SI 48: 100-106.
- Ojeda E. e Guillén J. (2008) - *Shoreline dynamics and beach rotation of artificial embayed beaches*. *Marine Geology*, 253: 51-62.
- Pranzini E. (2008) - *L'intervento di stabilizzazione del litorale de Le Lame (Parco San Rossore Migliarino Massaciuccoli, Toscana)*. *Studi Costieri*, 14: 29-42.
- Ranasinghe R., Symonds G., Black K. e Holman R. (2004) - *Morphodynamics of intermediate beaches: a video imaging and numerical modelling study*. *Coastal Engineering*, 51: 629-655.
- Rihouey D., Dugor J., Dailloux D. e Morichon D. (2009) - *Application of remote sensing video system to coastal defence monitoring*. *Journal of Coastal Research*, SI 56: 1582-1586.
- Ruessink B.G., Coco G., Ranasinghe R. e Turner I. L. (2007) - *Coupled and noncoupled behavior of three-dimensional morphological patterns in a double sandbar system*. *Journal of Geophysical Research*, 112, C07002.
- Ruessink B.G., Pape L. e Turner I.L. (2009) - *Daily to interannual cross-shore sandbar migration: Observations from a multiple sandbar system*. *Continental Shelf Research*, 29: 1663-1677.
- Ruessink B.G., van Enckevort I.M.J., Kingston K.S. e Davidson M. A. (2000) - *Analysis of observed two- and three-dimensional nearshore bar behaviour*. *Marine Geology*, 169: 161-183.
- Valentini A., Delli Passeri L., Paccagnella T., Patruno P., Marsigli C., Deserti M., Chiggiato J. e Tibaldi S. (2007) - *The Sea State forecast system of ARPA-SIM*. *Bollettino di Geofisica Teorica e Applicata*, 48 (3): 333-349.
- Van Duin M.J.P., Wiersma N.R., Walstra D.J.R., van Rijn L.C. e Stive M.J.F. (2004) - *Nourishing the shore-face: observations and hindcasting of the Egmond case, The Netherlands*. *Coastal Engineering*, 51: 813-837.
- Van Enckevort I.M.J. e Ruessink B.G. (2001) - *Effects of hydrodynamics and bathymetry on video estimates of nearshore sandbar position*. *Journal of Geophysical Research*, 106: 16969-16979.
- Wright L.D. e Short A.D. (1984) - *Morphodynamic variability of surf zones and beaches: A synthesis*. *Marine Geology*, 56: 93-118.
- Zhang Z., (2000) - *A flexible new technique for camera calibration*. *IEEE Trans. On PAMI*, 22(11): 1330-1334.

Ricevuto il 01/02/2011, accettato il 20/05/2011.

Analisi sperimentale di una spiaggia in presenza di un sistema di drenaggio

Alessandra Saponieri ¹ e Sara Corvaro ²

¹ Dipartimento di Difesa del Suolo "V. Marone", Università della Calabria,
Via P. Bucci Edificio 41B, Arcavacata di Rende (CS)

² Dipartimento ISAC Università Politecnica delle Marche, via Brecce Bianche 12, Ancona.

Riassunto

Il sistema di drenaggio delle spiagge (Beach Drainage System, BDS) è un'opera a basso impatto ambientale di ausilio alle tradizionali tecniche di difesa costiera. Esso favorisce l'assorbimento dei flussi di infiltrazione attraverso l'abbassamento artificiale del livello di saturazione all'interno spiaggia. Il dreno, installato al di sotto della linea di saturazione, interagisce con l'idrodinamica della zona di swash e modifica i processi morfodinamici promuovendo la stabilizzazione dei sedimenti che, in condizioni naturali, verrebbero trasportati verso largo nella fase di back-wash dell'onda. Un programma di prove sperimentali in larga scala è stato condotto presso il laboratorio Grosser WellenKanal (GWK) di Hannover, Germania, su un modello bidimensionale del sistema di drenaggio. L'obiettivo di tale ricerca è stato quello di comprendere l'influenza del drenaggio sui processi idrodinamici e morfodinamici nella zona di riva.

Nel presente lavoro l'attenzione è focalizzata sugli aspetti idrodinamici. In particolare sono analizzate le variazioni della linea di saturazione in condizioni naturali (non drenate) e drenate, gli effetti del drenaggio sul set-up e sui flussi di ritorno.

Parole chiave: drenaggio spiagge, BDS, idrodinamica della zona di riva, filtrazione, set-up, flussi di ritorno.

Abstract

The Beach Drainage System (BDS) is an innovative soft-engineering solution of coastal defense that by means of a lowering of the beach groundwater level and a rise of the unsaturated emerged beach zone, provides to increase the filtration capability of the beach (permeability). The swash hydrodynamics is modified by such a system, by encouraging a stabilization of the suspended sediments, that in natural condition are transported offshore during the back-wash phase. An extensive full scale laboratory investigation on a 2D physical model of a Beach Drainage System was performed at the Grosser WellenKanal of Hannover, Germany. The experiments aimed to improve knowledge of the nearshore hydrodynamic and morphodynamic behavior of a beach equipped with a drainage system. In the present work focus is on the hydrodynamic aspects. In particular the analyses address in water table oscillations, drained flows and nearshore undertow currents.

Keywords: Beach Drainage System (BDS), hydrodynamics of swash zone, in/ex-filtration, wave set-up, undertow currents, scale effects.

Premessa

La spiaggia è un sistema ambientale dotato di un equilibrio dinamico molto complesso. Una delle principali cause dei cicli stagionali di erosione ed accrescimento a cui la spiaggia emersa è soggetta è il trasporto dei sedimenti in direzione trasversale rispetto la linea di riva. In prossimità della linea di riva il trasporto solido

trasversale è strettamente connesso all'idrodinamica dei flussi di risalita e di ritorno del moto ondoso (Elfrink e Baldock, 2002; Larson et al., 2004). Quando la spiaggia è soggetta all'azione di onde caratterizzate da un basso contenuto energetico e lungo periodo, tipiche dei periodi estivi, una parte del flusso di risalita filtra all'interno del mezzo poroso migliorando la stabilità dei sedimenti. Il processo di infiltrazione dell'acqua nella zona di spiaggia parzialmente satura favorisce, difatti, il deposito dei sedimenti in sospensione. Inoltre, il processo di filtrazione verticale dall'alto verso il basso aumenta le tensioni efficaci all'interno dello scheletro solido, stabilizzando i sedimenti. Una situazione opposta si crea durante le mareggiate invernali, caratterizzate da una maggiore energia e periodo più breve. In tal caso il flusso di ritorno prevale su quello di risalita poiché la filtrazione dell'acqua è ostacolata dall'elevato grado di saturazione della spiaggia. Il risultato netto del processo di run-up/down si traduce in un trasporto verso il largo dei sedimenti, provocando, di conseguenza, l'erosione della spiaggia. L'interazione tra il moto ondoso ed il litorale è quindi fortemente influenzata dalle caratteristiche della spiaggia. Se il mezzo è parzialmente saturo il comportamento della spiaggia è riconducibile alla dinamica litoranea tipica dei periodi estivi con un visibile avanzamento della linea di riva. Al contrario, se il grado di saturazione è prossimo all'unità, la spiaggia assume un comportamento tipico dei periodi invernali, con significativo trasporto al largo dei sedimenti erosi dalla zona prossima alla linea di riva. Recentemente, la ricerca scientifica ha indirizzato l'attenzione allo studio dei sistemi di drenaggio delle spiagge (Beach Drainage System, BDS). Essi permettono di incrementare artificialmente la capacità di infiltrazione della spiaggia, abbassando la linea di saturazione ed aumentando lo spessore della fascia insatura, in modo tale da indurre un comportamento del litorale riconducibile alla dinamica litoranea tipica dei periodi estivi. L'efficacia del drenaggio nell'accrescimento della zona di riva fu scoperta casualmente in Danimarca (Vesterby, 1991). Tale tipo di sistema, nato inizialmente come opera innovativa nella difesa delle coste, attualmente può essere considerato di ausilio alla gestione di interventi morbidi, come, ad esempio, un ripascimento artificiale. L'installazione di uno o più dreni permette, infatti, di ridurre i processi erosivi responsabili dell'alterazione della nuova condizione di equilibrio della spiaggia, ottenuta mediante l'apporto artificiale dei sedimenti. Diverse installazioni del BDS sono state eseguite in tutto il mondo. In Italia alcuni esempi si ritrovano ad Ostia (Damiani et al., 2003), Allassio (Bowman et al., 2006; Bowman et al., 2007) e Procida (Vicinanza et al., 2010). Le interruzioni nel funzionamento degli impianti hanno reso difficoltoso il monitoraggio continuo ed a lungo termine del sistema, con conseguente difficoltà nell'interpretazione dei risultati. Il monitoraggio su campo risulta essere di estrema utilità per definire l'efficacia del sistema (Vesterby, 1994), ma gli esperimenti condotti in laboratorio sono necessari per comprendere il funzionamento del sistema in diverse condizioni di moto ondoso. I primi esperimenti di laboratorio su un modello fisico bidimensionale del BDS (in scala di Froude 1:10) sono stati condotti presso il Laboratorio di Ingegneria delle Coste (LIC) del Politecnico di Bari (Damiani et al., 2009). Tali prove hanno consentito di avere buone indicazioni qualitative sull'influenza del sistema sui processi idrodinamici e morfodinamici della zona di riva. Tuttavia gli effetti scala che, come è ben noto, alterano i risultati ottenuti dagli studi sui modelli a fondo mobile, causano qualche incertezza sull'analisi da un punto di vista quantitativo. Una recente indagine sperimentale in scala 1:1 è stata condotta presso il laboratorio Grosser WellenKanal (GWK) di Hannover, al fine di analizzare il sistema in condizioni reali.

Nel presente lavoro sono riportati i risultati derivanti dall'analisi idrodinamica della zona di swash del suddetto prototipo di spiaggia drenata. Dopo una breve descrizione dell'apparato sperimentale, delineato più approfonditamente in lavori precedenti (Damiani et al., 2010), l'attenzione è focalizzata sullo studio delle variazioni della linea di saturazione all'interno della spiaggia per effetto dell'attivazione del sistema di drenaggio ed all'influenza sul livello massimo di set-up. In linea con quanto esposto nella premessa, nel presente lavoro si riportano alcuni profili di velocità ricostruiti durante i test, con lo scopo di analizzare l'influenza del sistema sui flussi di ritorno.

Installazione di laboratorio

Il canale sperimentale di Hannover ha una lunghezza di circa 300 m, una larghezza di 5 m ed una profondità utile di 7m. Le prove sperimentali hanno previsto due fasi: la prima ad acqua ferma (condizioni statiche) e la seconda con diversi attacchi ondosi (condizioni dinamiche). La prima fase della sperimentazione è mirata allo studio dell'efficacia del dreno, al fine di individuare la posizione plano-altimetrica ottimale del dreno, di stabilire i tempi per il raggiungimento della condizione di regime e ricavare l'andamento spaziale della

linea di saturazione nelle possibili configurazioni. La seconda fase ha previsto una serie di prove con e senza dreno, allo scopo di analizzare l'efficacia del drenaggio in differenti condizioni energetiche del moto ondoso. La sabbia adottata per realizzare il profilo di spiaggia è pressoché uniforme con un D_{50} pari a 0.33 mm. La permeabilità e la velocità di caduta, misurate in laboratorio, sono pari rispettivamente a $3.2 \cdot 10^{-2}$ cm/s e 4.8 cm/s. Il sistema di drenaggio è costituito da quattro condotte drenanti in PVC corrugato aventi lunghezza $L = 5$ m e diametro $D = 0.20$ m, dotate di fori sulla superficie laterale e ricoperte da un doppio rivestimento in nylon. Tale rivestimento del dreno evita l'intasamento dei fori da parte della sabbia trasportata durante la fase di captazione dell'acqua di falda della spiaggia. Il sistema è posizionato parallelamente alla linea di riva ad una profondità di circa 0.5m dal l.m.m. e a distanza variabile dalla linea di riva (dai 4 m ai 13 m) per verificare quale sia la posizione planimetrica tale da produrre la massima efficacia del dreno. Ciascun dreno presenta una lieve pendenza longitudinale ed è collegato ad un tubo cieco di diametro $D = 0.20$ m, utilizzato per l'allontanamento ed il convogliamento delle acque drenate in un pozzetto di raccolta prefabbricato. All'estremità di tali tubazioni sono installate quattro saracinesche che permettono di attivare ciascun dreno singolarmente o più dreni contemporaneamente. Il pozzetto di raccolta a gravità è dotato di una pompa a bassa prevalenza che permette di allontanare le acque drenate attraverso l'ausilio di una condotta posta esternamente al canale che restituisce l'intera portata al largo della zona dei frangenti. Durante i test sono state effettuate numerose misure orientate all'analisi dell'idrodinamica all'interno della spiaggia (piezometri e trasduttori) e lungo il canale (sonde resistive, correntometri, propeller e sensori ultrasonici), ed all'analisi della morfodinamica (profilatore di spiaggia e sensori ultrasonici) in condizioni drenate e non drenate. Nel seguito saranno illustrate le misure relative ad alcuni aspetti dell'idrodinamica della zona di swash. La Figura 1 riporta uno schema del sistema di drenaggio e la strumentazione sottocosta, ubicata nella zona di riva ed all'interno della spiaggia emersa, discussa nel presente lavoro.

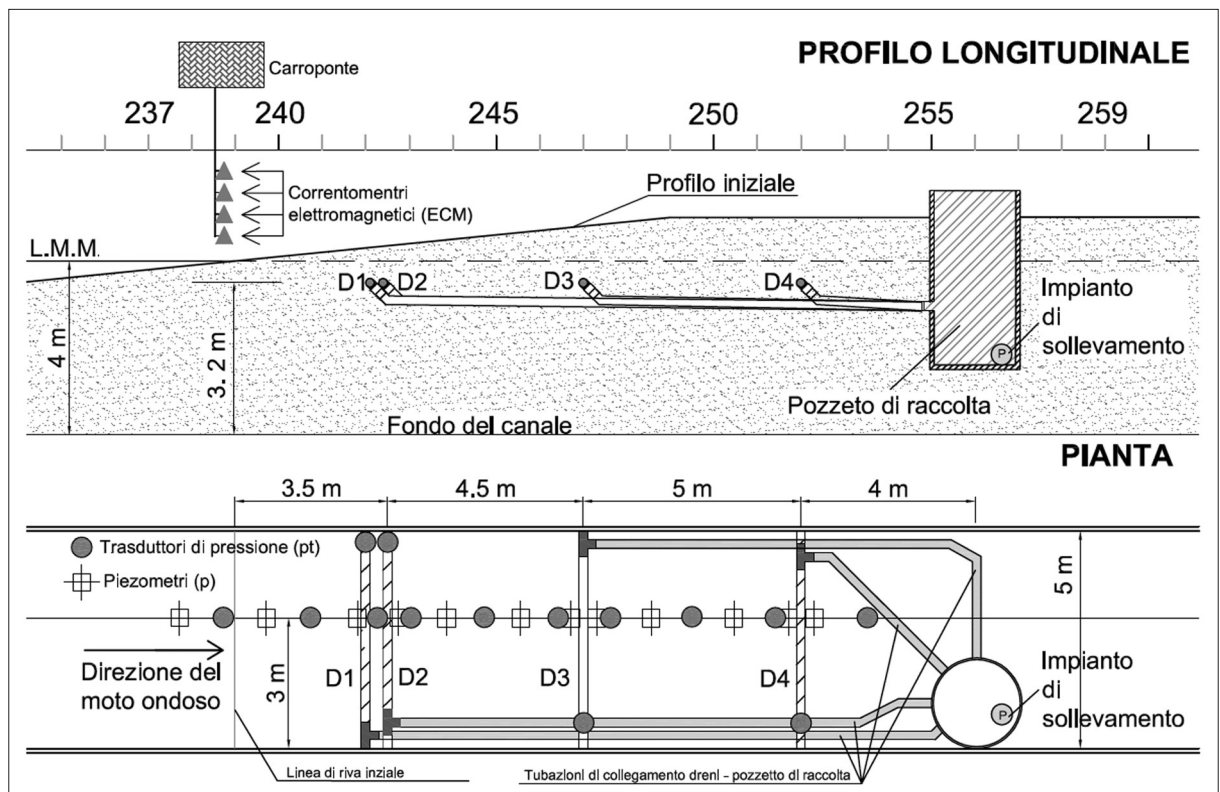


Figura 1 - Profilo longitudinale e pianta del sistema di drenaggio con il posizionamento dei piezometri e dei trasduttori.

L'andamento della linea di saturazione all'interno della spiaggia è stato misurato con una batteria di dodici piezometri (p) a lettura manuale collegati, attraverso tubi ad alta pressione in materiale plastico di diametro

pari a 0.01 m, a dodici celle piezometriche installate nella sabbia a circa 0.10 m al di sotto dei dreni. Le variazioni della linea di saturazione sono state misurate, inoltre, mediante dieci trasduttori di pressione (pt) collocati circa allo stesso livello delle celle piezometriche ma con differente distribuzione spaziale. Ulteriori quattro trasduttori sono stati posizionati sulla generatrice inferiore dei dreni per la determinazione del regime di pressione all'interno degli stessi. La determinazione delle portate drenate è stata effettuata misurando i tempi di svuotamento/riempimento del pozzetto. A tal fine è stato utilizzato un trasduttore di pressione, dello stesso tipo dei precedenti, posto all'interno del pozzetto di raccolta ad una quota dal fondo vasca pari a 0.08 m. La misura delle portate drenate è stata inoltre eseguita con l'ausilio di un flussimetro posto sulla condotta esterna di allontanamento delle acque. La ricostruzione dei profili di velocità durante i test è stata effettuata utilizzando quattro correntometri elettromagnetici (ECM) installati su di un'asta in acciaio fissata al carroponete del laboratorio. La distanza reciproca degli ECM è di 0.07 m.

Le prove sperimentali sono state condotte in regime statico (ad acqua ferma) con due diversi livelli di mare calmo pari a 4.00 m e 4.20 m ed in regime dinamico (con moto ondoso) con tirante idrico nel canale pari a 4.00 m. La Tabella 1 riporta il numero di prove effettuate a dreni accesi e spenti, il corrispondente valore di altezza d'onda significativa H_s e periodo di picco T_p per i tre test dinamici. Le tre tipologie di prove dinamiche sono state caratterizzate da attacchi ondosi irregolari per la cui descrizione è stato adottato lo spettro di tipo JONSWAP.

Tabella 1 - Caratteristiche generali delle prove dinamiche HE, ME e LE.

Test	N° prove dreni accesi	N° prove dreni spenti	H_s (m)	T_p (s)
HE	11	8	0.80	6.40
ME	12	8	0.59	7.88
LE	11	11	0.39	7.88

Analisi dei risultati e discussione

L'andamento della linea di saturazione (Water Table, W.T.) è stato ricostruito utilizzando sia i dati registrati dai piezometri (p), sia le misure ottenute dai trasduttori di pressione (pt). A titolo di esempio, nella Figura 2 sono rappresentati gli andamenti spaziali della W.T. per il test statico S2 in condizioni drenate (dreno D2) dedotti da entrambi gli strumenti, mostrando un perfetto accordo.

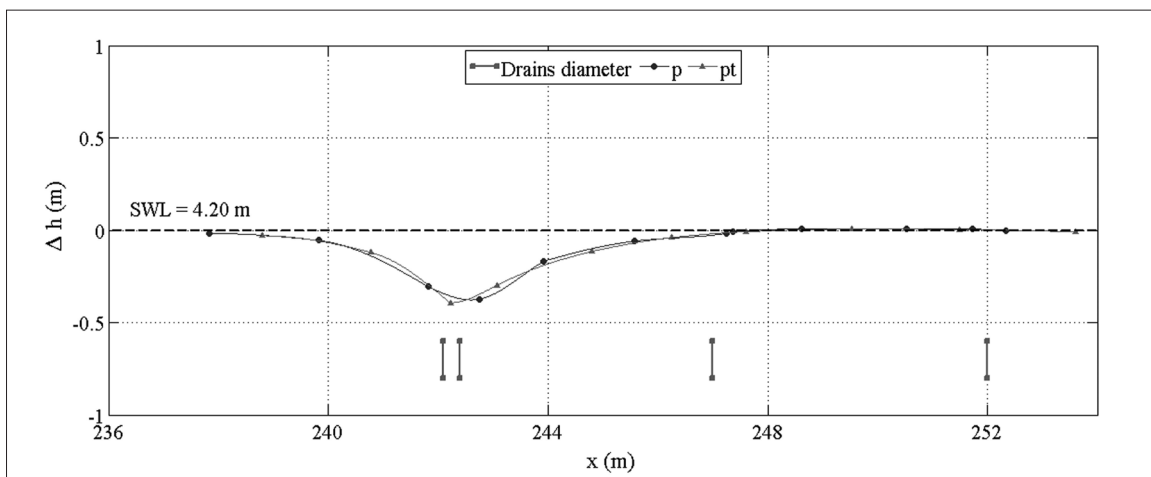


Figura 2 - Confronto delle misure acquisite dai piezometri (p) e dai trasduttori di pressione (pt) (test S2, dreno singolo D2 attivato).

Per tale motivo in seguito si riportano le analisi sui dati ottenuti dalle sole misure dei piezometri. Le progressive del sistema di riferimento adottato sull'asse delle ascisse (x) sono riferite alla posizione del generatore di moto ondoso.

L'efficacia del sistema di drenaggio sull'abbattimento del livello di saturazione è mostrato nella Figura 3, in cui si riportano gli andamenti della W.T. indotti dalla apertura dei singoli dreni D1, D2, D3 e D4 per il livello di mare calmo (SWL) pari a 4.00 m. Dalla Figura 4 si può osservare come il massimo abbassamento (Δh) rispetto allo SWL si verifica in corrispondenza dei dreni attivi, per poi raccordarsi con la WT indisturbata. In prossimità della linea di riva si può osservare un abbassamento del livello di mare calmo. Tale fenomeno può essere spiegato considerando il lasso di tempo che intercorreva tra il drenaggio dell'acqua e la riemissione in canale. L'effetto del dreno si riduce all'aumentare della distanza del dreno dalla zona di riva per annullarsi completamente quando il dreno D4 è in funzione. Il confronto delle configurazioni di dreni singoli attivati mostra come la massima efficacia nell'abbattimento della linea di saturazione con conseguente aumento della zona insatura all'interno della spiaggia si verifichi per il dreno D3.

In Figura 4 è riportato il confronto fra i livelli della linea di saturazione in seguito all'attivazione del dreno

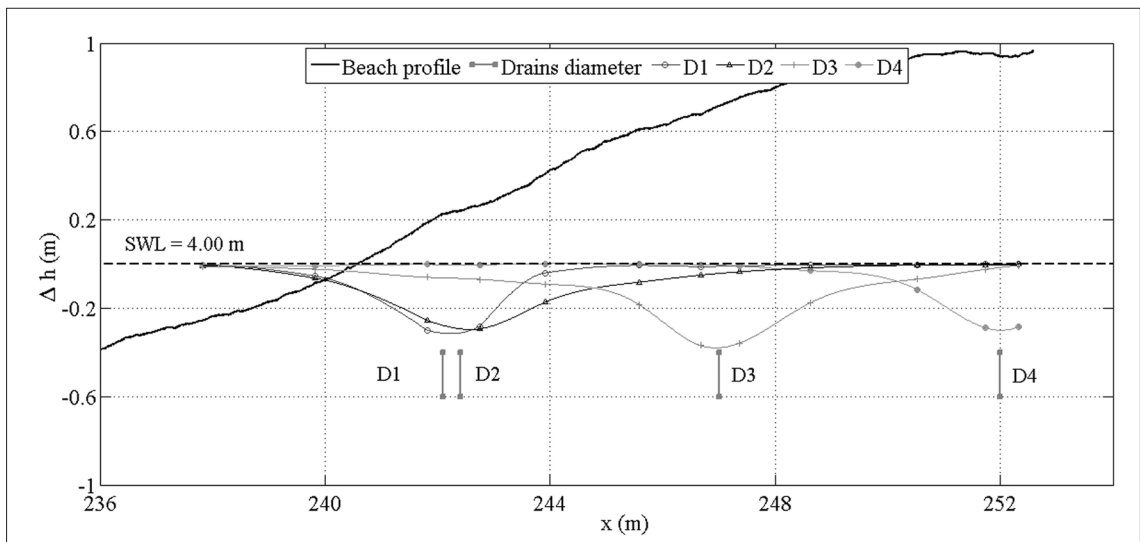


Figura 3 - Andamento spaziale della linea di saturazione (test S1, dreni singoli D1, D2, D3, e D4 attivati).

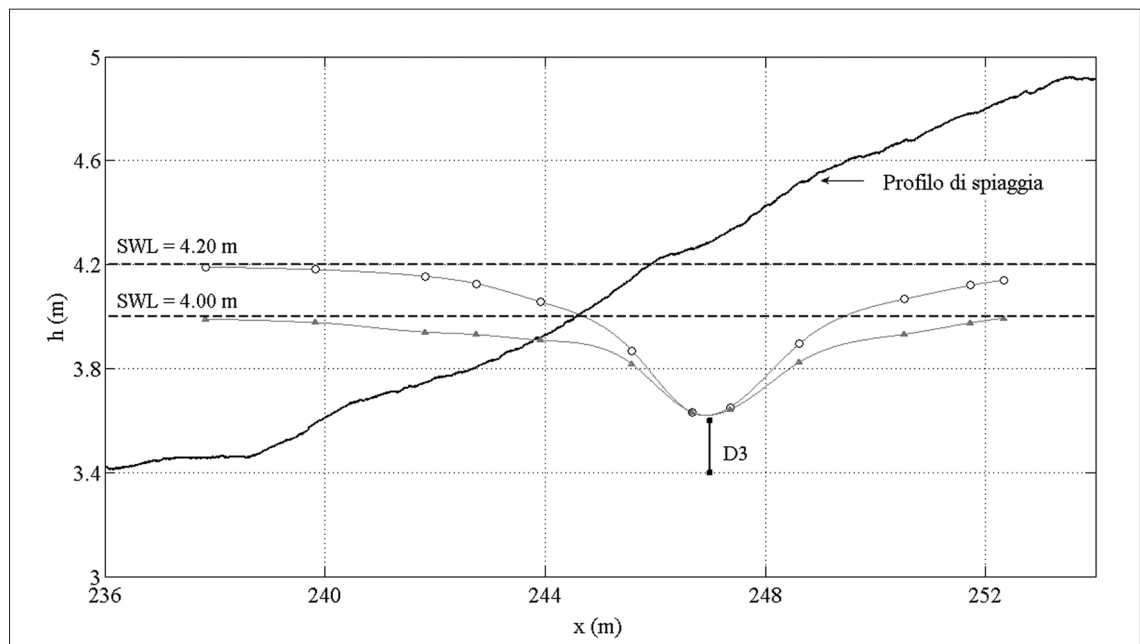


Figura 4 - Confronto degli abbassamenti della linea di saturazione tra i livelli statici S1 e S2 (dreno singolo D3 attivato).

D3 rispettivamente per i livelli statici S1 (SWL = 4.00 m) ed S2 (SWL = 4.20 m). L'asse delle ordinate h indica i livelli idrici ed ha come piano di riferimento il fondo del canale. Si può osservare come l'innalzamento del livello di mare calmo (SWL = 4.20 m) non comporta una riduzione dello strato di spiaggia insatura al di sopra del dreno; la quota minima del livello di saturazione in seguito all'attivazione del dreno, difatti, rimane costante. Ciò dimostra che l'aumento di carico permette di superare le resistenze che l'acqua incontra nel passaggio attraverso il mezzo poroso e che l'abbattimento del carico all'interno della spiaggia è regolato dalla quota del dreno rispetto al livello di mare calmo; infatti, essendo il dislivello maggiore nel test S2, ne consegue un abbattimento di carico più rilevante.

Si può ipotizzare che l'aumento dell'abbattimento della linea di saturazione si sarebbe potuto ottenere abbassando la quota altimetrica del dreno rispetto al livello di mare calmo, lasciando inalterato il carico idrico sul dreno. Ai fini progettuali, è importante evidenziare che l'efficacia del BDS nell'aumentare artificialmente la permeabilità della spiaggia dipende, oltre che dalle caratteristiche del mezzo poroso, dalle caratteristiche della condotta drenante (ad esempio il diametro della tubazione, la scabrezza ed il numero dei fori sulla superficie laterale del dreno).

L'importanza del comportamento idraulico del dreno è confermata dall'analisi dei trasduttori di pressione installati all'interno dei dreni stessi. In Figura 5 è riportato l'andamento del livello idrico dedotto, a titolo di esempio, dal trasduttore di pressione installato nel D2.

In generale, l'andamento temporale della pressione misurata dai trasduttori all'interno dei dreni presenta una

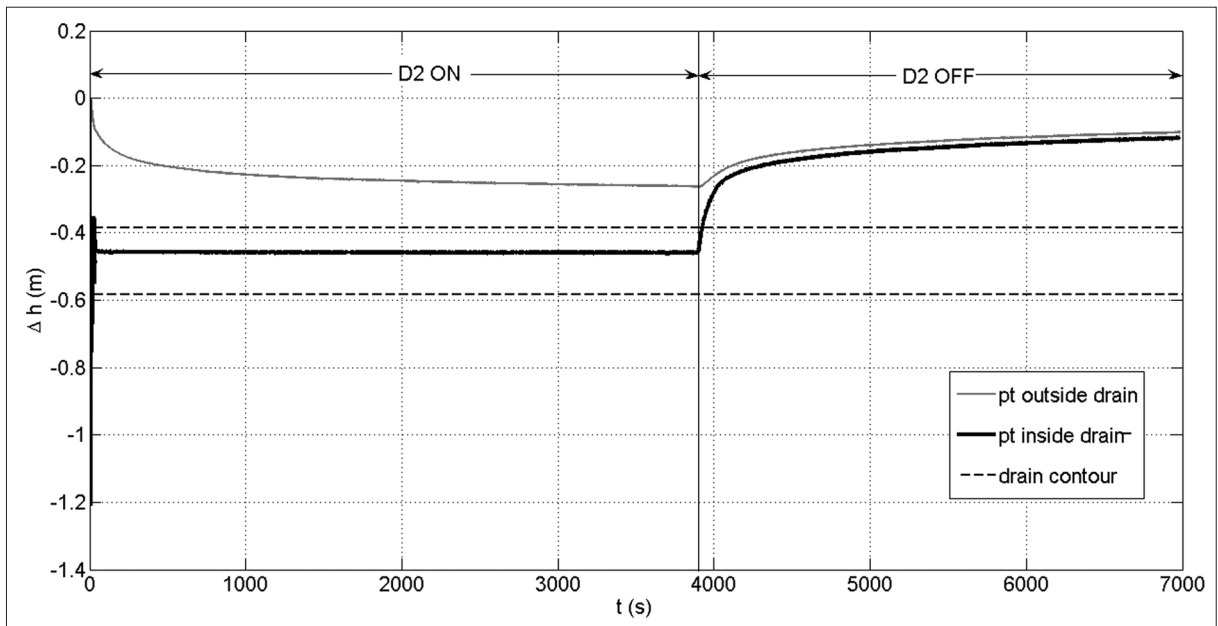


Figura 5 - Variazione temporale del livello di acqua all'interno del dreno D2.

brusca depressione iniziale, indotta dalla repentina apertura della saracinesca; difatti, poiché il dreno funziona sotto battente, si registra assenza d'aria in condotta durante la fase di avviamento. In regime stazionario, invece, l'aria risale dal pozzetto fino al dreno consentendo lo sviluppo di una corrente a gravità. A causa di tale processo, la posizione del pozzetto risulta essere importante: se installato ad un'eccessiva distanza dal sistema drenante, le tubazioni rischiano la rottura.

I livelli idrici misurati all'interno dei dreni durante le prove sono dell'ordine di qualche centimetro. Nonostante i dreni utilizzati nel presente studio abbiano un diametro confrontabile con quello delle condotte drenanti impiegate nelle installazioni di campo, la portata drenata risulta essere nettamente inferiore, ossia dell'ordine di $0.3 \div 1.0$ l/s. Tale risultato può essere legato al regime idraulico che si instaura all'interno dei dreni già discusso in precedenza.

In Figura 6 sono rappresentate le WT per la prova dinamica con moto ondoso di media energia in condizio-

ni drenate e non drenate. La linea continua rappresenta il livello medio della linea di saturazione misurato a dreni spenti (condizioni naturali); la curva tratteggiata rappresenta la variazione della linea di saturazione indotta dal dreno D1 (condizioni drenate).

Come atteso, il moto ondoso incidente sulla spiaggia produce un innalzamento della WT rispetto al livello di

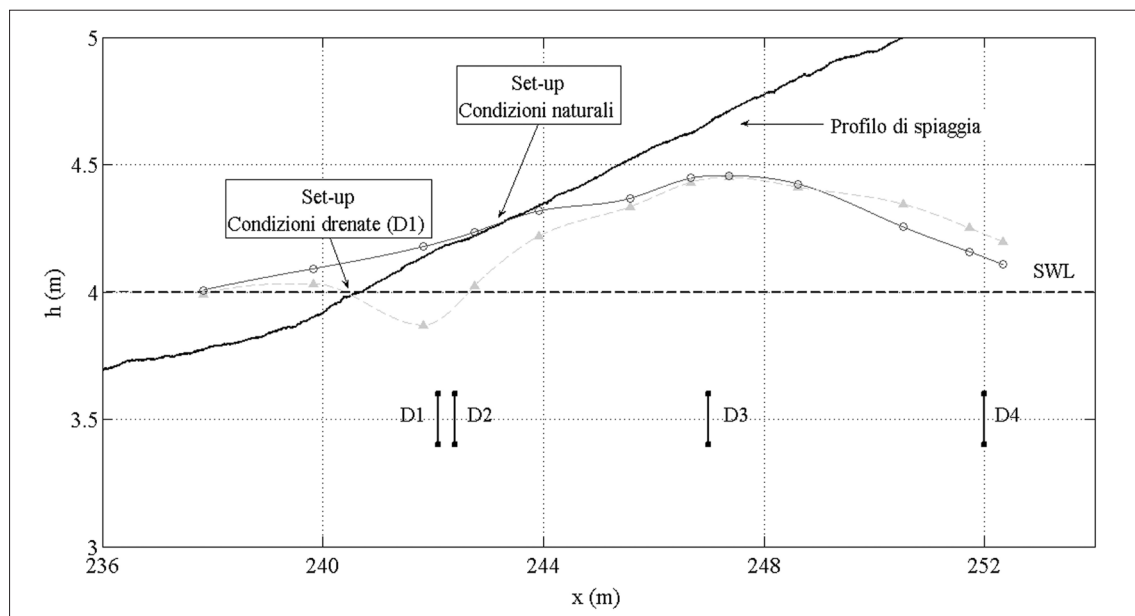


Figura 6 - Andamento spaziale della water table (W.T.) in condizioni naturali e drenate (test ME, dreno D1 attivo).

mare calmo. In particolare, le misure eseguite mediante i piezometri hanno reso possibile la determinazione sperimentale del massimo valore di set-up dell'onda mediante l'intersezione del livello medio di saturazione ed il profilo di spiaggia. L'accensione del dreno D1, così come per le altre configurazioni, comporta l'abbassamento della linea di saturazione nella zona prossima al dreno. Esso induce, quindi, un aumento della zona insatura della spiaggia, favorendo l'infiltrazione dell'acqua durante la fase di risalita dell'onda. Si può inoltre osservare un'evidente riduzione del massimo valore di set-up dell'onda sulla spiaggia. Tale abbattimento del carico idraulico ha come conseguenza la riduzione delle correnti di ritorno e, quindi, la riduzione del trasporto dei sedimenti in sospensione verso il largo. In particolare l'influenza del sistema di drenaggio sul livello di saturazione comporta una riduzione del carico idraulico sulla spiaggia sia in condizioni naturali che in condizioni drenate. Tale riduzione è più accentuata quanto maggiore è l'energia del moto ondoso.

L'influenza dell'accensione dei dreni sulle correnti di ritorno (U) è stata analizzata mediante i correntometri elettromagnetici (ECM) attraverso le cui misure sono stati ricostruiti, in diverse sezioni del canale, i profili di velocità in presenza o assenza di dreno. Le Figure 7 e 8 mostrano il confronto tra il profilo di velocità misurato in condizioni non drenate e durante l'attivazione di uno o più dreni nel caso di attacco ondoso a bassa e media energia. Sull'asse delle ordinate la quota dello strumento (y') è resa adimensionale rispetto alla quota del terreno (y''). Entrambe le distanze sono riferite al livello di mare calmo. L'adimensionalizzazione rispetto alla quota del profilo di spiaggia è stata necessaria per le notevoli variazioni che esso ha subito durante i test dinamici e per poter quindi confrontare i profili di velocità misurati durante i diversi test.

Le Figure 7 e 8 mostrano che l'attivazione di un dreno ha come effetto una riduzione, anche se limitata, delle componenti medie di velocità. Tuttavia quando più dreni sono in funzione simultaneamente non si è osservata una maggiore attenuazione dell'intensità della corrente di ritorno.

Nel caso di attacco ondoso LE, caratterizzato da un basso contenuto energetico, la riduzione dell'intensità della corrente di ritorno è stata osservata per tutti i test in cui era possibile confrontare il campo di velocità. Per i test a media energia ME, l'effetto benefico dei dreni è stato osservato solo in alcuni casi, mentre in altri la riduzione dell'intensità delle velocità medie non è stata apprezzabile. Infine nel caso di attacco ondoso ad

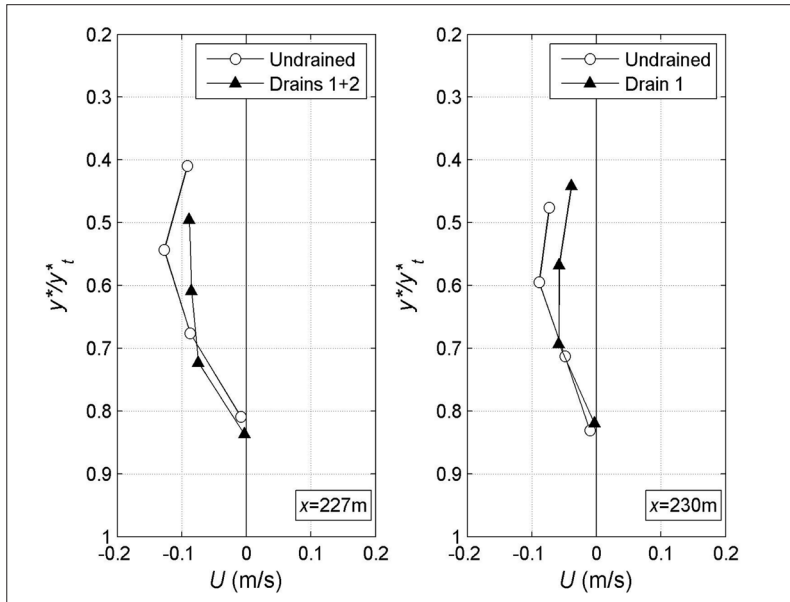


Figura 7 - Confronto dei profili di velocità in condizioni naturali e drenate. Attacco ondoso LE, sezioni di misura $x=227\text{m}$ (sinistra) e $x=230\text{m}$ (destra).

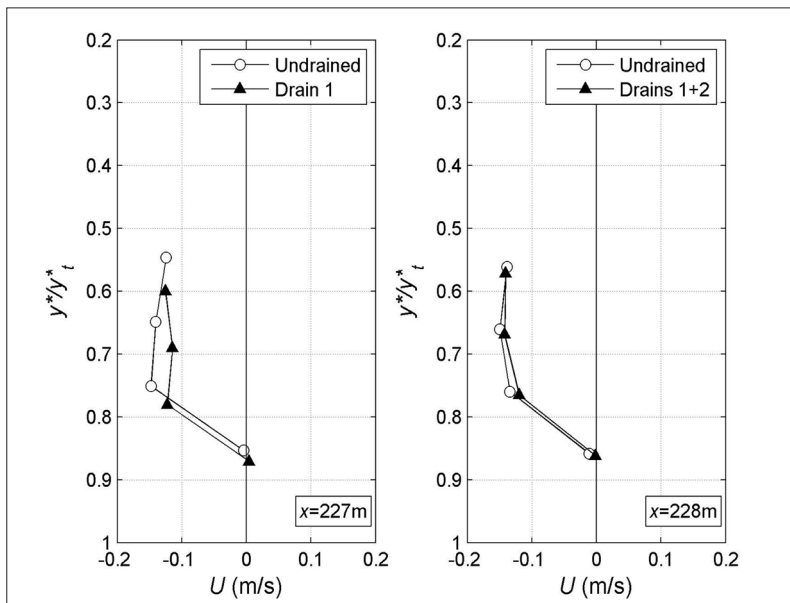


Figura 8 - Confronto dei profili di velocità in condizioni naturali e drenate. Attacco ondoso ME, sezioni di misura $x=227\text{m}$ (sinistra) e $x=228\text{m}$ (destra).

linea di saturazione, con conseguente aumento della zona insatura all'interno della spiaggia. Per le prove statiche, il carico maggiore sui dreni ha comportato una maggiore efficienza idraulica del sistema poiché ha permesso di superare più facilmente le resistenze che l'acqua incontra nel processo di filtrazione all'interno del mezzo poroso. Durante le prove dinamiche è stato osservato che il moto ondoso incidente sulla spiaggia produce un innalzamento della linea di saturazione rispetto al livello di mare calmo. L'attivazione dei dreni ha comportato un aumento della zona insatura della spiaggia, superiore a quello dedotto dai test statici, ed una riduzione del massimo valore di set-up. La riduzione di carico sulla spiaggia ha pertanto generato una riduzione delle correnti di ritorno durante la fase di back-wash. Tuttavia, si ritiene che la limitata riduzione

alta energia HE l'effetto dell'attivazione dei dreni sulla cinematica è risultato trascurabile.

L'influenza del sistema di drenaggio della spiaggia sulla cinematica varia in funzione della posizione della sezione di misura delle velocità dalla linea di riva e del contenuto energetico dell'attacco ondoso analizzato. In particolare si è osservato che l'effetto dell'attivazione dei dreni sulla cinematica si riduce all'aumentare della distanza dalla linea di riva esaurendosi ad una distanza di circa 7m per i test ad alta energia. Tale distanza aumenta con il diminuire dell'energia fino ad arrivare a circa 15m per i test a bassa energia.

In conclusione si ritiene che la lieve riduzione dell'intensità delle componenti medie di velocità osservata sia dovuta alla scarsa capacità drenante che l'intero sistema BDS ha mostrato durante le prove; infatti, come discusso in precedenza, anche l'entità delle portate drenate è minima

Conclusioni

Nel presente lavoro sono state riportate alcune delle analisi relative agli aspetti idrodinamici della zona di swash di una spiaggia in presenza di un sistema drenante (BDS). I dati utilizzati sono stati acquisiti nel corso di un'attività sperimentale condotta su di un modello bidimensionale in scala prototipo presso il canale GWK di Hannover. I risultati hanno mostrato che i dreni sono in grado di modificare l'idrodinamica della swash zone, attraverso l'abbassamento della

della corrente di ritorno sia da attribuire alla limitata efficacia del BDS nelle sezioni di controllo delle velocità, relativamente lontane dal sistema di drenaggio. Si fa ancora presente che le portate drenate dal sistema sono di scarsa entità e che il regime di moto instaurato all'interno dei dreni è a pelo libero. A tal proposito ci si ripropone di analizzare con maggior dettaglio la capacità drenante delle tubazioni per comprendere quali possano essere le grandezze che influenzano l'abbassamento della linea di saturazione e, quindi, l'incremento artificiale della permeabilità della spiaggia. L'obiettivo è dunque quello di ottenere utili indicazioni progettuali sull'installazione del sistema di drenaggio come opera di ausilio nella difesa costiera.

Ringraziamenti

Il presente lavoro è stato supportato dalla European Community's Sixth Framework Programme attraverso il progetto HYDRALAB III, Contratto n. 022441. Gli autori ringraziano Leonardo Damiani e Marino L'Abbruzzi, del Politecnico di Bari, Diego Vicinanza, Pasquale Contestabile e Vincenzo Ferrante, della Seconda Università di Napoli, Paolo Ciavola, Elisa Fontana e Mouncef Sedrati, dell'Università di Ferrara e Paolo Veltri, Biancamaria Verbeni e Francesco Aristodemo dell'Università della Calabria per la collaborazione durante l'attività sperimentale e l'analisi dei dati.

Bibliografia

- Bowman D., Ferri S. e Pranzini E. (2007). *Efficacy of beach dewatering - Alassio, Italy*. Coastal Engineering, 54: 791-800.
- Bowman D., Bresci D., Danese C., Ferri S., Pranzini E. (2006) – *Risposta di una spiaggia all'applicazione di un drenaggio artificiale: il BMS di Alassio*. Studi costieri, vol. 11: 133-144.
- Damiani L. Ranieri G. e Rossetti R. (2003). *Coastal Protection with BMS: a first experience in Italy*. Proc. of 6th Int. Conf. on Coastal Engineering, Cadice, Spagna.
- Damiani L., Petrillo A. e Saponieri A. (2009). *Beach Dewatering Systems: modelling coastal ground-water flow*. Proc. of 33th IAHR Congress, Vancouver, Canada.
- Damiani L., Aristodemo F., Saponieri A., Verbeni B., Veltri P., Vicinanza D., *Full scale experiments on a BDS: hydrodynamic effects inside the beach*. Journal of Hydraulic Research, 2011, Vol. 49 S1 Hydralab III, pp. 44-54; ISSN:0022-1686.
- Damiani L., Vicinanza D., Aristodemo F., Saponieri A., Corvaro S., *Experimental investigation on wave set-up and nearshore velocity field in presence of a BDS*. Journal of Coastal Research, 2011, Vol. SI 64, pp. 55-59; ISSN: 0749-0208 .
- Elfrink B. e Baldock T. (2002). *Hydrodynamics and sediment transport in the swash zone: a review and perspectives*. Coastal Engineering, 45: 149-167.
- Larson M., Kubota S., Erikson L. (2004). *Swash zone sediment transport and foreshore evolution: field experiments and mathematical modelling*. Marine Geology. 212: 61-79.
- Vesterby H. (1991). Coastal drain system: a new approach to coastal restoration. In Proceedings of Geo-Coast, pages 651–654, Yokohama, Japan, September 1991.
- Vesterby H. (1994). *Beach face dewatering - the European experience. Alternative technologies in beach preservation*. Proc. of the National Conference on Beach Preservation Technology, San Pietroburgo, Russia.
- Vicinanza D., Guida A., Ferrante V. e Ciavola P. (2010). *Performance of a Beach Dewatering System - Chiaiolella Beach, Procida Island, Italy*. Journal of Coastal Research, 26(4): 753-761.

Ricevuto il 15/12/2011, accettato il 03/09/2012.

Nuovi indicatori per lo studio e la gestione della costa emiliano-romagnola

Margherita Aguzzi, Nunzio De Nigris, Mentino Preti e Roberto Mallegni

Arpa Emilia-Romagna, Direzione Tecnica - Via Largo Caduti del Lavoro, 6 - 40121 Bologna
E mail: maguzzi@arpa.emr.it, ndenigris@arpa.emr.it, mpreti@arpa.emr.it, rmallegni@arpa.emr.it

Riassunto

Una parte significativa della costa emiliano-romagnola è protetta con varie tipologie di opere dall'erosione, fenomeno che ha iniziato a interessare il litorale a partire dai primi decenni del '900, ma che ha raggiunto la maggior intensità nella seconda metà del secolo. Questo lavoro presenta tre nuovi indicatori costieri che descrivono la tendenza evolutiva del litorale emiliano-romagnolo nella sua complessità, sulla base dell'analisi integrata di un'ampia gamma di dati a disposizione di Arpa Emilia-Romagna, raccolti nell'ambito degli ultimi due rilievi (2000-2006) delle reti regionali di monitoraggio costiero: linea di riva, variazioni di volume della spiaggia, subsidenza, volumi di sabbia portati a ripascimento, volumi di sabbia prelevati, situazione delle opere rigide. L'analisi integrata è indispensabile per il corretto studio di una costa artificializzata come quella emiliano-romagnola, dove cambiamenti dei volumi della spiaggia o della posizione della linea di riva possono essere causati sia da processi naturali, che da interventi antropici. Il primo indicatore, denominato ASPE, ha lo scopo di fornire il quadro del reale stato di criticità della costa e descrive il litorale così come si presenterebbe se non venissero effettuati gli interventi di difesa. Il secondo indice, l'ASE, fornisce indicazioni sullo stato del litorale così come si presenta dopo essere stato oggetto di interventi di protezione. Infine, il terzo indicatore serve a valutare gli effetti prodotti sulle spiagge dalle misure di difesa adottate, al fine di trovare spunti per ulteriori miglioramenti. Sulla base del confronto tra l'ultimo rilievo costiero, effettuato nel 2006, e il precedente del 2000, l'analisi ASPE dimostra che il 48 % della costa regionale è in condizioni critiche: 33 km sono in erosione e 23 km sono in equilibrio precario solo grazie agli interventi di difesa. D'altra parte, l'indicatore ASE dimostra che grazie alla politica di difesa regionale, orientata prevalentemente verso il ripascimento, soltanto il 15 % (17 km) delle spiagge è ancora in erosione. Focalizzando l'analisi sui tratti di litorale che nel periodo di indagine sono stati oggetto di interventi, i dati dimostrano che il ripascimento ha prodotto un generale miglioramento nello stato delle spiagge. Solo in pochi casi non sono stati rilevati significativi cambiamenti. In conclusione i tre indicatori possono essere utilizzati come strumenti di supporto alla gestione della costa perché permettono 1) di definire dove sono necessarie misure di protezione; 2) di valutare l'efficacia degli interventi; 3) di individuare nuove misure più appropriate.

Parole chiave: indicatori, gestione difesa costiera, ripascimento, opere rigide, linea di riva, accumulo, erosione, stabilità.

Abstract

A significant part of Emilia-Romagna coast is artificially protected by the erosion that started to affect the beaches in the second half of the 20th century. This paper presents three new coastal indicators which describe the evolutionary trends of the Emilia-Romagna littoral in a simple way, starting from the integrated analysis of the whole set of data collected by Arpa Emilia-Romagna with the last two surveys (2000-2006) of the regional coast monitoring networks: beach volume changes, subsidence, nourishment volume, withdrawals volume, coastline trend, hard structures state.

The integrated analysis is fundamental for the correct study of an artificial coast such as the Emilia-Romagna littoral, where changes in beach volume or in coastline features can result both from natural processes and from artificial procedures. The first indicator is called ASPE and shows the real state of the beaches if protection procedures had not been carried out. The second indicator is called ASE and its aim is to assess the state of the regional littoral produced by the mitigation works. The third indicator evaluates the effectiveness of defence policy on the Emilia-Romagna coast in order to find suggests for improvements.

On the basis of the last available coastal survey (2006) compared with the previous one carried out in 2000, ASPE analysis shows that 48% of the regional coast is in critical conditions: 33 km are in erosion and 23 km are in precarious balance. But on the other hand, as shown by ASE indicator, thanks to the Emilia-Romagna regional defence policy mainly orientated towards nourishment, only 15% of the beaches are still in erosion. Focusing analysis on cells where interventions have been carried out during the six years investigated, the data show that nourishment has produced a general beach improvement. Only in a few cases no changes are noticed. Finally, the three indicators can be used as supporting tools for the management system of the regional coast, because they are able first to define where defence works are needed, then to evaluate the coastal defence system performance and finally to suggest improvements for the coastal protection.

Keywords: *indicators, coastal defence management, nourishment, hard structures, shoreline, accumulation, erosion, stability.*

Introduzione

Le coste basse e sabbiose sono sistemi molto complessi, difficili da studiare e da gestire. La complessità che le caratterizza è correlata ai differenti e numerosi fattori, di origine sia naturale che antropica, che agiscono su di esse rendendole luoghi estremamente dinamici e variabili. Tra i vari processi che interessano i litorali sabbiosi uno dei più studiati e contrastati è quello dell'erosione costiera.

Una tra le questioni fondamentali che gli studiosi dei sistemi costieri si trovano a dover affrontare è la definizione di criteri di analisi condivisi e in grado di fornire una realistica ricostruzione dello stato delle coste nella loro complessità.

Nell'ultimo decennio, sia in ambito internazionale che locale, ha avuto progressivamente maggiore seguito l'approccio allo studio dei litorali tramite indicatori ambientali in grado di fornire rappresentazioni sintetiche di realtà ambientali complesse (Eurosion 2004; Deduce, 2007; Conscience, 2010).

In questa sede, si intende presentare il lavoro che negli ultimi anni è stato svolto dall'Unità Specialistica Mare Costa Arpa Emilia-Romagna (Arpa ER) per la definizione, appunto, di indicatori in grado di riflettere le effettive condizioni della costa emiliano-romagnola e di portare a sintesi la grande mole di dati raccolti in 30 anni di attività e studi sulla costa regionale. L'iniziativa è nata dall'esigenza di gestire in maniera sistematica e integrata i dati raccolti con le reti regionali di monitoraggio della subsidenza costiera, della linea di riva e della batimetria, che a partire dal 1984 vengono rilevate da Arpa ER ogni 5-6 anni. A questi si aggiungono le informazioni riguardanti gli interventi di difesa effettuati sul litorale (ripascimenti, costruzione/manutenzione di opere rigide) (Idroser, 1981; Idroser, 1996; Preti et al., 2002; 2008; Arpa Emilia-Romagna, 2009; 2010; 2011).

Tradizionalmente, lo stato di un litorale viene definito sulla base dell'analisi evolutiva della linea di riva in termini di tendenza all'accrescimento, alla stabilità e all'erosione. La linea di riva è, infatti, uno dei più importanti indicatori dell'assetto fisico costiero, esso rappresenta uno dei 27 geoindicatori per la valutazione dei cambiamenti ambientali della terra (Li et al., 2001; Berger e Iams, 1996).

La mappatura della linea di riva è però un'operazione molto delicata e a questo proposito esiste un'ampia trattazione dei criteri utilizzati (Dolan et al., 1980; Krauss e Rosati, 1997; Li et al., 2001; Boak e Turner, 2005; Calabrese e Lorito, 2009; Milli e Surace, 2011). L'altro limite della linea di riva è legato all'ambiguità delle informazioni che essa può fornire nel caso di spiagge fortemente antropizzate come quelle, ad esempio, della Regione Emilia-Romagna. Essa da sola non è espressione oggettiva della situazione erosiva del litorale perché risente fortemente della movimentazione artificiale di sabbia sulla spiagge (argini invernali, dragaggi, ripascimenti). Nonostante questi limiti, la linea di riva resta il dato più diffuso e quindi il più utilizzato per l'analisi delle coste ad ampia scala spaziale e temporale. Generalmente ad essa vengono associati anche altri indicatori che forniscono informazioni sul grado di artificialità della costa e quindi, indirettamente, anche

sul grado di criticità: l'estensione delle opere di difesa, il fronte a mare occupato da opere portuali, il volume di sabbia apportata e le aree di ripascimento (Eurosion, 2004b; Deduce, 2007; Ispra, 2008; Barbano; 2011). In questa sede si intende presentare tre degli indicatori utilizzati per l'Annuario regionale dei dati ambientali di Arpa ER ritenuti particolarmente significativi perché in grado di rispondere in maniera oggettiva ad alcune delle domande cruciali che riguardano la costa emiliano-romagnola: 1) quale sarebbe lo stato del litorale se non si intervenisse? 2) quanti e quali sono i tratti critici sui quali sarebbe necessario intervenire? 3) qual è lo stato della costa a valle degli interventi effettuati? 4) quali effetti hanno prodotto gli interventi? 5) dove e come intervenire in futuro?

Inquadramento

L'erosione costiera è un problema che riguarda le spiagge di tutto il mondo: secondo lo studio EUROSION (2004a) in Europa nel 2001 erano 15.000 i chilometri di costa interessati da questo fenomeno, il 15% del totale.

Per quanto riguarda le coste italiane, secondo ISPRA (2008), nel 2000 i litorali in arretramento rispetto a 50 anni prima ammontavano a 1.170 km, il 24% della costa bassa presente nel nostro paese, mentre recenti analisi (Barbano, 2011) riferite al 2007 confrontate con il 2000, evidenziano una diminuzione dei litorali in arretramento a 900 km, il 19% della costa bassa nazionale.

Sempre secondo le stime ISPRA (2008), nel 2000 rispetto agli anni '50, la costa emiliano-romagnola in erosione risultava essere pari a circa 41 km, il 25% del litorale regionale. Infine dati più recenti del 2006 (Arpa, 2012) riguardanti la linea di riva stimano che rispetto al 1983 è in arretramento il 18% della costa regionale (19,5 km).

Lungo la costa emiliano-romagnola (Fig. 1), come in molte altre coste basse e sabbiose (GNRAC, 2006), l'attività antropica ha accelerato e inasprito i processi erosivi, che da sempre operano naturalmente a differenti scale temporali e spaziali sui litorali, interagendo con tali sistemi in maniera diretta e indiretta. Con la regimazione dei bacini fluviali e l'escavazione in alveo è venuta a mancare l'alimentazione sedimentaria delle spiagge. L'estrazione di fluidi (acqua, idrocarburi e gas) dal sottosuolo in prossimità della costa ha portato a un aumento del tasso di subsidenza, producendo quella che in geologia viene definita "accomodation" e che in termini di erosione costiera si traduce in perdita di volume a carico della spiaggia. Il riscaldamento globale sta provocando lo scioglimento dei ghiacciai e un conseguente aumento del livello del mare. La costruzione di strutture rigide per proteggere la costa, la realizzazione di opere portuali e l'urbanizzazione a ridosso delle spiagge hanno prodotto un irrigidimento della costa e una riduzione degli spazi di azione dei processi costieri.

Per contrastare l'erosione costiera sono stati adottati vari approcci: 1) l'utilizzo di difese rigide (es. scogliere in massi), 2) l'utilizzo di difese "morbide" (es. ripascimenti).

Il litorale emiliano-romagnolo ha un fronte mare di 130 km, composto da costa bassa e sabbiosa e da un sistema lagunare deltizio in corrispondenza della foce del fiume Po (Fig. 1).

Oltre la metà delle spiagge regionali (circa 74 km) è protetta da opere rigide di vario tipo. Le più diffuse sono le scogliere parallele emerse che difendono circa 40 km di costa (Preti et al., 2008). I restanti 30 km sono protetti da scogliere radenti, scogliere a cresta bassa, barriere sommerse in sacchi e pennelli. A queste strutture si aggiungono le opere portuali e le darsene che occupano circa 2,5 km di fronte a mare (Arpa, 2012), contribuendo all'artificializzazione della costa regionale e ad aumentarne la complessità.

In molti casi gli interventi con tecniche di difesa rigida hanno ridotto i problemi di erosione locale, ma solo per un tempo limitato, spostando gli stessi sulle località adiacenti e generando inoltre evidenti impatti paesaggistico-ambientali.

Per questi motivi, a partire dagli anni '80, la Regione Emilia-Romagna ha avviato una nuova strategia di difesa basata sul ripascimento: prima utilizzando sabbie di cava a terra e poi favorendo lo sfruttamento di accumuli litoranei e di giacimenti sabbiosi sottomarini (Preti, 2002; Correggiari et al., 2011; Preti et al., 2011a; 2011b).

L'impiego di questa tecnica che produce un immediato ampliamento della spiaggia, ha dimostrato che il ripascimento artificiale, se effettuato con cognizione dei sistemi costieri, con materiali idonei e limitando gli impatti ambientali in fase di prelievo degli inerti, oltre a essere valido sia dal punto di vista della salvaguardia del litorale che da quello economico, favorisce la fruizione turistica delle spiagge.

La variabilità delle caratteristiche geologico-evolutive del litorale regionale e il susseguirsi e sovrapporsi degli interventi hanno determinato una frammentazione della costa in tratti a differente evoluzione, molto complicati da definire con visione unitaria.

Il volume edito da Arpa ER “Stato del litorale emiliano-romagnolo all’anno 2007 e piano decennale di gestione” (Preti et al., 2008) fa uno sforzo in questo senso, presentando, tra l’altro, un resoconto delle condizioni del litorale sulla base degli interventi effettuati e dei dati acquisiti nel 2000 e 2006 con i rilievi delle reti di monitoraggio regionali della costa (della linea di riva, della subsidenza e della batimetria).

Un altro importante contributo alla conoscenza del litorale regionale è “Il sistema mare-costa dell’Emilia-Romagna” (Regione Emilia-Romagna, 2009), un volume che raccoglie una serie di documenti tecnici relativi al Sistema informativo del Mare e della Costa gestito dal Servizio Geologico Sismico e dei Suoli e descrive gli ambiti in cui da 10 anni il Servizio opera allo scopo di fornire utili strumenti per la gestione e la pianificazione territoriale: cartografia, database, studi della dinamica marina e costiera e analisi della vulnerabilità e dei rischi costieri.

Il lavoro di Arpa ER sugli indicatori è iniziato nel 2008, contestualmente ai due lavori appena citati, nell’ambito della redazione dell’Annuario che l’Agenzia pubblica e che si basa sul modello di *reporting* ambientale DPSIR (Determinante-Pressione-Stato-Impatto-Risposta) della Agenzia Europea dell’Ambiente (Arpa ER, 2010; 2011; 2012).

Nell’ambito di tale *report* ambientale, oltre ai tradizionali indicatori di ‘stato’ sulla variazione della linea di riva e a quelli di ‘risposta’ dedicati alle opere rigide e ai ripascimenti, è stato introdotto un ulteriore indicatore di ‘stato’, denominato “Indicatore di Stato del Litorale (ISL)” (Arpa ER, 2009), basato sull’analisi integrata di molteplici elementi: la linea di riva, le variazioni di volume a carico di spiaggia emersa e sommersa, la subsidenza, i ripascimenti, i prelievi e le opere di difesa rigida.

Nel 2010, i criteri dell’ISL sono stati ripresi e sviluppati nell’ambito delle attività volte alla creazione di strumenti di gestione integrata della costa per il progetto Europeo COASTANCE (AA.VV., 2010; 2011a; 2011b; 2012). Questa fase di revisione dell’indicatore ha visto il coinvolgimento dei Servizi Tecnici di Bacino, del Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli e del Servizio Difesa del Suolo, della Costa e Bonifica della Regione Emilia-Romagna. Con il contributo di tutti si è giunti alla definizione di un indicatore ribattezzato con

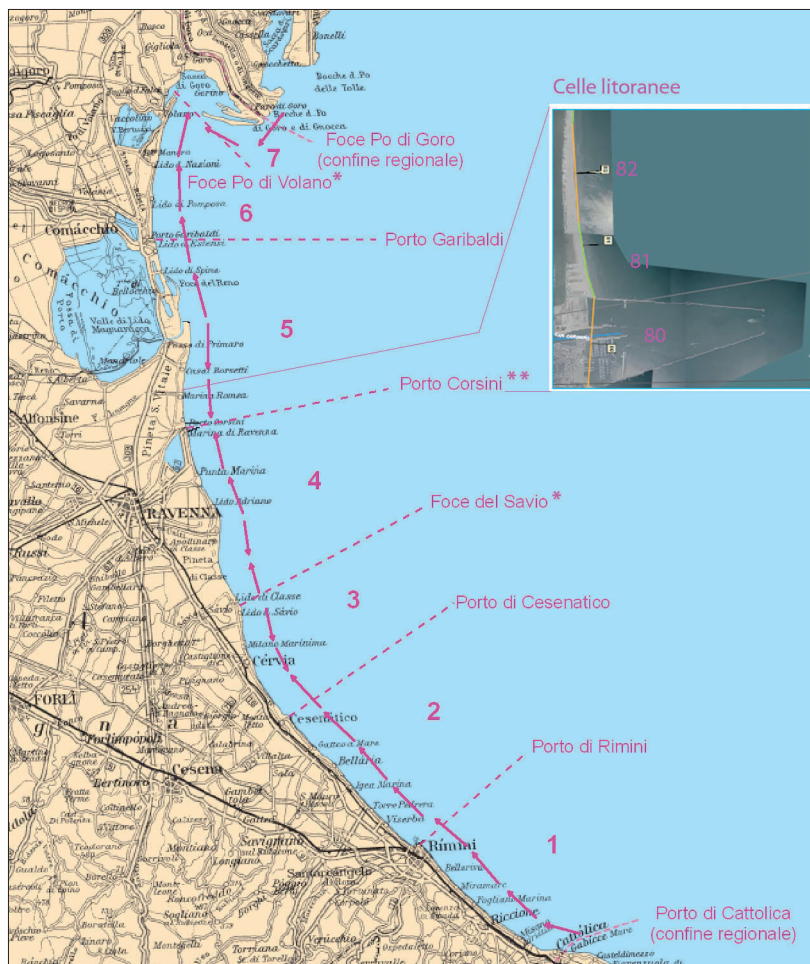


Figura 1 - Suddivisione del litorale nelle “macrocelle” definite da Preti et alii (2008), limitate da lunghi moli portuali o punti nulli del trasporto solido. Le foci del Po di Volano e del Savio corrispondono rispettivamente a un punto di convergenza e un punto di divergenza del trasporto solido lungo costa, che nella mappa è rappresentato dalle frecce. Nel riquadro a destra è riportato il dettaglio di tre “Celle litoranee” poste a nord di Porto Corsini.

l'acronimo ASPE (Accumulo-Stabile-equilibrio Precario-Erosione) e che sarà il primo dei tre trattati nel presente articolo.

Gli altri due indicatori presentati in questa sede sono denominati: "ASE" e "Valutazione degli effetti prodotti dagli interventi".

Gli indicatori e la metodologia di analisi integrata

In letteratura esistono numerose definizioni per il termine indicatore, che possono essere così sintetizzate: un indicatore ambientale è un parametro qualitativo o quantitativo capace di rappresentare una situazione ambientale complessa, cioè lo 'stato' di uno spazio geografico costituito da componenti naturali, biotiche e abiotiche, e da componenti antropiche (Alfen e Seabo, 1993; OEDC, 1994; Scherp, 1994; Cirillo et al., 1995; OEDC, 2005).

I tre indicatori presentati con questo lavoro sono stati definiti partendo dal presupposto che la linea di riva non è unica espressione della spiaggia, ma lo sono anche la morfologia del fondale e la presenza di sistemi di protezione. Per questo essi si basano sull'analisi integrata della variazione della linea di riva, della situazione degli interventi di difesa, delle variazioni di volume a carico della spiaggia, includendo quindi nell'analisi il dato topo-batimetrico. Tale approccio integrato si differenzia da quello tradizionalmente adottato che prevede l'analisi di tali aspetti in maniera separata.

In EuroSION (2004b), ad esempio, gli indicatori utilizzati sono il trend evolutivo della linea di riva, associato e non integrato alla lunghezza del fronte costiero 'engineered' occupato da strutture di difesa o da strutture portuali, assumendo la presenza di opere come indicazione di erosione passata, presente o probabile futura. Un altro esempio sono le "Linee guida per gli Indicatori" del progetto europeo Deduce (AA.VV., 2007) che riportano un indicatore denominato "Erosione e accrezione costiera" composto da tre cosiddetti 'measurement' che hanno molto in comune con gli indicatori di EuroSION (2004b): 1) lunghezza della costa dinamica (lunghezza della costa in erosione o accrezione); 2) lunghezza dei tratti occupati da opere portuali o difese con opere rigide; 3) aree e volumi di ripascimento.

Infine, va citato il lavoro sui 'Coastal State Indicators' svolto nell'ambito del progetto Conscience (Van Rijn, 2010; Sutherland, 2010), dove oltre ad indicatori analoghi a quelli sopraccitati, ne sono contemplati altri riferiti alle dimensioni delle dune e della berma e alla pendenza del fondale.

Gli indicatori presentati nel presente articolo si basano sull'analisi integrata di tre principali gruppi di informazioni :

1. variazioni del volume di sabbia a carico di spiaggia emersa e sommersa:
 - perdite/accumuli risultanti dal confronto tra i rilievi topo-batimetrici;
 - perdite legate alla subsidenza;
 - accumuli dovuti ai ripascimenti;
 - perdite causate dai prelievi di sabbia destinata al ripascimento di spiagge in erosione;
2. variazioni della linea di riva:
 - avanzamenti/arretramenti legati a dinamiche marine o a interventi antropici;
3. situazione degli interventi di difesa:
 - presenza o meno di opere rigide di protezione;
 - costruzione di nuove opere nel periodo in esame;
 - manutenzione delle opere nel periodo in esame;
 - realizzazione di ripascimenti nel periodo in esame.

Considerare singolarmente o escludere una di queste informazioni può essere fuorviante. Ad esempio, una perdita di volume può essere legata a fenomeni erosivi, ma anche al prelievo artificiale di sabbia oppure ad abbassamenti del suolo dovuti alla subsidenza. Analogamente, un accumulo può essere causato da processi naturali, ma può rappresentare anche l'effetto di un ripascimento.

La presenza di opere di difesa rigida modifica profondamente le caratteristiche dinamiche e morfologiche della spiaggia, inoltre, le condizioni in cui esse versano e il loro stato di manutenzione sono informazioni necessarie per una corretta analisi del sistema costiero soggetto a intensa gestione.

Infine, variazioni di volume possono interessare anche solo la porzione di spiaggia sommersa e non avere nessuna manifestazione sulla spiaggia emersa dove la linea di riva può apparire stabile.

Questa metodologia di analisi integrata basata sull'utilizzo di indicatori è stata messa a punto su dati riferiti al

periodo 2000-2006 (anni di realizzazione delle ultime due campagne regionali di monitoraggio della costa) già validati ed elaborati con approccio tradizionale nell'ambito dello studio di Preti et al. (2008).

Sono state definite unità territoriali di riferimento a piccola e a grande scala. Come settori di riferimento a grande scala sono state utilizzate sette 'macrocelle' della lunghezza variabile tra 15-30 km, definite dallo studio di Preti et al. (2008). Tali macrocelle corrispondono a segmenti di costa caratterizzati da bilanci sedimentari a se stanti a causa del limitato scambio reciproco di sedimenti grossolani dovuto all'interruzione del trasporto solido *longshore* ad opera di moli portuali oppure legato alla presenza di punti nulli del trasporto stesso (punti di convergenza o divergenza) (Fig. 1).

Come unità elementare di dettaglio è stata adottata la 'cella' introdotta dallo studio di Preti et alii (2008), rielaborata a fini gestionali nell'ambito del progetto europeo Coastance e utilizzata nel 'SICELL-Il sistema gestionale delle celle litoranee' della Regione Emilia-Romagna (AA.VV., 2010).

Le 'celle litoranee di gestione' sono in totale 118, ricoprono tutta la costa inclusa la riva interna della laguna e sommate raggiungono la lunghezza di 140 km. Esse rappresentano tratti costieri della lunghezza variabile da poche decine di metri ad alcuni chilometri, contraddistinti da un'evoluzione della spiaggia emersa e sommersa uniforme strettamente dipendente dalla storia degli interventi di difesa effettuati.

Per discriminare le modificazioni a carico della spiaggia, sono state definite delle soglie di variazione.

Come variazione di volume significativa è stato fissato il valore di 30 m³/m sui 6 anni intercorsi tra gli ultimi due rilievi della rete (2000-2006). Per quanto riguarda la linea di riva, sono stati considerati significativi avanzamenti o arretramenti superiori ai 10 m per tratti lunghi almeno 100 m.

Entrambe queste soglie sono state definite sulla base delle conoscenze acquisite negli anni sulla costa regionale (Preti et al., 2008) e sono state utilizzate in maniera flessibile: valutando volta per volta la rappresentatività dei dati e la coerenza tra loro.

Indicatore ASPE

L'indicatore ASPE (Accumulo, Stabile, equilibrio Precario, Erosione) descrive lo stato del litorale emiliano-romagnolo così come si presenterebbe se in un determinato periodo non venissero effettuati gli interventi di difesa. Tale indicatore ha lo scopo di fornire il quadro dello stato reale di criticità della costa.

Come già anticipato, l'ASPE rappresenta la rielaborazione a fini gestionali dell'ISL (Arpa ER, 2009, 2010) effettuata nell'ambito del progetto Coastance (AAVV, 2011) allo scopo di adattare l'analisi alla realtà fortemente antropizzata del litorale emiliano-romagnolo.

L'ASPE si basa sull'analisi intergrata dei tre gruppi di informazioni elencati sopra e descrive lo stato del litorale in termini di tendenza delle spiagge all'erosione, all'accumulo o all'equilibrio con riferimento a un determinato periodo, prevedendo la distinzione di quattro tipi di tratti costieri riportati in Tabella 1 (Fig. 2).

Tabella 1- Le 4 classi previste dall'indicatore ASPE.

Classe	Definizione
Accumulo	Tratto di litorale che evidenzia accumuli di sabbia significativi* nel periodo in esame.
Stabile	Tratto di litorale che non evidenzia perdite o accumuli di sabbia significativi* e che non è stato oggetto di interventi di difesa dall'erosione (ripascimenti o opere) nel periodo in esame.
Equilibrio precario	Tratto di litorale che non evidenzia perdite o accumuli di sabbia significativi* e che è stato oggetto di interventi di difesa dall'erosione (ripascimenti o opere) nel periodo in esame.
Erosione	Tratto di litorale che evidenzia perdite di sabbia significative* nel periodo in esame.

*Sono considerati significativi accumuli o perdite maggiori di 30 m³/m.

Nell'individuazione delle classi, ASPE tiene conto della presenza e dello stato di manutenzione delle opere di difesa presenti e utilizza come elemento di riferimento fondamentale la variazione di volume (m³/m). Tale variazione si ottiene sottraendo, al valore volumetrico risultante dal confronto tra i rilievi topo-batimetrici del 2000 e 2006, i volumi di sabbia portati a ripascimento e sommando i volumi di sabbia prelevati, relativi sempre al periodo in esame.

Nei casi dubbi, in cui la variazione di volume risulta prossima alla soglia dei 30 m³/m, la tendenza della linea di riva assume maggior potere discriminante.

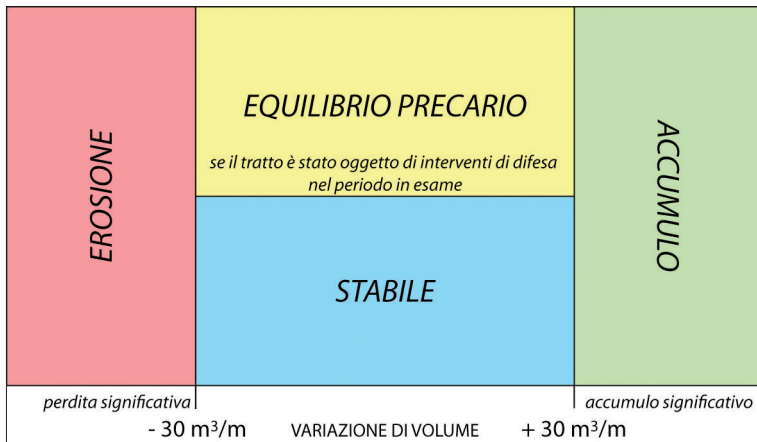


Figura 2 - Schema dell'indicatore ASPE.

l'estensione di costa in stato di criticità con potenziale necessità di interventi di difesa (tratti in equilibrio precario e in erosione).

Indicatore ASE

L'ASE (Accumulo, Stabile, Erosione) è un indicatore di 'stato' che, a differenza dell'ASPE, fornisce indicazioni sullo stato del litorale così come si presenta dopo essere stato oggetto di interventi di difesa.

Esso rappresenta un'immagine della costa paragonabile a quella che si ottiene dall'analisi della variazione della linea di riva, perché analogamente a questa l'ASE non tiene in considerazione le cause (naturali o antropiche) che determinano l'assetto della spiaggia.

L'ASE ha però una base dati più sostenuta, perché l'indicatore non si limita a considerare la tendenza della linea di riva, ma ha come riferimento principale le variazioni di volume, includendo così nell'analisi le modificazioni a carico sia della spiaggia emersa che di quella sommersa.

Analogamente all'ASPE, l'ASE descrive la costa in termini di tendenza delle spiagge all'erosione, all'equilibrio o all'accumulo, prevedendo però solo tre classi (Tab. 2, Fig. 3).

Tabella 2 - Le 3 classi previste dall'indicatore ASE.

Classe	Definizione
Accumulo	Tratto di litorale che evidenzia accumuli di sabbia significativi nel periodo in esame.
Stabile	Tratto di litorale che non evidenzia perdite o accumuli di sabbia significativi nel periodo in esame.
Erosione	Tratto di litorale che evidenzia perdite di sabbia significative nel periodo in esame.

La variazione di volume di riferimento considerata in questo caso è il risultato della somma del valore volumetrico ottenuto dal confronto tra i rilievi topo-batimetrici eseguiti con le reti di monitoraggio (volumi 'accumulati e persi'), con i volumi di sabbia prelevati, relativi al medesimo periodo dei rilievi.

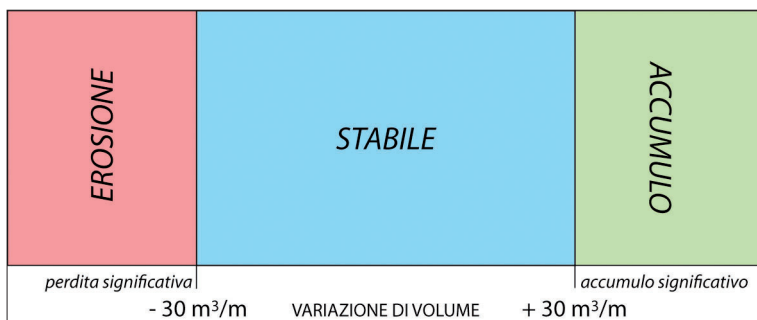


Figura 3 - Schema dell'indicatore ASE.

Tra i tratti che non presentano accumuli o perdite significative, ASPE distingue le spiagge realmente stabili, da quelle che invece sono caratterizzate da un equilibrio precario garantito da recenti interventi di difesa o di manutenzione delle opere. Questo indicatore quindi permette di rispondere alle prime due domande citate in introduzione : 1) quale sarebbe lo stato del litorale se non si intervenisse? 2) quanti e quali sono i tratti critici sui quali sarebbe necessario intervenire? ASPE consente infatti di quantificare l'estensione di costa in buono stato (tratti in accumulo e stabili) e

Si tratta quindi di una variazione di volume al lordo dei ripascimenti che inoltre non riconosce come discriminante la presenza o lo stato delle opere rigide. Questo perché l'indicatore serve ad evidenziare gli effetti prodotti dagli interventi di protezione sullo stato della costa Per la stessa ragione manca la classe dedicata ai tratti in equilibrio precario.

L'indicatore è stato inoltre definito in questo modo (i.e. in termini volume-

trici) per poter essere messo a confronto diretto con l'ASPE ed utilizzato nella valutazione degli effetti prodotti sulla costa dalle misure di protezione adottate, come illustrato dal prossimo indicatore. In conclusione l'ASE consente di rispondere alla terza domanda: 3) qual è lo stato della costa a valle degli interventi effettuati? Esso descrive infatti lo stato apparente della costa frutto delle politiche di gestione adottate dalla Regione.

Indicatore ‘Valutazione degli effetti prodotti dagli interventi di difesa della costa’

Tramite questo indicatore di ‘risposta’, viene effettuata una valutazione degli effetti prodotti dagli interventi di difesa realizzati sul litorale regionale nel periodo di riferimento dei dati.

Tale indicatore si applica esclusivamente ai tratti litorali che sono stati oggetto di interventi di difesa (costruzione nuove opere e/o manutenzione opere esistenti e/o ripascimenti).

La valutazione viene effettuata confrontando la classe di appartenenza del tratto in questione all'ASPE, che descrive lo stato del litorale se non fosse stato oggetto di interventi, con l'ASE, che rappresenta invece la spiaggia così come si presenta dopo la realizzazione degli interventi.

L'indice prevede le seguenti situazioni (Fig. 4):

- l'intervento ha prodotto un miglioramento della situazione del tratto costiero interessato (passaggio di classe da ASPE a ASE positivo);
- l'intervento non ha prodotto nessun cambiamento nel tratto costiero interessato (nessun passaggio di classe da ASPE a ASE);
- l'intervento ha causato un peggioramento della situazione del tratto costiero interessato (passaggio di classe da ASPE a ASE negativo).

Questo indicatore permette di rispondere alla domanda : 4) che effetti hanno prodotto gli interventi? e da esso possono essere tratti suggerimenti e indicazioni in merito a 5) dove e come intervenire in futuro.

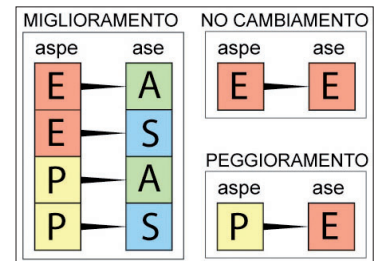


Figura 4 - Schema dell'indicatore per la valutazione degli effetti prodotti dagli interventi di difesa basato sul confronto tra ASPE e ASE.

Esempi di applicazione degli indicatori

Le prime 6 celle riportate in Tabella 3 rappresentano esempi di tratti di costa in accumulo o stabili. In queste spiagge in buono stato l'ASPE e l'ASE coincidono.

La spiaggia Alba Nord di Riccione e quella di Lido degli Estensi, prive di opere di difesa, e la spiaggia Misano protetta da scogliere parallele emerse sono tratti di litorale in accumulo (Fig. 5). In tutte e tre queste spiagge la linea di riva risulta in avanzamento e, in termini di volume, viene rilevato ovunque un accumulo significativo. L'accumulo di sabbia più rilevante è stato osservato a Lido degli Estensi. Aspetto questo che non sarebbe stato rilevato se non fossero stati conteggiati nel bilancio anche i prelievi: nel periodo indagato da tale tratto di costa infatti sono state dragate ingenti quantità di sabbia.

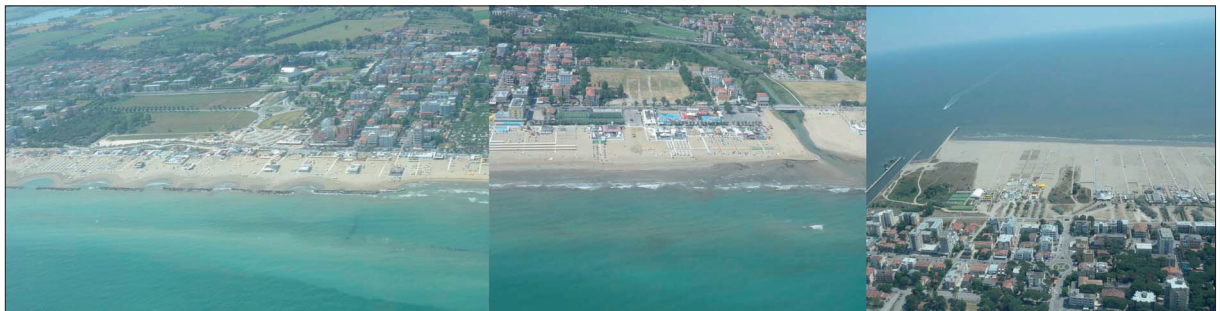


Figura 5 - Spiagge in accumulo. Da sinistra: Misano scogliere, Riccione Alba Nord, Lido degli Estensi.

Cervia, Viserbella e Fogliano Marina sono tre tratti di litorale in condizioni di stabilità (Fig. 6). Mentre la lunga spiaggia di Cervia (4420 m) presenta una indubbia situazione di equilibrio testimoniata sia dalla tendenza della linea di riva che dalla variazione di volume, negli altri due casi l'analisi integrata è stata determinante per riconoscerne la stabilità. Per Viserbella, ad esempio, dove è stato rilevato soltanto un leggero ac-

cumulo (+38 m³/m) , si è ritenuto opportuno dare maggior peso alla tendenza alla stabilità della linea di riva. Diversamente, a Fogliano Marina dove la linea di riva appare in avanzamento, è stata data maggior rilevanza al dato volumetrico (-5 m³/m) in lievissima perdita tuttavia ampiamente compresa nel range di stabilità.



Figura 6 - Spiagge stabili. Da sinistra: Fogliano Marina, Viserbella e Cervia.

Le ultime 7 celle riportate in Tabella 3 rappresentano esempi di spiagge soggette a fenomeni erosivi più o meno intensi. Secondo l'indice ASPE tali celle sono classificate come tratti in erosione o tratti in equilibrio. A differenza dei precedenti 6 esempi di spiagge in buono stato, nella maggior parte dei casi queste celle presentano una classificazione ASE differente dall'ASPE perché su di esse sono stati effettuati interventi di difesa di vario genere. Per queste è infatti possibile effettuare una valutazione degli effetti prodotti dagli interventi di protezione adottati tramite confronto tra i due indici.

Riccione centro, Bellaria e Milano Marittima Nord sono spiagge in equilibrio precario, garantito quindi dagli interventi di difesa (Fig. 7). Esse sono tutte e tre spiagge protette da opere e oggetto di ripascimento. Milano Marittima è un esempio tipico di spiaggia in equilibrio precario con variazioni di linea di riva e dei volumi non significative. Grazie ai ripascimenti, a Riccione centro la linea di riva risulta in avanzamento, ma l'accumulo non supera la soglia di significatività dei 30 m³/m. A Bellaria, linea di riva e variazione di volume esprimono tendenza opposta: si rileva arretramento della spiaggia e un contestuale, seppur leggero, accumulo di sedimento. Nonostante questo la spiaggia è da considerare in equilibrio precario perché, nel periodo in esame, nella cella sono stati effettuati interventi di ripascimento e anche interventi di manutenzione alle scogliere parallele emerse. In base alla classificazione ASE tutte e tre le celle risultano in accumulo, quindi questo porta a concludere che gli interventi effettuati hanno prodotto un miglioramento della situazione.



Figura 7 - Spiagge in equilibrio precario. Da sinistra: Riccione Centro, Bellaria e Milano Marittima Nord.

La spiaggia di Misano protetta dai pennelli e quelle di Riccione Sud, Cesenatico Colonie e Bevano Nord rappresentano 4 esempi di celle in erosione secondo l'indice ASPE (Fig. 8). Sui primi tre tratti nel periodo in esame sono stati effettuati interventi di ripascimento e/o di manutenzione delle opere. A Misano e a Riccione i ripascimenti hanno portato a un netto miglioramento della situazione: entrambe le spiagge risultano in base all'ASE in accumulo e la linea di riva appare infatti stabile nel primo caso e in avanzamento nel secondo.

Per quanto riguarda la spiaggia di Cesenatico Colonie, gli interventi di ripascimento non hanno prodotto sostanziali miglioramenti nella situazione erosiva del tratto, che infatti secondo l'indicatore ASE continua ad essere classificato come in erosione. Questo suggerisce che in futuro sarà necessario apportare un maggior quantitativo di sabbia per un adeguato intervento di ripascimento.

Infine c'è il tratto in erosione collocato nelle vicinanze della foce del fiume Bevano che nonostante versi in condizioni critiche non è stato oggetto di interventi di difesa nel periodo in esame.



Figura 8 - Spiagge in erosione. Da sinistra: Misano zona dei pennelli, Riccione Sud, Cesenatico Colonie e Bevano Nord.

Tabella 3 - Esempi di applicazione degli indicatori.

Periodo di riferimento dei dati: aprile 2000 - aprile 2006							
Cella	Denominazione	Lunghezza (m)	Opere rigide ¹	Accumuli e perdite (m ³ /m)	Realizzazione nuove opere o manutenzione	Ripascimenti (m ³ /m)	Prelievi (m ³ /m)
13	Misano Scogliere	755	SE	99	no	0	24
21	Riccione Alba Nord	1250	-	43	no	0	0
100	Lido degli Estensi	1540	-	37	no	0	160
23	Fogliano Marina	610	-	-5	no	0	0
35	Viserbella	1200	SE	38	no	0	0
55	Cervia	4420	-	-12	no	0	0
15	Riccione Centro	1850	BSS	97	no	68	0
41	Bellaria	2690	SE	37	si	3	0
60	Milano Marittima Nord	1685	SE	60	no	78	0
12	Misano Pennelli	1680	PBSS	70	si	207	0
14	Riccione Sud	1000	BSS	64	si	398	0
51	Cesenatico Colonie	775	-	-58	-	152	0
71	Bevano Nord	1000	-	-111	no	0	0
Periodo di riferimento dei dati: aprile 2000 - aprile 2006							
Cella	Denominazione	Variazione di volume (m ³ /m) = Accumuli e perdite - ripascimenti + prelievi	Linea di riva ²	ASPE ³	Accumuli e perdite + prelievi (m ³ /m)	ASE ⁴	Valutazione effetti degli interventi
13	Misano Scogliere	123	AV	A	99	A	-
21	Riccione Alba Nord	43	AV	A	43	A	-
100	Lido degli Estensi	197	AV	A	197	A	-
23	Fogliano Marina	-5	AV	S	-5	S	-
35	Viserbella	38	ST	S	38	S	-
55	Cervia	-12	ST	S	-12	S	-
15	Riccione Centro	29	AV	P	97	A	Miglioramneto
41	Bellaria	35	AR	P	37	A	Miglioramento
60	Milano Marittima Nord	-18	ST	P	60	A	Miglioramento
12	Misano Pennelli	-137	ST	E	70	A	Miglioramento
14	Riccione Sud	-334	AV	E	64	A	Miglioramento
51	Cesenatico Colonie	-210	AR	E	-58	E	Nessun cambiamento
71	Bevano Nord	-111	AR	E	-111	E	-

¹Opere rigide SE: scogliere parallele emerse; P: pennelli; PBSS: pennelli e barriera sommersa in sacchi di sabbia; BSS: barriera sommersa in sacchi di sabbia; SSP: scogliere semisommerse e pennelli.

²**Linea di riva AV:** avanzamento; ST: stabile; AR: arretramento.

³**ASPE A:** accumulo; S: stabile; P: equilibrio precario; E: erosione.

⁴**ASE A:** accumulo; S: stabile; E: erosione.

Risultato dell'applicazione degli indicatori alla costa emiliano-romagnola

L'analisi dei dati rilevati con le reti di monitoraggio della costa nel 2000 e 2006 effettuata tramite l'indice ASPE ha permesso di definire lo stato di criticità del litorale all'anno 2006.

Da tale analisi è emerso che la percentuale di spiagge in buone condizioni (in accumulo e stabili) ammonta al 53 % e di conseguenza i tratti di litorale in condizioni precarie e critiche (in equilibrio precario ed in erosione) sono il 47 % (Fig. 9).

Queste percentuali si riferiscono al totale dei tratti che è stato possibile classificare (117,4 km), quindi sono esclusi gli sbocchi di fiumi e canali, le darsene, i porti e la riva interna della sacca di Goro, che sommati tra loro corrispondono a una lunghezza di 22,6 km .

In termini di lunghezze, i tratti in erosione e in accumulo, quindi nelle due opposte condizioni, hanno la stessa estensione: circa 33 km. Non differiscono moltissimo nemmeno le lunghezze dei tratti stabili e in equilibrio precario: rispettivamente circa 29 km e 23 km.

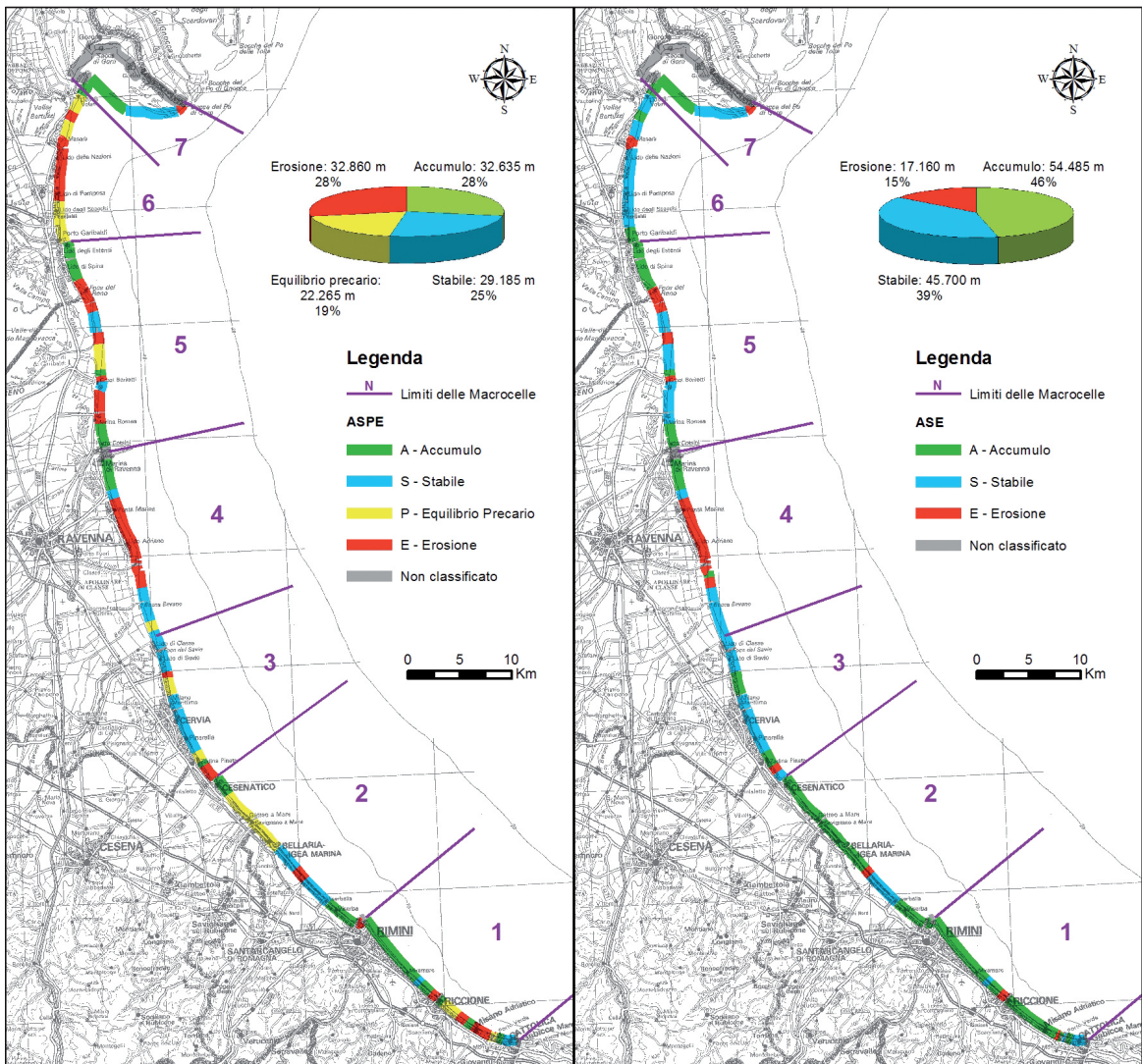


Figura 9 - Stato del litorale emiliano-romagnolo all'anno 2006 in base agli indicatori ASPE e ASE.

Il tratto Cattolica-Rimini (M1) è quello che presenta il maggior numero di chilometri di spiagge in accumulo (Fig. 10). Il litorale compreso tra la Foce del Savio a sud e la foce del Po di Volano a nord (M4, M5 e M6) è quello che invece presenta il maggior numero di chilometri in erosione: in totale circa 24 km.

Il litorale compreso tra il porto di Rimini e la Foce del Savio (M2 e M3) e il tratto corrispondente al sistema deltizio del Po (M7) hanno il minor numero di chilometri di spiaggia in erosione.

In apparenza la macrocella 7 sembrerebbe essere quella con le spiagge nelle migliori condizioni, in realtà è importante precisare che questo tratto lungo 10 km comprende 4,5 km di bocca della Sacca di Goro in corrispondenza della quale è stato rilevato un accumulo. Nonostante questo elemento appartenente all'ambiente lagunare non abbia niente in comune con le spiagge, si è ritenuto opportuno includere nell'analisi anche questo tratto di fronte a mare dal momento che è stato oggetto di interventi di gestione (dragaggi) nel periodo considerato, per rispondere ai fini gestionali dell'indicatore ASPE.

In estrema sintesi l'analisi integrata al 2006 dei dati disponibili tramite l'indicatore ASPE porta a concludere che circa 55 km di costa versa in condizioni di instabilità (Fig. 9).

Rispetto a quanto appena osservato, con l'indicatore ASE emerge il netto miglioramento prodotto dalla realizzazione di ripascimenti e interventi sulle opere rigide effettuati dalla Regione nel periodo in esame, infatti i tratti in accumulo passano dal 28 % al 46 %, quelli stabili dal 25 % al 39 %, mentre quelli in erosione dal 28 % al 15 % (Fig. 9).

La percentuale quindi di spiagge in buone condizioni (in accumulo e stabili) ammonta al 85 % e di conseguenza i tratti di litorale in condizioni critiche sono ridotti al 15 % ed il merito, come vedremo, è prevalentemente attribuibile ai ripascimenti.

Ragionando in termini di lunghezze, tra i circa 54 km di litorale in accumulo secondo l'ASE rientrano sia le spiagge naturalmente in buono stato, che quei tratti critici in cui i ripascimenti hanno prodotto significativi avanzamenti della spiaggia. Lo stesso discorso vale per i 46 km di spiagge stabili. Restano infine solo 17 chilometri di litorale ancora in erosione, tra i quali sono compresi sia tratti critici in cui non si è intervenuti, sia spiagge in cui gli interventi realizzati non sono stati sufficienti a contrastare il fenomeno erosivo.

Nel dettaglio delle varie macrocelle si rilevano le seguenti situazioni (Fig. 10).

Il litorale che versa nelle condizioni peggiori resta quello compreso tra la foce del Savio e Porto Garibaldi (M4 e M5, ~40 km). In questa zona nel periodo 2000-2006 sono stati portati a ripascimento circa 900.000 m³ di sabbia che non hanno determinato sostanziali cambiamenti.

Diversamente invece, il tratto di litorale compreso tra Cattolica e Cesenatico (M1 e M2, ~40 km) è quello che presenta il maggior numero di chilometri di spiagge in accumulo. Non a caso nel periodo in esame su questa porzione di litorale sono stati portati circa 1,5 milioni di m³ di sabbia. Altre due zone in buono stato sono quelle comprese tra Cesenatico e Foce Savio (M3) e tra Porto Garibaldi e la foce del Po di Volano (M6) dove si rileva il maggior numero di spiagge stabili. Anche in questo caso, il miglioramento è stato determinato dagli interventi di ripascimento: circa 1 milione di m³ di sabbia apportati nel periodo di indagine.

Alla luce di quanto sopra espresso la valutazione degli effetti prodotti sul litorale dagli interventi di difesa (ripascimenti e/o costruzione o manutenzione di opere rigide) realizzati dalla Regione nel periodo 2000-2006 è risultata senza dubbio positiva (Fig. 11).

Nel periodo in esame sono stati effettuati prevalentemente ripascimenti e in totale sono stati oggetto di intervento di vario tipo circa 47 km di costa.

Su 38 km di litorale gli interventi hanno avuto effetti positivi e solo su circa 9 km di costa il ripascimento e/o l'opera realizzata non hanno migliorato la situazione.

Analizzando le situazioni di ciascuna macrocella emerge che i migliori risultati sono stati ottenuti nei tratti di costa tra Porto Garibaldi e la Foce del Po di Volano e tra Rimini e Cesenatico (M6 e M2). Risultano soddisfacenti anche gli effetti degli interventi nei tratti tra Cattolica e Rimini, tra Cesenatico e la Foce del Savio e tra Porto Corsini e Porto Garibaldi (M1, M3, M5).

Appare invece necessario rivedere la difesa del litorale compreso tra la Foce del Savio e Porto Corsini (M4) dove, rispetto a un totale di circa 6 km di spiagge oggetto di intervento, su 4 km di costa non sono stati ottenuti miglioramenti significativi.

Un bilancio questo molto positivo che dimostra come le politiche di protezione della costa adottate dalla Regione Emilia-Romagna, orientate prevalentemente verso l'utilizzo del ripascimento, siano state senza dubbio ben indirizzate.

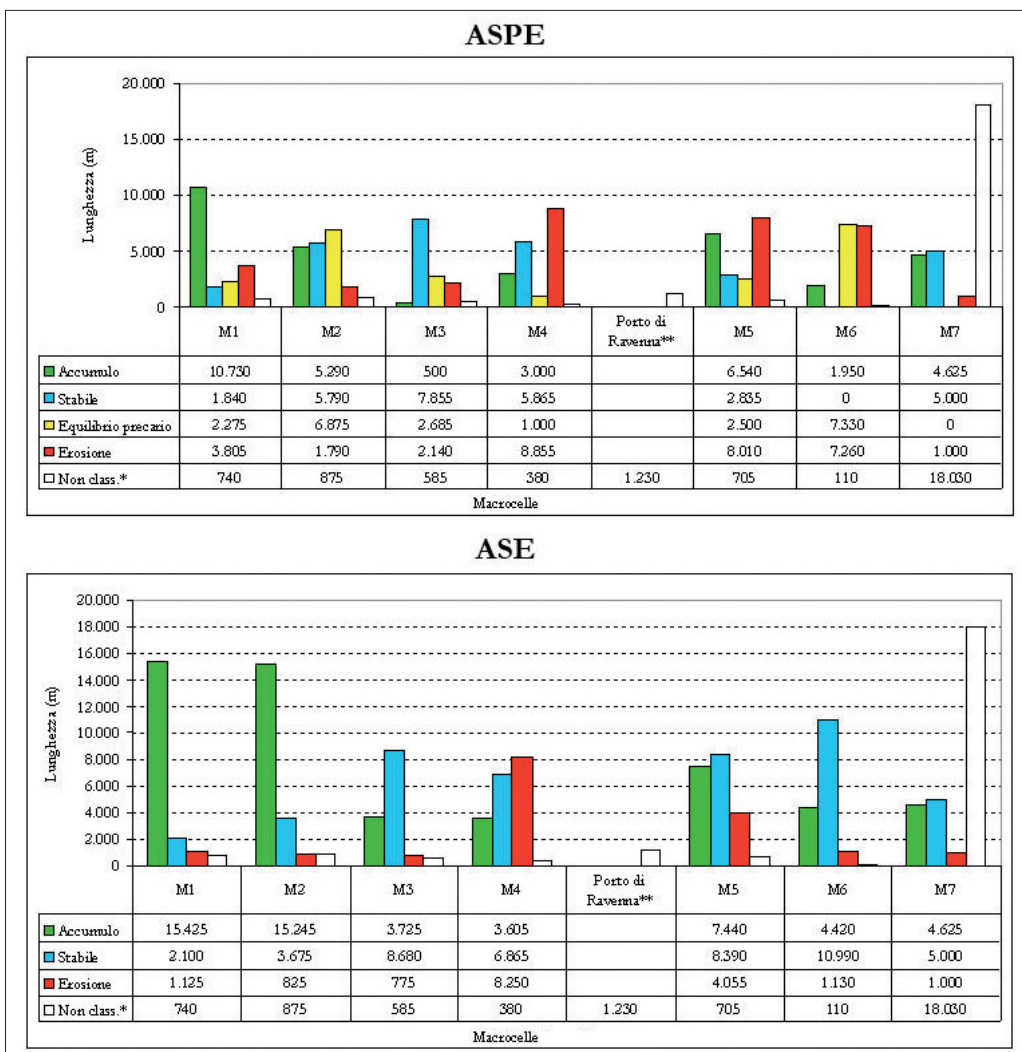


Figura 10 - Dettaglio per macrocella (vedi Fig. 1) dello stato del litorale emiliano-romagnolo in base agli indicatori ASPE e ASE.

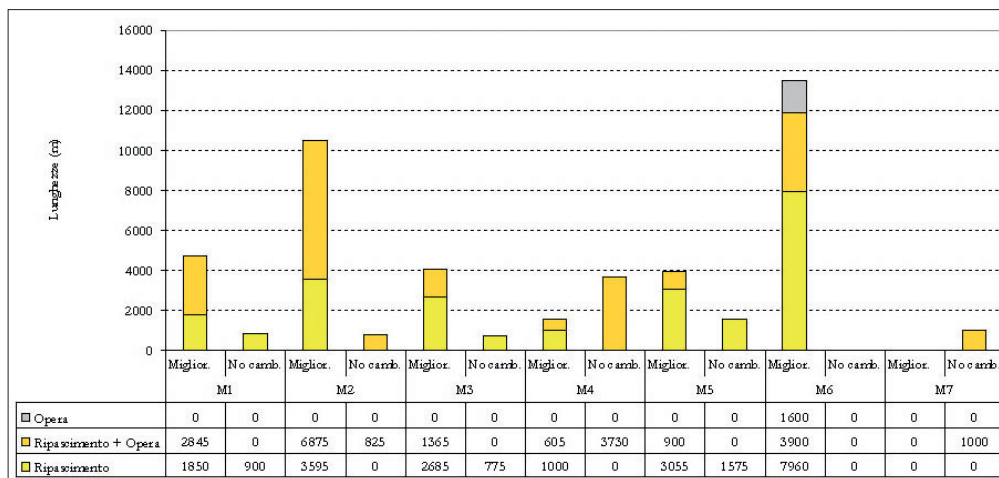


Figura 11 - Valutazioni degli effetti prodotti dagli interventi di fesa realizzati tra il 2000 e il 2006 sul litorale emiliano-romagnolo. Dettaglio per macrocella (vedi Fig. 1).

Conclusioni

La metodologia di analisi integrata tramite indicatori presentata in questo articolo è stata messa a punto su dati riferiti al periodo 2000-2006 già validati ed elaborati con approccio tradizionale nell'ambito dello studio del litorale regionale di Preti et al. (2008).

Questi indicatori basati sul modello DPSIR permettono di portare a sintesi e sistematizzare la grande quantità di dati che nel suddetto volume viene trattata nel dettaglio.

Essi sono stati ideati allo scopo di contribuire alla creazione di uno strumento di rapida applicazione utile per la gestione del litorale emiliano-romagnolo condiviso da tutti i servizi regionali che operano sulla costa. L'indicatore ASPE, ad esempio, fa già parte del database gestionale del litorale regionale SICELL (AAVV, 2011) in fase di sperimentazione presso la Regione Emilia-Romagna.

Non appena saranno disponibili i dati relativi all'ultima campagna regionale topo-batimetrica realizzata all'inizio del 2012, si procederà a un'ulteriore verifica degli indicatori anche su questo nuovo set di dati.

Affinché in futuro si possa applicare questo approccio alla gestione del litorale emiliano-romagnolo sarà necessario che, come dal 1983 a oggi, la Regione continui a rilevare le forme della costa con cadenza regolare (almeno ogni 5-6 anni) tramite le reti di monitoraggio della costa, fonti indispensabili di dati per questa e per qualsiasi altra tipologia di studio della fascia costiera.

Questo metodo, per ora messo a punto e testato su un litorale tra i più studiati in Italia, potrebbe essere applicato con adeguati adattamenti alle differenti realtà costiere di altre regioni.

Bibliografia

- AA.VV. (2011) - *Regional policies and littoral management practices. Report phase A Component 4*. Montanari R. e Marasmi C. (a cura di). Territorial action plans for coastal protection and management. Eu project Coastance.
- AA.VV. (2011) - *Definition of sediment management plans elements. Report phase B Component 4*. Montanari R. e Marasmi C. (a cura di). Territorial action plans for coastal protection and management. Eu project Coastance.
- AA.VV. (2011) - SICELL - Nuovi strumenti di gestione dei litorali in Emilia-Romagna. Montanari e Marasmi (a cura di). Regione Emilia-Romagna.
- AA.VV. (2012) - *Formulation of territorial action plans for coastal protection and management. Final report phase C Component 4*. Montanari R. e Marasmi C. (a cura di). Territorial action plans for coastal protection and management. Eu project Coastance.
- Alfsen K.H., Saebo H.V. (1993) - *Environmental quality indicators: background principles and examples from Norway*. Environmental and Resource Economics, 3.
- Arpa Emilia-Romagna (2010) - *Erosione Costiera*. Annuario regionale dei dati ambientali Edizione 2009.
- Arpa Emilia-Romagna (2011) - *Erosione Costiera*. Annuario regionale dei dati ambientali Edizione 2010.
- Arpa Emilia-Romagna (2012) - *Erosione Costiera*. Annuario regionale dei dati ambientali Edizione 2011.
- Cirillo M.C., La Sala E., Palma D. (1995)- *Indicatori e risanamento ambientale: problemi locali e problemi globali*. Working paper, ENEA.
- Barbano A. (2011) - Il sistema informativo geografico costiero ISPRA Coast Expo Ferrara 28 Settembre 2011.
- Berger A.R. e Iams W.J.(1996) - *Geoindicators. Assessing Rapid Environmental Changes in Earth System*. Rotherdam, Brookfield: A.A.Balkema.
- Boak E.H. e Tuner I.L. (2005) - *Shoreline definition and detection: a review*. Journal of Coastal Research, 21 (4): 688-703.
- Calabrese L. e Lorito S. (2009) - *Mappatura della linea di riva da foto aerea*. Il sistema mare-costa dell'Emilia-Romagna Perini L. e Calabrese L. (a cura di). Regione Emilia-Romagna
- Correggiari A., Aguzzi M., Remia A. e Preti M. (2011) - *Caratterizzazione sedimentologica e stratigrafica di giacimenti sabbiosi in Mare Adriatico settentrionale finalizzata all'individuazione delle aree di prelievo*. Studi costieri, 19: 11-31.
- Dolan R., Hayden B.P., May P. e May S. (1980) - *The reliability of shoreline change measurements from aerial photographs*. Shore and beach, 48, 10: 22-29.
- Doody P., Ferriera M., Lombardo S., Lucius I., Misdorp R., Niesing H., Salman A., Smallegange M., Cipria-

- ni L.E., Lanza S., Pranzini E., Randazzo G. (2007) - *Risultati dello studio EuroSION. Sedimenti e spazio per la sostenibilità*. Vivere con l'erosione costiera in Europa.
- EC (2006). Maritime Facts and Figures http://ec.europa.eu/maritimeaffairs/pdf/facts_fig_en_bat_060523.pdf (accessed 27 September 2010).
- EUROSION (2004a) - *Part II Maps and statistics*. Living with coastal erosion in Europe: Sediment and space for Sustainability.
- EUROSION (2004b) - *Part III Methodology for assessing regional indicators*. Living with coastal erosion in Europe: Sediment and space for Sustainability.
- GNRAC (2006) - *Lo stato dei litorali italiani*. Studi Costieri, 10, pp.176.
- IDROSER Spa (1981) - *Piano progettuale per la difesa della costa adriatica Emiliano-Romagnola. Relazione Generale*, pp. 388.
- IDROSER Spa (1996) - *Progetto di piano per la difesa dal mare e la riqualificazione ambientale del litorale della Regione Emilia-Romagna., Relazione generale*, pp. 365.
- Kraus N.C. e Rosati J.T. (1997) - *Interpretation of shoreline position data for coastal engineering analysis*. CTN-II-39, U.S. Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg, MS.
- ISPRA (2008) - *Ambito Costiero*. Vademecum Annuario dei dati ambientali 2008.
- Li R., Di K. E Ma R. (2001) - *A comparative study of shore line mapping techniques*. The 4th International Symposium on computer mapping and GIS for coastal zones management, Halifax, Nova Scotia, Canada, June 18-20, 2001.
- Preti M. (2002) - *Ripascimento di spiagge con sabbie sottomarine in Emilia-Romagna*. Studi Costieri, 5: 107-135.
- Preti M., De Nigris N., Morelli M., Monti M., Bonsignore F., Aguzzi M. (2008) - *Stato del litorale emiliano-romagnolo all'anno 2007 e piano decennale di gestione*. I Quaderni di ARPA.
- Preti M., De Nigris N., Morelli M. (2011) - *Il monitoraggio delle spiagge nel periodo 2002-2005*. Studi costieri, 19: 35-87.
- Preti M., Aguzzi M. Costantino R., De Nigris N. e Morelli M. (2011) - *Il monitoraggio delle spiagge nel periodo 2007-2009*. Studi costieri, 19: 137-198.
- Milli M. e Surace L. (2011) - *Le linee della costa. Defnizioni, riferimenti altimetrici e modalità di acquisizione dati*. Alinea Editrice. Pp. 79.
- OEDC (1994) - OEDC Environmental Indicators, Paris.
- Preti M., De Nigris N., Morelli M., Monti M., Bonsignore F., Aguzzi M. (2008) - *Stato del litorale emiliano-romagnolo all'anno 2007 e piano decennale di gestione*. I Quaderni di ARPA.
- Scherp J. (1994) - *What does an economist need to do know about environment?* Economic Papers 107, European Commission, Brussels.
- Regione Emilia-Romagna (2009) - *Il sistema mare-costa in Emilia-Romagna*. Perini L. e Calabrese L. (a cura di).
- Sutherland J. (2010) - *Guidelines on beach monitorino for coastal erosion*. Deliverable number D15. Conscience.
- Van Rijn L. (2010) - *Description of coastal state indicators*. Deliverable number D9. Conscience.

Webgrafia

- <http://ec.europa.eu/environment/iczm/ourcoast.htm>
www.beachmed.it
www.coastance.eu
www.conscience-eu.net
www.deduce.eu
www.euroSION.org

Ricevuto il 07/05/2012, accettato il 27/07/2012.

RemTech Expo - Giornata Giovani GNRAC

Care Lettrici e cari Lettori di Studi Costieri,

anche per l'evento G3-2011 abbiamo avuto un'ottima partecipazione di giovani soci, che hanno presentato le loro ricerche, e di spettatori interessati, che hanno assistito agli interventi.

Il premio "Miglior presentazione G3", appuntamento annuale di riferimento per la comunità, in questa edizione è stato assegnato al socio Ing. Pasquale Contestabile.

L'incontro ha anche fornito l'occasione per lanciare una nuova iniziativa: la "Lista costa GNRAC". Paragonabile alla già conosciuta "Coastal List" mondiale, questa mailing-list è in italiano ed è rivolta a tutti i portatori di interesse, soci e non soci del GNRAC. Alcune interessanti discussioni sono già attive e invitiamo tutti ad unirsi, per partecipare attivamente o tenersi informati; si possono trovare maggiori informazioni sul nostro sito web: www.gnrac.unifi.it.

Vi lasciamo con il piacere di leggere le prossime pagine che contengono una sintesi di tutti i lavori presentati e vi diamo appuntamento al prossimo G3-2012!

Per il GNRAC
Lorenzo Cappiotti

Idro-morfodinamica di una spiaggia sottoposta a mareggiate caratterizzate da differente raggruppamento delle onde: esperimenti in larga scala

Pasquale Contestabile

Seconda Università di Napoli, Italy. E-mail: pasquale.contestabile@unina2.it

Sommario

La zona di battigia presenta un delicato equilibrio idro-morfodinamico, per cui a modeste variazioni delle condizioni idrodinamiche al contorno possono corrispondere sensibili effetti morfologici. Negli ultimi anni si sono osservati grandi progressi per quanto concerne la modellazione del trasporto sedimentario in questa regione. Tuttavia, molti elementi concettuali sono ben lontani dall'essere nitidamente definiti e, certamente, misurazioni di campo risultano alquanto complesse e perturbate. In un quadro siffatto appare evidente come disporre di dati di alta qualità ottenuti in condizioni controllate, giochi un ruolo cruciale. Il presente articolo descrive gli esperimenti condotti presso il canale a larga scala dell'Università Politecnica della Catalogna. L'obiettivo era studiare la risposta di una spiaggia a mareggiate caratterizzate da differente raggruppamento delle onde.

Parole chiave: onde lunghe, gruppi d'onda, fattore di raggruppamento, idro-morfodinamica di spiaggia, zona di swash, zona di surf, barra longitudinale.

Introduzione

La zona di battigia (meglio nota in letteratura come swash zone) è la porzione di spiaggia alternativamente sommersa dall'acqua durante la fase di risalita dell'onda ed esposta all'aria dalla successiva ridiscesa. E' caratterizzata da un delicato equilibrio idro-morfodinamico, per cui a modeste variazioni delle condizioni al contorno possono corrispondere sensibili effetti morfologici (Contestabile, 2011). Appare ormai chiaro che l'idro-morfodinamica della spiaggia è legata sia a movimenti ondosi infra-gravitazionali di bassa frequenza, sia a fenomeni di vorticità e collisioni di breve periodo sulla linea di riva (Brocchini e Peregrine, 1996). I due meccanismi non sembrano escludersi a vicenda ma piuttosto, pur essendo entrambi presenti, l'uno domina l'altro, a seconda dello stato di mare e della pendenza di spiaggia. Recentemente, Holland e Puleo (2001) hanno dimostrato che la presenza o l'assenza di collisioni potrebbe descrivere la tendenza all'accumulo o all'erosione (altresì suggerito dalle osservazioni di Kemp, 1975). Difatti, su litorali caratterizzati da tempi di runup-rundown superiori al periodo dell'onda incidente, è probabile che si realizzi un irripidimento della spiaggia. Viceversa, lì dove i cicli di swash hanno durata simile o addirittura inferiore al periodo d'onda, è atteso il verificarsi di un'azione erosiva tesa all'appiattimento del profilo di spiaggia.

Allo stato attuale, l'azione delle onde corte è da considerarsi sufficientemente inquadrata in termini idro-morfodinamici mentre quella delle onde a bassa frequenza è ancora sottovalutata.

Le onde corte possono contribuire mediante oscillazioni ad alta e bassa frequenza (Elgar et al., 1992; Herbers et al., 1995a; Ruessink, 1998). Nel primo caso, queste sono il risultato delle dissipazioni energetiche nella surf zone che portano alla generazione di componenti oscillatorie con frequenza confrontabile con quella delle stesse onde incidenti. Nel caso delle oscillazioni a bassa frequenza, possono essere distinte almeno due componenti principali relative:

- 1) al raggruppamento di onde, legate cioè alle variazioni del punto di frangimento dovute alla differente altezza delle onde nel gruppo (Baldock e Holmes, 1999; Shah and Kamphuis, 1996);
- 2) componenti di interazioni di swash, dovute cioè alle interazioni tra successivi uprush/backwash (Carlson, 1984; Erikson et al., 2006) e/o sovrapposizione/cattura di successive collisioni di breve periodo sulla linea di riva (Bradshaw, 1982).

Le onde incidenti lunghe, d'altra parte, sono generalmente riflesse e pertanto il loro contributo si manifesta come una componente oscillatoria stazionaria (Huntley, 1976; Suhayda, 1974, Butt et al., 2005). La presenza di tale componente stazionaria rende difficile determinare se e quanto ulteriori onde a bassa frequenza sono generate entro la swash zone stessa. Le osservazioni sperimentali condotte da Baldock e Huntley, 2002 e Battjes et al., 2004, nonché le conclusioni tratte da Watson et al., 1994, recentemente rielaborate da Brocchini e Baldock (2008), sembrano suggerire che la generazione di onde lunghe nella swash zone è correlata alla presenza di gruppi di onde molto corti (in genere poco probabili).

Senza dubbio, una delle caratteristiche essenziali della swash zone è la capacità di operare come filtro passa basso: le onde incidenti di maggior intensità inglobano quelle più piccole con la conseguente riduzione in frequenza del segnale ondoso uscente dalla swash zone. Questo meccanismo è capace di influenzare il trasporto dei sedimenti in quanto interviene nella relazione di fase anche per le onde corte: l'ondulazione della superficie libera, infatti, comporta la modificazione in ampiezza delle onde corte, con possibilità di frangimento in differenti posizioni della spiaggia. Inoltre, le onde lunghe da un lato incrementano l'avvezione dei sedimenti in sospensione, dall'altro inducono una profonda modificazione dello strato limite, intervenendo così anche sul trasporto di fondo.

Sebbene la maggior parte del trasporto dei sedimenti è indotto da onde corte e da meccanismi ad esse direttamente riconducibili (ad esempio le associate correnti di ritorno), tuttavia l'evoluzione morfologica dipende dai tassi di trasporto netto. Con particolare riferimento ai flussi di uprush e backwash nella swash zone ma, *mutatis mutandis*, opportunamente riferibile anche alle idrodinamiche della Surf Zone, Masselink e Puleo (2006) conclusero che il trasporto netto è il risultato della piccola differenza tra due grandi quantità.

Nell'ambito delle scale temporali delle onde lunghe e dei gruppi d'onde, questi tassi di trasporto onshore e offshore subiscono modifiche lievi, motivo per il quale, la loro influenza è stata sottovalutata. In realtà, per quanto detto sinora, siccome l'entità del trasporto sedimentario legato ad onde corte ed undertow è, in generale, simile ma di segno opposto (Ruessink et al., 2008), la dinamica dei sedimenti legata alle onde lunghe (libere o confinate ai gruppi d'onda) acquista, paradossalmente, una importanza relativa maggiore. Ad oggi, l'investigazione sperimentale diretta del ruolo delle onde lunghe e dei gruppi d'onda è stata limitata. Qualche studio ha interessato l'influenza di gruppi d'onda in acque alte (per esempio Baldock et al., 1996 e Johannessen and Swan, 2001), ma nessuno si è interessato all'ambiente costiero. In campo, come proposto da Symonds and Bowen (1984) ed osservato da Michallet et al. (2007), la struttura dell'onda lunga potrebbe essere determinata dalla morfologia a causa degli intesi processi di feedback idro-morfodinamici (vedi anche Aagaard, 1990; Aagaard et al., 1994). Evidentemente, non essendo disponibile un confronto con una morfologia senza onda lunga, è difficile apprezzarne appieno gli effetti, effetti che comunque sono stimati importanti soprattutto su larghe scale spazio-temporali (Plant et al., 2004; Brocchini e Baldock, 2008).

Goda (1975) suggerisce che l'interazione tra onde lunghe e corte induce alla desaturazione della zona di surf alle frequenze delle onde corte. Queste, in particolare, possono influenzare le onde libere (lunghe) in diversi modi, quali dissipazioni energetiche mediante turbolenza, cambi di fase dovuti alla variazione del set-up e alla modifica della riflettività della linea di riva.

Esperimenti in piccola scala su una spiaggia a forte pendenza condotti da Baldock et al. (1997) mostrano come il movimento della linea di riva appaia modulato sulla frequenza di raggruppamento delle onde incidenti.

Dunque, seppure siano stati intuiti gli effetti delle singole onde lunghe in termini idrodinamici e di movimento della linea di riva, poco si sa delle interazioni tra onde lunghe libere (free long waves) e confinate associate ai gruppi d'onda (bound waves) e le relative dinamiche nella swash zone. La complessità del problema ha suggerito la necessità di ottenere ed operare su dati acquisiti mediante investigazioni di laboratorio di alta qualità. Gli esperimenti a larga scala sono stati condotti presso il Laboratorio di Ingegneria Marittima (LIM) dell'Università Politecnica della Catalogna (Barcellona), svolti nel periodo Luglio-Ottobre 2009. Il progetto, dal titolo: "SUSCO: Swash zone response Under grouping Storm COnditions", coordinato dal Dott. Diego Vicinanza, è stato finanziato dall'Unione Europea nell'ambito del 6° Programma Quadro "HYDRALAB III.

Quest'articolo fornisce i principali risultati morfodinamici delle simulazioni delle mareggiate ad alta energia (test di tipo Erosivo).

Durante le prove sperimentali è stata attentamente monitorata l'idrodinamica nella swash zone e la risposta morfologica della spiaggia sottoposta a condizioni di differente raggruppamento delle onde all'interno della mareggiata.

Il set up sperimentale

L'indagine sperimentale in larga scala è stata condotta presso il canale ondogeno dei Laboratori di Ingegneria Marittima dell'Università Politecnica della Catalogna (UPC). Il canale ha una lunghezza di 100 m, una larghezza di 3 m ed una profondità di 5 m. La generazione di onde regolari e irregolari è controllata ed ottenuta tramite un generatore "a cuneo" particolarmente indicato per le profondità intermedie. Rispetto al fondo del canale, il tirante idrico era di 2.5 m. Per la realizzazione del fondale si è impiegata una sabbia media con diametro caratteristico (d_{50}) pari a 246 μ m ed una velocità di caduta di 34 mm/s). Il profilo di spiaggia si mantiene orizzontale per circa 45 m a partire dal generatore, assumendo poi inclinazione costante 1:15 per tutto il resto del canale.

Il programma delle prove è caratterizzato da due differenti livelli energetici che, sulla base dei macro-effetti morfologici previsti, furono definiti "Erosivo" ed "Accumulativo". Nell'ambito di tali livelli energetici sono state sviluppate sette diverse tipologie di onde, per un totale di quattordici condizioni ondose simulate. Questo articolo riferisce ai soli test ad alta energia. In particolare, così come riportato in Tabella 1, sono stati condotti:

n° 1 test con onda regolare monocromatica (nel seguito denominato M_E);

n° 2 test con combinazioni di onde libere lunghe e onde monocromatiche corte che differiscono essenzialmente per il periodo dell'onda lunga (nel seguito definiti C_E1 e C_E2);

n° 2 test con onde bicromatiche, caratterizzate da differente sfasamento delle componenti (B_E1 e B_E2);

n° 2 test con onde irregolari, caratterizzate da differente fattore di raggruppamento (R_E1 e R_E2).

Onde random con differente fattore di raggruppamento delle onde (GF) possono ottenersi attraverso la correlazione delle fasi: un'alta correlazione porta ad alti raggruppamenti e viceversa. Diverse sono le definizioni e i modi di computare tale fattore come diversi sono le tecniche per la generazione di gruppi d'onda (Longuet-Higgins, 1974), Rapp e Melville, 1990, Baldock et al., 1996, Barnes, 1996, Johannessen e Swan, 2001). In questi esperimenti, il fattore di raggruppamento è stato calcolato mediante la trasformata di Hilbert al fine di ottenere la deviazione standard della curva di involuppo spettrale $E(t)$ e la varianza della serie temporale del profilo d'onda $\sigma^2[\eta(t)]$ come proposto da Hald (1995). Il fattore di raggruppamento è pertanto definito come:

$$GF = \frac{\sigma[E(t)]}{\sigma^2[\eta(t)]} \quad (1)$$

Un approccio tipico nella generazione di onde irregolari è quello di operare su fasi random non correlate che, mediamente, portano a un fattore di raggruppamento pari ad 1, con una deviazione standard, nel caso di pacchetti di 500 onde, approssimativamente pari a 0.13. Valori più alti di GF possono essere ottenuti esclusivamente correlando le fasi. In questo studio, la correlazione delle fasi (θ) avviene imponendo il profilo d'onda e il corrispondente movimento del battitore (mediante la funzione di trasferimento proposta da Biesel), ovvero:

$$\eta(x=0, t) = \sum_{i=1}^N a_i \cdot \cos(\omega_i t - k_i x + \theta_i) \quad (2)$$

$$\theta_i = (1 - p) \cdot 2\pi \cdot \varphi_i + p \cdot \theta_{i-1} \quad (3)$$

dove a_i sono le ampiezze d'onda, ω è la frequenza angolare, t è il tempo, k è il numero d'onda, x è la distanza dal generatore, φ è una variabile uniformemente distribuita da 0 a 1 e $p > 0$ fornisce le fasi correlate. GF è variabile lungo il canale e pertanto il termine kx è importante in vista della ricerca del più alto valore di GF . Nello specifico k è approssimativamente quella ottenuta mediante l'equazione di dispersione lineare imponendo il tirante idrico al generatore, mentre ad x è stato imposto il valore di 50 (circa metà lunghezza del canale). In definitiva i valori di fattore di raggruppamento (teorici) riportati in Tabella 1 sono ottenuti rispettivamente per $p = 0.0$ e $p = 0.2$.

In generale, il raggruppamento delle onde è una caratteristica stimabile per qualunque stato di mare. Pertanto, nel seguito, si riferirà di raggruppamento delle onde anche in merito alle altre condizioni ondose simulate, e

non esclusivamente per caratterizzare le onde random.

Allo scopo di rendere pienamente consistente il confronto tra i diversi risultati morfologici ed idrodinamici, al termine di ogni prova è stato ricostituito il profilo di spiaggia originale mediante rimodellamento manuale. I test sono costituiti da 4 fasi di differente durata, scandite dalla misurazione del profilo longitudinale: la prima e seconda di 30 minuti mentre la terza e quarta di un'ora, in modo da poter monitorare opportunamente le modifiche morfologiche, attese più veloci all'inizio del test stesso.

Il set up dettagliato, la strumentazione e la descrizione completa dei test sono riportati in Vicinanza et al., (2009) e Vicinanza et al., (2010).

Tabella 1 - Caratteristiche ondose.

Condizioni Erosive				
Test	H_{m0}	T_p	Tipologia	$H_{\beta}/H_{\beta,max}$
	[m]	[s]		[-]
M_E	0.4	3.7	Monocromatica	0.86
C_E1	0.5	3.7	Combinazione	0.66
	0.023	29.25		
C_E2	0.41	3.7	Combinazione	0.75
	0.011	15.1		
B_E1	0.29	3.5	Bicromatica	0.91
	0.29	3.9		
B_E2	0.34	3.1	Bicromatica	1
	0.34	4.3		
R_E1	0.45	4.2	Random $GF=1$	0.73
	0.06	22.5		
R_E2	0.46	4.2	Random $GF=1.1$	0.57
	0.06	22.7		

Risultati Morfologici

A parità di flusso medio di energia le onde bicromatiche hanno mostrato maggior erosione delle equivalenti onde monocromatiche. Ciò è evidenziato confrontando il profilo iniziale relativo all'onda monocromatica (M_E_0) con i finali (M_E_4, B_E1_4, B_E2_4) in Figura 1a. Per le condizioni bicromatiche si registra, in particolare, un ampliarsi della regione spaziale soggetta ad evoluzione morfologica (creazione di due barre sommerse) in funzione della separazione in frequenza tra i due modi che generano l'onda. Dunque, al diminuire dello sfasamento tra le frequenze delle componenti, ovvero passando da B_E2 a B_E1, è associato un più intenso trasporto offshore. Infatti, la condizione a lieve differenza delle componenti, B_E1, interviene con vigore nella parte più offshore del dominio (provvedendo a generare una barra notevole); la B_E2, invece, produce un'erosione generalizzata nella parte intermedia di spiaggia, con materiale che da un lato è impiegato alla creazione di una barra, mentre dall'altra produce una berma di riva. In entrambi i casi si assiste ad un irripidimento della zona di swash.

Analizzando in dettaglio la morfodinamica dell'onda monocromatica M_E (Fig. 1a) si nota come questa sembri produrre una movimentazione dei sedimenti quasi esclusivamente riconducibile ad una singola ondulazione, ovvero caratterizzata da un significativo scavo ed un altrettanto importante accumulo (barra) localizzati intorno alla progressiva $X = 72$ m. Ciò è dovuto alla regolarità delle onde che producono un trasporto solido perlopiù localizzato ad una determinata distanza da riva e non distribuito su gran parte della spiaggia sommersa, come evidenziato dai risultati degli altri test. Sembra che si verifichi, insomma, un comportamento qualitativamente simile a quello evidenziato da Sumer e Fredsøe (2000) relativamente allo scavo prodotto da onde regolari riflesse da muri a parete verticale e scogliere sommerse, per i quali accumulo/erosione di sedimenti avvengono in funzione della posizione dei nodi/antinodi dell'onda stazionaria ottenuta per riflessione dell'onda incidente. Considerando il caso C_E2 (Fig. 1b), risultante delle combinazioni di onde monocromatiche corte (praticamente quelle del test M_E) ed onde con periodo di 15 secondi, viene suggerito che l'effetto delle onde lunghe è,

sostanzialmente, quello di ampliare la regione dove avviene il trasporto sedimentario, senza tuttavia stravolgere i principali caratteri morfologici dunque dettati dall'onda regolare. Tuttavia, la barra è leggermente spostata verso largo e la piccola berma di riva è costruita più in alto, indicando che le influenze sui processi di trasporto non sono trascurabili e gli effetti morfologici potrebbero essere più evidenti se l'osservazione venisse protesa nel tempo.

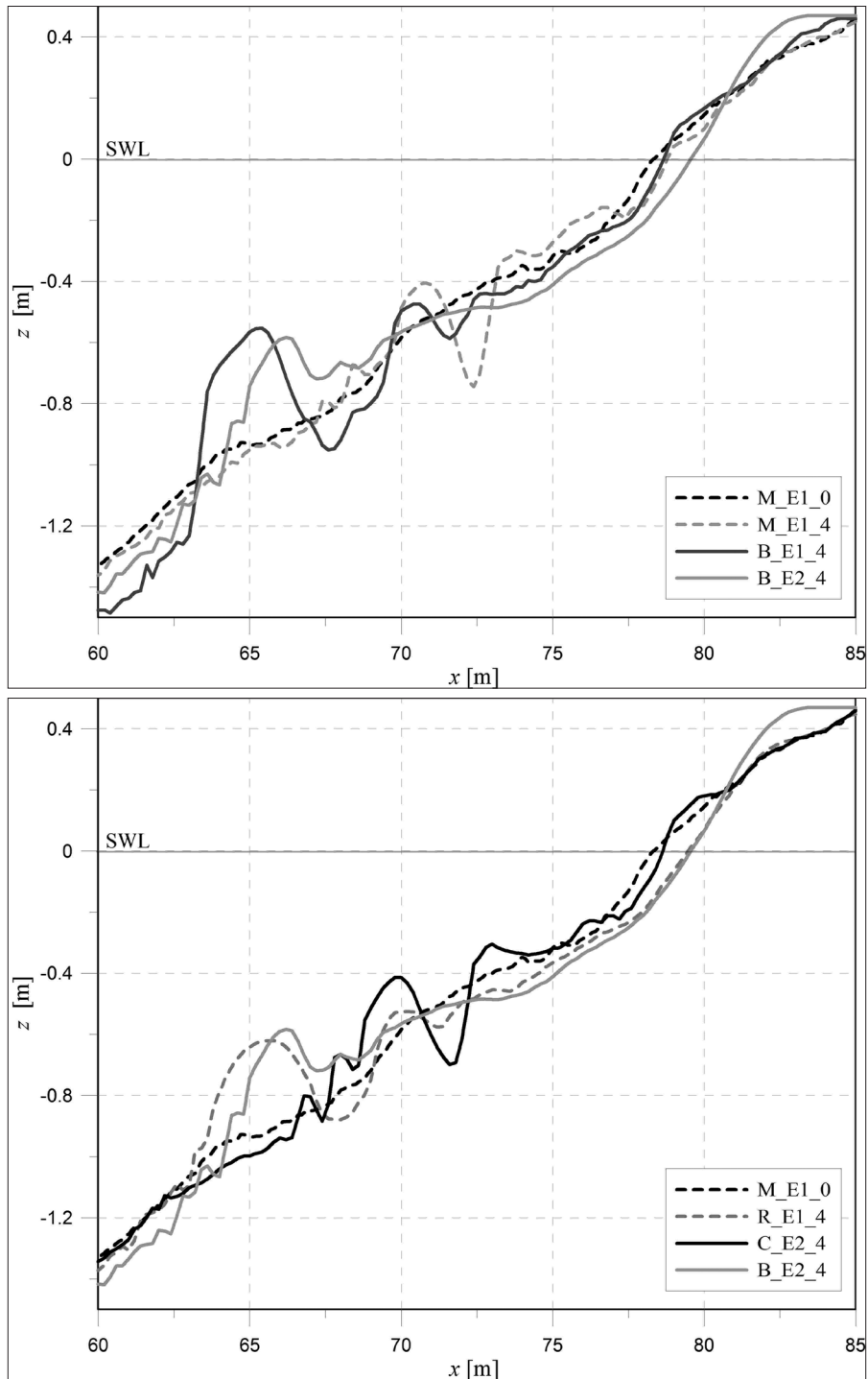


Figura 1 - Confronto tra profili di spiaggia: a) test M_E, B_Ea e B_E2; b) test R_E1, C_E2 e B_E2.

Il fattore di raggruppamento delle onde random sembra mostrare effetti simili a quelli provocati dalla separazione in frequenza delle componenti delle onde bicromatiche. Le onde random con $GF = 1$ (R_E1), infatti, comportano modifiche al profilo di spiaggia molto simili a quelle delle bicromatiche B_E2 (Fig. 1b). La buona coerenza tra i risultati degli esperimenti bicromatici e random dà confidenza nei dati.

Discussione e Conclusioni

La grande variabilità del profilo di spiaggia evinta in Figura 1 rappresenta, di per se, un risultato notevole. Infatti non è da dimenticare che tali risposte morfologiche avvengono a parità di condizioni di spiaggia iniziali ed a parità di contenuto energetico e pertanto si evidenzia chiaramente la sensibilità della spiaggia al differente modo in cui sono raggruppate le onde. Ciò conferma, tra l'altro, che il livello energetico medio delle onde non assume un ruolo esclusivo o preponderante nella regolazione della morfologia costiera.

Una spiegazione euristica di tale comportamento può trarsi dal modo in cui le onde all'interno di un gruppo interagiscono l'una con l'altra durante il frangimento. In Tabella 1 sono riportati i valori delle altezze H_{β} delle "bore" vale a dire delle onde generate post-frangimento, adimensionalizzate rispetto al massimo valore $H_{\beta,max}$ misurato nei test, ovvero relativo al caso B_E2. Si nota che nonostante il livello energetico sia uguale per tutte le condizioni ondose, gli effetti del raggruppamento sulla idrodinamica sono considerevoli. Assumendo il trasporto sedimentario come funzione di u^3 e H^3 , appare evidente che sono le onde più alte che dominano il processo di trasporto. I maggior valori di H_{β} misurati per le onde bicromatiche, dunque, provvedono una plausibile spiegazione dei più alti tassi di trasporto rilevati. In definitiva i dati dimostrano che l'aumento delle differenze nelle componenti spettrali dell'onda attraverso perturbazioni delle onde monocromatiche con le onde lunghe, o ampliando la larghezza della banda in gruppi d'onda bicromatici, o diminuendo il fattore di raggruppamento in onde random, promuove lo spostamento delle forme di fondo, in particolare della barra e della berma di riva. Ulteriori significativi aspetti dei risultati morfodinamici ottenuti possono essere tratti nel considerare le onde irregolari. Nell'ambito dei due livelli energetici, le onde random si differenziavano per il solo fattore di raggruppamento. Con lo scopo di fornirne una semplice ed intuitiva immagine, dunque risparmiando sulla rigosità della enunciazione, si può ritenere il GF una misura della consecutività nel dominio del tempo delle onde più energetiche nell'ambito di uno stato di mare. In altre parole, le onde random si differenziavano solo nel dominio del tempo. Infatti, la figura 2a confronta i due spettri di energia calcolati tramite il trasduttore wg3 (posto a 10,7 m dal battitore) per i casi erosivi random, R_E1 e R_E2: solo una lieve discrasia può essere rilevata. Tuttavia, confrontando la loro risposta morfologica, si possono apprezzare differenze significative sullo sviluppo della barra (Fig. 2b). Più in dettaglio, in linea con le osservazioni per i gruppi bicromatici (per i quali, tuttavia,

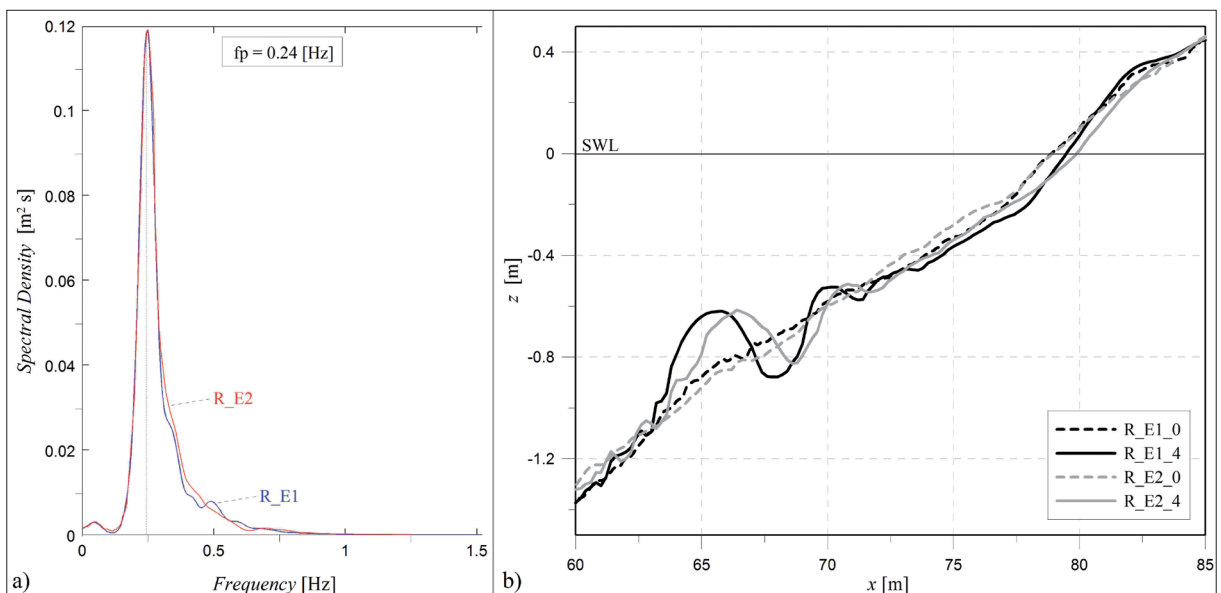


Figura 2 - a) confronto degli spettri d'energia per i casi random; b) confronto tra i profili longitudinali.

gli spettri d'energia erano sostanzialmente diversi tra di loro), le onde irregolari con GF maggiore (R_E2) (analogamente alle bicromatiche a banda stretta) sembrano generare una barra più vicina a riva di quella prodotta dalle onde con GF minore (così come per le bicromatiche a banda più larga). Inoltre, dal punto di vista idrodinamico, il caso R_E2 ha un valore di H_{β} circa 1.3 volte superiore a quello del caso R_E1.

Tali risultati mostrano come la caratterizzazione degli stati di mare in termini di caratteristiche spettrali (cioè nel dominio della frequenza) può essere insufficiente per gli studi idro-morfodinamici. Il risultato può portare a implicazioni rilevanti nella modellazione, giacché le onde irregolari sono di tradizionale impiego nella simulazione di stati di mare reali.

Ciò avvalorava l'idea che il futuro della modellazione a larga scala dovrebbe seguire un approccio ibrido deterministico-probabilistico per tenere conto del runup nel dominio del tempo.

Ringraziamenti

Il lavoro di ricerca svolto presso il Laboratorio di Ingegneria Marittima (LIM) dell'Università Politecnica della Catalogna (UPC), Spagna, dal titolo "SUSCO: Swash zone response Under grouping Storm COnditions", è stato portato a termine nell'ambito del progetto "HYDRALAB III" finanziato dall'Unione Europea nell'ambito del 6° Programma Quadro, numero di contratto 022441 (RII3). L'autore ringrazia gli altri partner del progetto ovvero Diego Vicinanza e Vincenzo Ferrante (Seconda Università di Napoli), Maurizio Brocchini e Matteo Postacchini (Università Politecnica delle Marche), Paolo Ciavola (Università di Ferrara), Tom Baldock e Hannah Power (University of Queensland), Iván Cáceres e José Alsina (UPC), Daniel Conley (University of Plymouth), Thomas Lykke Andersen e Peter Frigaard (Aalborg University), per la proficua collaborazione scientifica.

Bibliografia

- Battjes J. A., H. J. Bakkenes T. T. Janssen e A. R. van Dongeren (2004) - *Shoaling of subharmonic gravity waves*. Journal of Geophysical Research. 109, C02009, doi:10.1029/2003JC001863.
- Baldock T.E., Holmes P., Horn D.P. (1997) - *Low frequency swash motion induced by wave grouping*. Coastal Engineering 32: 197-222.
- Baldock T. E. e D. A. Huntley (2002) - *Long-wave forcing by the breaking of random gravity waves on a beach*. Proceedings of the Royal Society, A, 458: 2177 - 2201.
- Baldock T.E., Holmes P. (1999) - *Simulation and prediction of swash oscillations on a steep beach*. Coastal Eng. 36: 219-242.
- Baldock T. E., Manoonvoravong P. e Kim Son Pham (2010) - *Sediment transport and beach morphodynamics induced by free long waves, bound long waves and wave groups*. Coastal Engineering, 57: 898-916.
- Baldock T.E., Swan C., Taylor P.H. (1996) - *A laboratory study of nonlinear surface waves on water*. Philos. Trans. R. Soc. Lond., A 354: 649-676.
- Barnes T. (1996) - *The generation of low-frequency water waves on beaches*. Ph.D. Thesis, University of Bristol, U.K.
- Bleck M., e H. Oumeraci (2001) - *Wave dampening and spectral evolution at artificial reefs*. Proceedings of the International Symposium on Ocean Wave Measurement and Analysis (WAVES 2001), ASCE, 2: 1062-1071.
- Bradshaw M.P. (1982) - *Bores and swash on natural beaches*. Coastal Studies Unit Technical Report No. 82/4, University of Sydney, 107 pp.
- Brocchini M. e Bellotti G. (2002) - *Integral flow properties of the swash zone and averaging. Part 2. Shoreline boundary conditions for wave-averaged models*. Journal of Fluid Mechanics 458: 269-281.
- Butt T., Russell P., Puleo J., Masselink G. (2005) - *The application of Bagnold-type sediment transport models in the swash zone*. Cont. Shelf Res. 21: 887-895.
- Carlson C. - *Field studies of run-up on dissipative beaches* - paper presented at 19th International Conference of Coastal Engineering, Am. Soc. of Civ. Eng., Reston, Va., 1984
- Contestabile P. (2011) - *Hydrodynamics and morphodynamics in the swash zone: Hydralab III large-scale experiments*. PhD Thesis. Università di Napoli Federico II. http://www.fedoatd-2011.unina.it/view/people/Contestabile_Pasquale.html
- Dean R.G., Chen R., Browder A.E. (1997) - *Full Scale Monitoring Study of a Submerged Breakwater, Palm Beach, Florida, USA*. Coastal Engineering, 29: 291-315.

- Elgar S., Herbers T.H.C., Okiihiro M., Oltman-Shay J., Guza R.T. (1992) - *Observations of infragravity waves*. J. Geophys. Res. 97: 15573–15577.
- Erikson, L., Larson M., Hanson H. (2006) - *Prediction of swash motion and run-up including the effects of swash interaction*. Coast. Eng. 52: 285–302.
- Goda Y. (1975) - *Irregular wave deformation in the surf zone*. Coastal Eng. Jpn., JSCE 18: 13–26.
- Herbers T.H.C., Elgar S., Guza R.T. (1995a) - *Generation and propagation of infragravity waves*. J. Geophys. Res. 100, 24863–24872
- Holland K.T. e Puleo J.A. (2001) - *Variable swash motions associated with foreshore profile change*. Journal of Geophysical Research 106, pp. 4613-4623.
- Huntley D. - *Long period waves on a natural beach*. J. Geophys. Res., 81: 6441–6449, 1976.
- Johannessen T., Swan C. (2001) - *A laboratory study of the focusing of transient and directionally spread surface water waves*. Proc. R. Soc. Lond., A 457: 971–1006.
- Kemp P.H. (1975) - *Wave asymmetry in the nearshore zone and breaker area*. In: Hails, J., Carr, A. (Eds.), Near-shore Sediment Dynamics and Sedimentation. Wiley-Interscience, London, pp. 47-67.
- Longuet-Higgins M.S. (1974) - *Breaking waves in deep or shallow water*. Proc. 10th Conf. On Naval Hydrodynamics, Cambridge, MA, USA, pp. 597–605.
- Masselink G., Puleo J. A., (2006) - *Swash-zone morphodynamics*. Continental Shelf Research 26: 661-680.
- Plant N. G., Holland K. T., Puleo J. A. e Gallagher E. L. (2004) - *Prediction skill of nearshore profile evolution models*. Journal of Geophysical Research. 109: C01006.
- Puleo J.A., Holland K.T. (2001) - *Estimating swash zone friction coefficients on a sandy beach*. Coastal Engineering 43: 25-40.
- Rapp R.J., Melville W.K. (1990) - *Laboratory measurements for deep water breaking waves*. Philos. Trans. R. Soc. Lond., A 331: 735–800.
- Ruessink B.G., Houwman K.T. e Hoekstra P. (1998) - *The systematic contribution of transporting mechanisms to the cross-shore sediment transport in water depths of 3 to 9 m*. Marine Geology, 152(4): 295-324.
- Seiji M., Uda T., e Tanaka S. (1987) - *Statistical Study on the Effect and Stability of Detached Breakwaters*. Coastal Engineering in Japan, Vol 30, No. 9: 131-141.
- Shah A.M., Kamphuis J.W. (1996) - *The swash zone: a focus on low frequency motion*. Proceedings of the 25th International Conference on Coastal Engineering, pp. 1431–1442.
- Suhayda J. N. (1974) - *Standing waves on beaches*. J. Geophys. Res. 79: 3065-3071.
- Sumer B.M., Fredsøe J. (2000) - *Experimental study of 2D scour and its protection at a rubble-mound breakwater*. Coastal Engineering, 40: 59-87.
- Yamashiro M., Yoshida A., Irie I. (1999) - *Experimental study on wave field behind a submerged breakwater*. Proc. Coastal Structures '99, pp. 675-682. Balkema.
- Vicinanza D., Baldock T. E., Contestabile P., Alsina J., Cáceres I., Brocchini M., Conley D., Andersen T. L., Frigaard P., Ciavola P. (2010) - *Swash zone response under grouping storm conditions*. Journal of Hydraulic Research, ISSN 0022-1686. Journal of Hydraulic Research Vol. 00, No. 0 (2011), pp. 1–9.
- Vicinanza D., Contestabile P., Power H., Alsina J., Cáceres I. (2009) - *Swash zone response*. Under grouping Storm Conditions (SUSCO), Internal Report EC contract no. 022441 (RII3), HYIII-WAVELAB-6, Canal d'Investigació i Experimentació Marítima (CIEM).

Ricevuto il 02/05/2012, accettato il 06/06/2012.

Analisi sperimentale sull'erosione delle barene lagunari

Michele Bendoni

Università degli Studi di Firenze, Facoltà di Ingegneria. E-mail: michelebendoni@gmail.com

Gli ambienti lagunari ecosistemi dotati di un'elevata biodiversità e complessità per la rete di fenomeni fisici, chimici e biologici che ne regolano l'evoluzione. Fattori naturali ed antropici possono interferire col delicato equilibrio dinamico di tali ambienti fino a provocarne la scomparsa. Risulta quindi di fondamentale importanza studiare i meccanismi ed i processi agenti nelle lagune al fine di intervenire in modo adeguato per la loro salvaguardia.

Un tipico esempio di ambiente lagunare è rappresentato dalla Laguna di Venezia, a cui è stata specificatamente rivolta l'attività sperimentale. Diversi studi hanno mostrato che, senza interventi mirati, la tendenza evolutiva della Laguna di Venezia continuerà a presentare un'erosione diffusa (Day et al., 1999), promossa principalmente ad opera del moto ondoso da vento e da barca a danno delle barene lagunari (Schwimmer, 2001).

Per analizzare l'effetto dell'azione del moto ondoso associata all'escursione di marea sulle sponde lagunari sono state svolte una serie di prove sperimentali nel Laboratorio di Idraulica della Facoltà di Ingegneria di Firenze, dove è situato un canale marittimo per la simulazione del moto ondoso lungo circa 50 m e largo 0.8 m, dotato di un generatore di onde a pistone. All'estremo opposto del generatore sono state ricostruite in scala 1:1, con materiale reperito in Laguna di Venezia, due porzioni di sponde lagunari con dimensioni: altezza 0.6 m, larghezza 0.5 m, lunghezza 1.0 m. Inizialmente il profilo del fronte è risultato essere verticale. I due modelli di sponda si sono differenziati per la presenza o meno della vegetazione sulla parte sommitale; tale scelta è stata finalizzata a studiarne le differenze comportamentali sotto l'azione delle stesse forzanti (moto ondoso ed escursione di marea). All'interno delle sponde sono stati posti diversi sensori per la misura delle pressioni interstiziali e del contenuto d'acqua volumetrico. Il fenomeno della marea è stato riprodotto nel canale marittimo variando il livello idrico a step temporali di due ore ciascuno, approssimando una sinusoide con periodo di 12 ore ed escursione massima di 0.3 m. Poiché la riproduzione di un intero ciclo di marea per ogni esperimento è risultata proibitiva, le diverse prove hanno avuto una durata pari ad un semiciclo (6 ore) e hanno simulato un'alta (AM) o una bassa marea (BM). Il moto ondoso riprodotto in canale è stato derivato da uno spettro JONSWAP i cui parametri caratteristici sono stati determinati attraverso un'analisi statistica dei dati raccolti da un ondometro posto in Laguna Sud in Località Fondo dei Sette Morti. Sono stati individuati un'altezza significativa HS pari a 10 cm ed un periodo significativo TS pari a 1.4 secondi; il fattore di picco è stato scelto pari a 2.

Sono stati quindi svolti gli esperimenti prima sulla sponda non vegetata e successivamente sulla sponda vegetata. Le prove hanno riprodotto 3 cicli di sola escursione di marea ed in seguito un ciclo di escursione di marea associato all'azione del moto ondoso. Alla stessa tipologia di sollecitazioni è stata poi soggetta la sponda vegetata. Le prove caratterizzate dalla sola azione della marea hanno provocato, sulla sponda non vegetata, la formazione e l'ampliamento di fessure sulla parte sommitale. La profondità di tali fratture al termine delle prove ha raggiunto una lunghezza dell'ordine dei 20-30 cm ed una larghezza di 3-4 cm. Insieme a questo fenomeno è stata osservata la caduta di piccole porzioni di terreno dal fronte della sponda. La prima prova con l'azione del moto ondoso (AM) ha causato diversi crolli di massa favoriti anche dall'instabilità iniziale della configurazione della sponda. Le onde hanno indotto un meccanismo oscillatorio nelle porzioni di terreno individuate dalle fessure fino a provocarne il crollo per ribaltamento con successiva deposizione al piede. E' importante sottolineare che

tali crolli di massa si sono concentrati nei primi 20 minuti dall'inizio dell'esperimento, mentre la restante parte della prova di alta marea e la successiva di bassa marea sono state caratterizzate da un'erosione del tipo particella per particella. L'evoluzione del profilo medio, misurato a seguito di ogni prova, ha indicato una tendenza all'avanzamento del piede ed all'arretramento della parte superiore.

Le prove di sola escursione di marea sulla sponda vegetata hanno mostrato la formazione e l'ampliamento di fessure che sono tuttavia risultate di dimensioni più contenute. Tale fenomeno ha indotto un avanzamento della parte superiore della sponda associato, anche in questo caso, alla perdita di materiale dal fronte. L'azione del moto ondoso è intervenuta sulle porzioni di terreno individuate dalle fratture provocando un meccanismo oscillatorio sui blocchi di terreno vegetato fino a causarne il crollo. A differenza della prova sulla sponda non vegetata, le zolle di terreno interessate dall'apparato radicale hanno manifestato un ritardo nell'evento di crollo. In parallelo è stato osservato che le zolle sono risultate soggette ad una sorta di scuotimento con ingente perdita di sedimenti (Feagin et al., 2009). L'andamento temporale dei crolli è stato caratterizzato da una distribuzione uniforme su tutta la prima ora dell'esperimento (AM). Nelle ore successive e nell'esperimento di bassa marea sono stati osservati un'erosione regolare ed una tendenza evolutiva del profilo medio della sponda vegetata analoga a quella riscontrata per la sponda senza presenza di vegetazione. L'ordine di grandezza delle potenze medie incidenti associate agli eventi di moto ondoso è risultato variare da un minimo di 7 W/m ad un massimo di circa 15 W/m.

In conclusione è possibile affermare che i principali processi che concorrono all'erosione delle barene sono caratterizzati da crolli di massa favoriti dalla formazione di fessure tensionali in condizioni di instabilità, mentre l'erosione particella per particella avviene per tutta la durata del moto ondoso. È stato inoltre osservato che il ruolo della vegetazione tende a ritardare il fenomeno di crollo, incidendo in modo lieve sul quantitativo complessivo di materiale asportato. Per entrambe le sponde l'evoluzione temporale del profilo medio ha indicato un arretramento della parte superiore con la formazione di un pendio a maggiore pendenza ed un avanzamento del piede caratterizzato da una inclinazione moderata.

Colgo l'occasione per ringraziare il Dott. Ing. Luca Solari che mi ha dato la possibilità di svolgere un tirocinio formativo e un elaborato di tesi specialistica su una tematica di notevole interesse scientifico il cui studio è finanziato dal Ministero dell'Istruzione, dell'Università e della Ricerca attraverso il PRIN 2008 "Eco-morfodinamica degli ambienti lagunari e cambiamenti climatici" di cui Solari è il referente per l'Università di Firenze. Vorrei altresì ringraziare il Dott. Ing. Lorenzo Cappiotti, la Dott. Ing. Simona Francalanci ed il Prof. Geol. Massimo Rinaldi per il sostegno da loro ricevuto durante l'attività di ricerca.

Bibliografia

- Day J. W. Jr., Rybczyk J., Scarton F., Rismondo A., Are D. e Cecconi G. (1999) - *Soil Accretion Dynamics, Sea-Level Rise and the Survival of Wetlands in Venice Lagoon: A Field and Modeling Approach*. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 49: 607-628.
- Feagin R. A., Lozada-Bernard S. M., Ravens T. M., Möller I., Yeager K. M. e Baird A. H. (2009) - *Does vegetation prevent wave erosion of salt marsh edges?* Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, Volume 106, Issue 25, 10109-13.
- Schwimmer R. A. (2001) - *Rates and Processes of Marsh Shoreline Erosion in Rehobot Bay, Delaware, U.S.A.* Journal of Coastal Research, 17(3): 672-683.

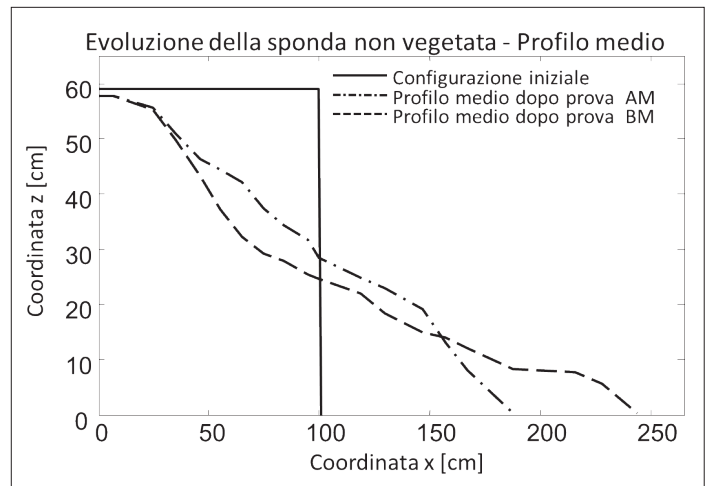


Figura 1 - Evoluzione del profilo medio della sponda non vegetata in risposta all'azione congiunta del moto ondoso e dell'escursione di marea.

Effetto della durata delle prove di laboratorio sulla misura di tracimazione a tergo di una duna portuale

Ilaria Crema

Università degli Studi di Firenze, Dipartimento di Ingegneria Civile ed Ambientale.

E-mail: ilaria.crema@dicea.unifi.it

Il fenomeno della tracimazione o overtopping è definito come la quantità di acqua che oltrepassa una struttura, per effetto del moto ondoso incidente. In generale questo processo è strettamente correlato alla sezione della struttura portuale (a parete inclinata o verticale); alla larghezza e quota delle berme emerse e sommerse; alla geometria e quota del muro paraonde (assenza o presenza del ricciolo rovescia onde); alla profondità e inclinazione dei fondali antistanti l'opera ed infine ai parametri caratteristici del moto ondoso incidente.

La tracimazione è inoltre un processo estremamente mutevole sia nello spazio che nel tempo, a causa della sua forte variabilità da un'onda all'altra e una parte rilevante di essa spesso è prodotta da una bassissima percentuale di onde presenti in una mareggiata, infatti la portata di overtopping di una singola onda, può superare cento volte quella media di una intera mareggiata.

Il parametro tradizionalmente utilizzato nella fase progettuale e di studio di un'opera portuale è la portata media di tracimazione q , che esprime il volume d'acqua tracimante nell'unità di tempo e per unità di lunghezza (l/s/m). Una stima accurata di tale parametro risulta quindi essere fondamentale per determinare i rischi a persone, installazioni, o natanti ormeggiati a tergo di una diga, ovvero è indispensabile per la verifica del comportamento dell'opera e per garantirne una progettazione più efficiente.

Le linee guida per i progettisti sugli effetti delle tracimazioni d'onda oltre le dighe, in termini di limiti tollerabili di tracimazione al variare del tipo di rischio sono riassunti in EurOtop (2008).

Durante la fase progettuale e di studio di una diga portuale quindi, l'esigenza di evitare consistenti tracimazioni si traduce nella ricerca della geometria ottimale del muro paraonde, tenendo sempre conto dell'impatto sul paesaggio e delle limitazioni economiche.

La complessità del problema legato alla valutazione della portata di tracimazione dovuta ai molti parametri che influenzano questo fenomeno e alla mancanza di una formula empirica generale in grado di offrire una sua descrizione in modo univoco, implica che, ad oggi il modello fisico in scala ridotta è il più accurato strumento di sostegno offerto ai progettisti per l'ottimizzazione di costi e benefici, soprattutto durante la fase progettuale definitiva di un'opera portuale.

Il presente studio sperimentale è stato condotto presso il Dipartimento di Ingegneria Civile ed Ambientale dell'Università di Firenze, nel canale per onde e correnti del Laboratorio di Idraulica Marittima, che è caratterizzato da una larghezza di 0.80 m, lunghezza di 47 m, ed è dotato di un generatore di moto ondoso controllato da PC tramite software, in grado di generare onde irregolari caratterizzate dalla stessa densità spettrale delle onde da vento.

Lo scopo principale di questo studio è stato quello di verificare l'influenza della durata degli attacchi ondosi simulati, espressi in termini di numero di periodi d'onda, sull'accuratezza della misura di tracimazione a tergo di dighe portuali riprodotte su modello fisico in scala.

Sono stati quindi ricostruiti in canale il profilo batimetrico e la sezione di una diga portuale in scala ridotta

ed è stato riprodotto un attacco ondoso irregolare, che nella realtà sarebbe caratterizzato da un'altezza significativa $H_s=6\text{m}$ e un periodo di picco $T_p=11\text{s}$, mentre per la misura dei volumi di acqua tracimanti, è stato posizionato a tergo della diga un apposito campionatore.

Dati i parametri significativi del moto ondoso H_s e T_p e scelto di assumere come forma spettrale quella dello spettro JONSWAP, con tale spettro sono state generate quattro classi di attacchi ondosi. Ciascuna classe contiene 10 attacchi ondosi random di durata, in termini di numero di periodi d'onda, pari a 560 (per la prima classe), 1120 (per la seconda classe), 1680 (per la terza classe) e 2240 onde (per la quarta classe). Per ogni attacco ondoso sono state misurate le portate medie di tracimazione e per ogni classe sono stati calcolati i valori di portata minima q_{min} , di portata massima q_{max} , di portata media q_{media} e l'errore relativo percentuale e (Tabella 1).

Tabella 1 - Tracimazione per ciascuna classe.

	<i>Durata</i>			
	<i>560*T_p</i>	<i>1120*T_p</i>	<i>1680*T_p</i>	<i>2240*T_p</i>
<i>q_{min}</i>	0.5	0.8	1.1	1.1
<i>q_{max}</i>	2.9	2.7	2.2	1.7
<i>q_{media}</i>	1.5	1.5	1.5	1.4
<i>e %</i>	82	64	36	23
<i>Misura</i>	1.5 ± 1.2	1.5 ± 1.0	1.5 ± 0.5	1.4 ± 0.3

Questo studio ha messo in evidenza una forte correlazione tra l'andamento delle portate medie di tracimazione rilevate nelle dieci generazioni random, e la durata di ciascun moto ondoso simulato.

Infatti nel caso di prove di laboratorio di durata 560 periodi d'onda, è possibile notare una marcata variabilità delle portate tra le dieci generazioni random, con un errore relativo pari all'82%, mentre all'aumentare della durata del moto ondoso è possibile rilevare un graduale abbattimento dell'errore relativo, che passa dal 64% per 1120 periodi d'onda al 33% per 1680 onde, fino ad arrivare al 23% per misure condotte su prove lunghe 2240 periodi d'onda.

In Figura 1 è mostrato l'andamento decrescente dell'errore relativo all'aumentare della durata del moto ondoso, ovvero del numero di periodi d'onda. Questo dimostra che condurre prove troppo corte può comportare un errore, che presenta lo stesso ordine di grandezza della misura rilevata.

In conclusione data la complessità del fenomeno della tracimazione dovuta ai molteplici parametri che ne influenzano l'andamento, la necessità nella fase progettuale definitiva di un'opera portuale di una stima accurata della portata media prevista a tergo di essa, e che ad oggi il modello fisico è lo strumento di indagine più appropriato per una sua previsione, è importante tenere presente che la validità stessa del modello fisico è, tra l'altro, strettamente correlata alla scelta della durata delle prove in laboratorio.

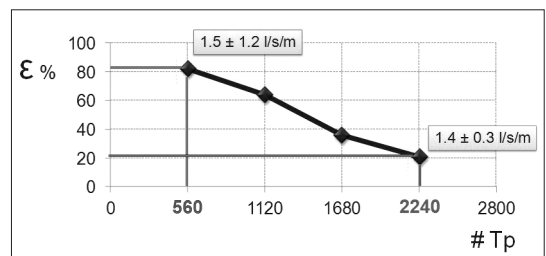


Figura 1 - Andamento dell'errore relativo percentuale sulla misura della portata media di overtopping in funzione della durata del moto ondoso, espressa in numeri di periodi d'onda.

Bibliografia

EurOtop 2008 - *Wave Overtopping of Sea Defences and Related Structures: Assessment Manual*.

Indagine sperimentale sui processi di trasmissione di energia e massa a tergo di barriere frangiflutti a porosità controllata

Andrea Marzeddu

Universitat Politècnica de Catalunya (Laboratori d'enginyeria marítima) Barcelona

Durante gli attacchi ondosi su coste protette da frangiflutti leggermente emersi, una parte significativa della massa d'acqua passa a tergo delle barriere spinta da due meccanismi forzanti: 1) Wave Overtopping (WO) e 2) Wave-Induced Filtration (WIF).

La somma del Wave Overtopping e del Wave-Induced Filtration viene chiamata Wave Pumped Flux (WPF). In conseguenza del WPF, si accumula a tergo del frangiflutti una quantità d'acqua che provoca un sovrizzo idrico noto come piling-up o water set-up. (Diskin et al., 1970, Loveless et al., 1998).

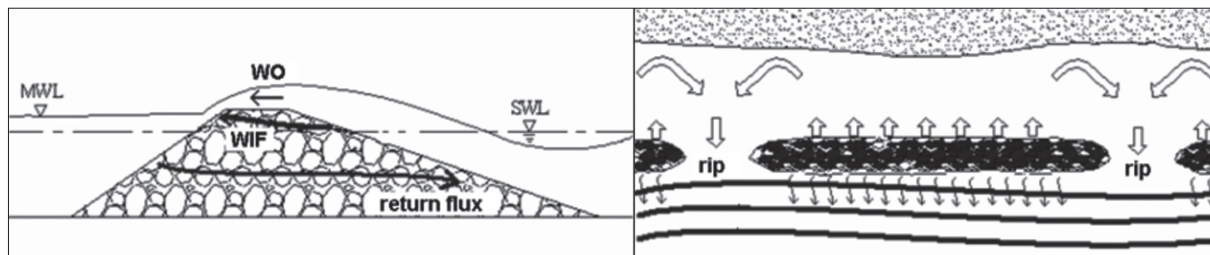


Figura 1 - Schematizzazione dei flussi: sezione a sinistra; vista dell'alto a destra.

Il piling-up aumenta fino alla generazione di un gradiente di pressione abbastanza elevato da instaurare un flusso di ritorno attraverso la struttura porosa del frangiflutti e attraverso le aperture che si trovano tra frangiflutti contigui se presenti. La quantità che passa attraverso le une o le altre è funzione della resistenza che queste apportano al passaggio del flusso.

La massa d'acqua che passa a tergo delle strutture dovute al WO è stata misurata numerose volte sia in laboratorio sia in campo, mentre, al contrario, la misura del WIF attraverso strutture permeabili per la difesa costiera non ha ricevuto lo stesso grado di attenzione, nonostante questa diventi la componente più importante del WPF durante attacchi ondosi non estremi in cui il fenomeno dell'overtopping è raro. Con questa prospettiva una miglior conoscenza del WPF è fondamentale per lo studio della trasmissione ondosa, del piling-up e della circolazione a tergo delle stesse barriere.

Lo scopo di questo lavoro è di fornire misure di WO e WPF in maniera tale da incrementare la conoscenza di questi fenomeni e la loro relativa importanza.

Gli esperimenti, sono stati effettuati nel canale di piccola scala CIEMito del Laboratori D'Enginyeria Marítima (LIM) della Universitat Politècnica de Catalunya di Barcellona. Il canale è lungo 18 m, largo 0.38 m e alto 0.56 m. Il frangiflutti è stato costruito utilizzando elementi cubici con il lato di 7.67 cm. Tutti gli attacchi ondosi sono stati eseguiti con un livello idrico di 27 cm, pertanto il freeboard della struttura sarà di 3.7 cm. Per la misura di WO e WIF è stata adottata la metodologia esposta in (Cappiotti et al., 2011). Questa si basa

sull'analisi dell'incremento del livello idrico a tergo della barriera indotto dalla WPF. Una volta che il livello idrico a tergo della struttura inizia ad aumentare si instaura una corrente di ritorno attraverso della stessa. Questo processo può essere modellizzato analiticamente con un semplice bilancio di massa come espresso nell'equazione seguente:

$$dz\Omega = [(q_{ov} + q_{wif}) - q_r]dt$$

dove dz è l'incremento di livello che avviene in un periodo dt , mentre Ω è l'area di mare a tergo della barriera. Eseguendo un best-fit sui dati reali, possiamo calcolare il valore del coefficiente di filtrazione k e pertanto risolvere la precedente equazione in termini di $(q_{ov} + q_{wif})$.

Per misurare q_{ov} si è impermeabilizzato la barriera in maniera da impedire qualsiasi flusso di filtrazione all'interno della stessa.

In questo caso pertanto l'incremento di livello a tergo della barriera verrà indotto solamente dalla componente di WO e si potrà ottenere il valore del flusso associato derivando nel tempo l'incremento di livello sulla superficie Ω .

Sono stati testati tre differenti attacchi ondosi con i seguenti parametri necessari per l'analisi precedente:

Codice onda	H_{m0} [cm]	T_p [s]	d [cm]	τ [s]
A1	6.20	1.04	0.10	31.58
A2	9.40	1.77	0.40	39.65
A3	8.90	1.28	0.30	41.40

I risultati sperimentali sono stati analizzati applicando la metodogia sopra descritta in maniera da ottenere WIF e WPF. I risultati vengono riportati nella tabella di seguito:

Codice onda	q_{ow} [l/s]	q_{wpf} [l/s]	q_{wif} [l/s]	k [m ² /s]
A1	0.05	0.27	0.22	0.26
A2	0.39	0.87	0.48	0.20
A3	0.19	0.69	0.50	0.20

Questi risultati mostrano che la WIF che fluisce nella parte alta della struttura permeabile e diretta dal lato mare verso il lato terra, è sempre più grande della componente di WO. Questo risultato era sicuramente atteso nel caso dell'attacco ondoso denominato A1 (il meno energetico) dove il fenomeno dell'overtopping è raro, mentre meno atteso ma probabile negli attacchi ondosi A2 e A3 caratterizzati da frequenti fenomeni di overtopping.

La conseguenza di questi risultati è che la circolazione a tergo del frangiflutti potrebbe essere forzata principalmente dalla filtrazione all'interno della struttura, mentre l'overtopping è responsabile di variazioni importanti di volume riconducibili alla trasmissione dell'energia dell'attacco ondoso ed a forti correnti con carattere impulsivo.

Bibliografia

- Diskin M.H., Vajda M.L., Amir I. (1970) - *Piling-up behind low and submerged permeable breakwaters*. Journal of Waterways and Harbour division, ASCE, 359-371.
- Loveless J.H., Debski D., MacLeod A.B. (1998) - *Sea level set-up behind detached breakwaters*. Proceedings of 26th International Conference on Coastal Engineering, ASCE, 1665-1678.
- Cappiotti, L., Gironella, X., Marzeddu, A., (2011) - *Laboratory experiments on wave-induced fluxes over and through shore-defense detached permeable breakwaters*. SI 64 (Proceedings of the 11th International Coastal Symposium), 484 – 487. Szczecin, Poland, ISSN 0749-0208.

Utilizzo di materiali innovativi per lo studio della morfodinamica di spiaggia mediante modelli fisici

Valentina Petruzzelli

Dipartimento di Ingegneria delle Acque e di Chimica (DIAC),
Politecnico di Bari, Via E. Orabona, 4 - 70125 Bari. E-mail: valentina.petruzzelli@poliba.it

Il presente studio si propone di analizzare il potenziale utilizzo di materiali non convenzionali per la ricostruzione delle spiagge sabbiose nei modelli fisici di dinamica costiera, nell'ottica di ridurre gli effetti scala che influiscono sulla corretta simulazione della morfodinamica della spiaggia.

Alla luce delle problematiche di erosione costiera, infatti, vi è l'esigenza di valutare la dinamica delle spiagge attraverso l'integrazione di modelli fisici e matematici tridimensionali che siano in grado di simulare tratti di litorale piuttosto ampi. Tuttavia, con particolare riferimento ai modelli fisici, se si tengono in conto le dimensioni delle attuali attrezzature disponibili nei laboratori più grandi, si comprende la necessità di dover realizzare modelli con scale di riduzione elevate, con il conseguente innesco di evidenti effetti scala.

In generale, gli effetti scala sono generati dall'incompatibilità tra i criteri di similitudine che dovrebbero essere applicati per rappresentare tutti i fenomeni coinvolti, legata alla esigenza pratica di utilizzare nel modello lo stesso fluido e la stessa tipologia di sedimenti del prototipo. Conseguentemente, per ovviare al problema viene trascurata la rigorosa riproduzione di alcuni fenomeni ritenuti meno rilevanti, provocando distorsioni, dette appunto effetti scala, sia sull'idrodinamica che sulla morfodinamica della spiaggia. Nella fattispecie, per quanto riguarda la dinamica dei sedimenti, questi effetti scala si traducono nell'impossibilità di ridurre adeguatamente in scala la velocità di sedimentazione e la permeabilità dei sedimenti costituenti la spiaggia, ed nella conseguente non corretta ricostruzione dei fenomeni di trasporto di fondo e in sospensione, nonché del grado di saturazione della spiaggia emersa.

Seguendo tale approccio, ricerche sistematiche condotte negli anni da differenti autori hanno portato ad assumere affidabili per la riproduzione dei fenomeni di evoluzione di un litorale due criteri di similitudine: l'analogia idrodinamica di Froude, rappresentativa della propagazione del moto ondoso, e l'analogia sedimentologica di Dean, rappresentativa del trasporto in sospensione dei sedimenti nella surf-zone (Dean, 1973). Tuttavia, affinché la compatibilità tra tali criteri sia assicurata, la scala di riduzione del modello non deve essere troppo elevata, perché diversamente potrebbe accadere di dover utilizzare sabbie di granulometria troppo fine (Ranieri, 1995). In quest'ambito, un vantaggioso aumento del tratto rappresentabile potrebbe idealmente aversi incrementando la scala di riduzione (seppur nei limiti imposti dal potenziale innesco di effetti scala legati all'idrodinamica) ed impiegando, anziché la sabbia o la ghiaia, materiali più grossolani e di minor peso specifico, purché il modello sia indistorto e venga rispettato il criterio di similitudine della sedimentologia (Hughes, 1993). Numerose esperienze in questa direzione sono state già condotte negli anni da diversi autori, tuttavia senza raggiungere risultati risolutivi.

In quest'ottica, l'obiettivo della presente linea di ricerca è la correlazione delle caratteristiche geotecniche dei materiali con il loro comportamento nel modello, conducendo simulazioni su modelli bidimensionali realizzati ricostruendo i profili di spiaggia con materiali granulari differenti dal punto di vista chimico, granulometrico, merceologico, morfologico e tessiturale. Nello specifico, sono stati testati materiali dotati di

diametro medio compreso tra 0.07 mm e 1.4 mm e di densità comprese tra 1150 kg/m³ and 2650 kg/m³, quali resine a scambio ionico, granulati di plastica melamminica, sabbie silicee, microsferi di vetro, granuli di antracite e minerali naturali frantumati.

La sperimentazione è stata suddivisa in due principali fasi: una fase di caratterizzazione geotecnica dei materiali ed una seconda in cui si è analizzato, qualitativamente, il comportamento dei materiali in modelli fisici di piccole dimensioni, effettuando il confronto dei profili di spiaggia rilevati nei modelli con quelli riscontrati nel prototipo. Il prototipo scelto è una delle configurazioni del modello bidimensionale di Froude in scala 1:1 realizzato nel GWK di Hannover da Dette e Uliczka (1986), che è stato ritenuto significativo in quanto già utilizzato come tale in diversi studi riportati in letteratura (Hughes e Fowler, 1990; Ranieri, 1995). Le prove sono state condotte presso il LIC del Politecnico di Bari su modelli di Froude in scala di riduzione elevata (1:100), realizzati con i diversi materiali all'interno di una piccola canaletta (lung.=1,20 m, larg.=0,40 m, prof.=0,35 m) dotata di un generatore di moto ondoso molto semplice, fatto che ha permesso di conseguire risultati utili solo a livello qualitativo, ma comunque significativi.

Alla luce dei risultati ottenuti, seppure ancora parziali, è stato possibile concludere che vanno esclusi: materiali troppo leggeri e allo stesso tempo di forma sferica; materiali coesivi o, comunque, di granulometria tanto fine da generare l'innesco di coesione apparente per capillarità; materiali troppo polverulenti, permeabili, friabili e/o porosi; materiali in grado di elettrizzarsi per contatto o per strofinio. Inoltre, si è evinto che i valori dell'angolo di attrito e di riposo influiscono in maniera significativa sul comportamento dei materiali nel corso delle simulazioni, ed in particolare sulla possibilità di riprodurre le pendenze del profilo di spiaggia del prototipo, specie nella parte sommersa. Infine, si è notato che l'analogia di Dean risulta insufficiente ad assicurare la rappresentazione dei fenomeni di trasporto in sospensione, specie all'aumentare della scala di riduzione, in quanto il numero indice di Dean tiene conto delle caratteristiche sedimentologiche dei materiali solo attraverso la velocità di caduta dei sedimenti.

Nel prosieguo della ricerca ci si propone, pertanto, di continuare con lo stesso approccio le sperimentazioni utilizzando nuovi materiali, selezionando gli stessi sia alla luce dei risultati sin qui ottenuti, sia di quelli conseguiti da altri ricercatori. Inoltre, l'obiettivo è quello di effettuare test specifici sui materiali che hanno esibito i comportamenti più verosimili (ad es. antracite) sia sul piccolo canale già utilizzato, che su canali di dimensioni più grandi, nonché di confrontare i risultati con quelli conseguiti nell'ambito delle numerose sperimentazioni condotte con sabbie considerando il medesimo prototipo (Ranieri, 1995; Hughes e Fowler, 1990). Lo scopo delle prove che si intende fare è quello di testare la possibilità di utilizzare materiali a bassa densità al fine di realizzare modelli con scale di riduzione superiori ad 1:14, ossia più elevate rispetto a quelle ritenute fino ad ora affidabili per i modelli fisici bidimensionali (Ranieri, 1995), nell'ottica di estendere i risultati anche ai modelli tridimensionali.

Bibliografia

- Dean R.G. (1973) - *Heuristic model of sand transport in the surf-zone*. Conference on Dynamics Coastal Zone, Australia, pp. 208-214.
- Dette H. H. e Uliczka K. (1986) - *Prototype and Model Evolution of Beach Profile*. Proceedings IAHR Symposium '86 on Scale Effects in Modeling Sediment Transport Phenomena, Toronto, Canada.
- Hughes S.A. e Fowler J.E. (1990) - *Midscale physical model validation for scour at coastal structures*. Technical Report CERC 90-8, US Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.
- Hughes S.A. (1993) - *Physical Model sand Laboratory Techniques*. Coastal Engineering, Advanced Series on Ocean Engineering, Vol. 7: 568 pp.
- Ranieri G. (1995) - *La modellistica fisica a fondo mobile applicata alla dinamica dei litorali*. Tesi di DdR in Ingegneria Idraulica (Ciclo V), Università degli Studi di Napoli "Federico II", di Roma "La Sapienza" e di Palermo.

Dispersione di sedimenti durante le attività di dragaggio e back-fill.

Emanuele Terrile

D.E.A.M. s.r.l. - Via della Casina, 11 - 56010 S. Martino a Ulmiano - Pisa

Durante le operazioni di dragaggio e back-fill contemporaneo finalizzate alla realizzazione di un gasdotto in corrispondenza dell'approdo a terra (su acque basse), il plume di sedimenti può alterare i fattori abiotici (es. torbidità) dell'ambiente marino circostante con effetti, anche importanti, sulle biocenosi pregiate (es. *Posidonia Oceanica*).

Sulla base dei dati meteo-marini locali e dei dati relativi alla descrizione delle biocenosi esistenti, delle caratteristiche morfologiche, sedimentologiche e stratigrafiche dei fondali, sono state effettuate simulazioni utilizzando apposita modellistica numerica.

E' stato, quindi, effettuato un accurato studio dell'impatto delle operazioni di scavo e riempimento del corridoio, adottate per la posa della condotta, sulle biocenosi pregiate presenti. Nelle simulazioni si è tenuto debito conto delle metodologie operative (modalità di scavo, velocità di avanzamento, volumi dragati, etc..) e delle tecniche di scavo e di riempimento previste (tipologia dei mezzi e degli equipaggiamenti).

Attraverso il confronto tra la situazione attuale, in assenza di condotta (situazione generalmente definita "zero" o "bianco"), e la configurazione di progetto, simulate con modelli numerici allo stato dell'arte, è possibile documentare quantitativamente l'impatto dello scavo della condotta sulle biocenosi che caratterizzano lo "shore approach".

A tal proposito gli obiettivi principali sono stati: a) evidenziare e quantificare le problematiche connesse alla realizzazione della condotta, in particolare quelle connesse all'attività di dragaggio nelle aree in cui è presente biocenosi pregiata (*Posidonia Oceanica*); b) valutare le concentrazioni di materiale in sospensione dovuto alle attività di dragaggio; c) stimare i tempi di permanenza e la dinamica dei sedimenti in sospensione in funzione della stagione; d) caratterizzare i più importanti fenomeni fisici/biologici connessi all'attività di dragaggio al fine di una migliore (soprattutto dal punto di vista ambientale) pianificazione delle attività stesse (monitoraggio, metodi di realizzazione, ripristino *Posidonia* se e ove necessario, etc); e) rispettare i tempi previsti per lo studio (1-2 mesi).

La scelta delle condizioni idrodinamiche e quindi delle condizioni meteo-marine più probabili e critiche da simulare è stata fatta considerando che: a) le operazioni di dragaggio non vengono eseguite nel periodo estivo; b) l'assenza di correnti intense comporta una più lenta dispersione e quindi tempi di permanenza più lunghi; c) i mezzi utilizzati nelle operazioni di dragaggio operano in assenza di mareggiate. Le condizioni di progetto simulate sono state, quindi, forzate dal ciclo di marea locale e dall'azione del vento tipico stagionale.

Infine, i risultati ottenuti nelle condizioni di progetto sono stati correttamente interpretati sulla base delle simulazioni effettuate nello stato attuale, utilizzando le mareggiate tipiche stagionali.

Durante le simulazioni sono stati considerati sia i dragaggi effettuati in fase di *pre-trenching* (senza contenimenti laterali), sia quelli effettuati di *post-trenching con backfill contemporaneo*, tenendo debito conto delle caratteristiche di scavo della trincea, dei volumi di sedimenti dragati e dell'efficienza del dragaggio stesso. In particolare la portata massica è stata calcolata mediante la formulazione di Hayes e Wu, 2001 riportata nel seguito:

$$W = \rho_s \frac{R f Q_s}{3600}$$

dove ρ_s è la densità del materiale solido, assunta pari a circa 2650 kg/m³, f è la percentuale di materiale fine (diametro $d_{50} \leq 63 \mu\text{m}$, scala di Udden-Wentworth) che può rimanere in sospensione, Q_s è la quantità di solidi dragati (m³/ora) e R è la percentuale di sedimento soggetto a risospensione.

I risultati ottenuti hanno permesso di valutare la dinamica del plume di sedimenti messi in sospensione durante le attività di dragaggio in termini di concentrazione di sedimenti mg/L. La loro successiva elaborazione ha poi permesso di valutare i tempi di permanenza nell'area prossima ai dragaggi di determinate soglie di concentrazione fissate in: 1, 2, 5, 10 e 20 mg/L.

In particolare, dall'analisi generale dei risultati è stato evidenziato che: a) il campo idrodinamico da marea e vento, da luogo a correnti di entità modesta, circa 3-5 cm/s; b) il pennacchio di sedimenti risospesi rimane confinato in prossimità della condotta e quindi dell'area di dragaggio; c) l'area interessata dal dragaggio di tipo *pre-trenching* è caratterizzata da tempi di permanenza delle singole soglie analizzate abbastanza elevati a causa della maggiore lentezza delle attività di dragaggio stesse; d) la dispersione dei sedimenti risospesi aumenta con l'aumentare della profondità comportando tempi di permanenza minori, circa 3-9 ore; e) la sedimentazione del materiale solido in sospensione avviene per la maggior parte in prossimità dell'area di scavo o all'interno della trincea stessa; f) allo stato attuale la scarsa movimentazione di sedimenti indotta dalle mareggiate tipiche locali e le modeste quantità di sedimenti depositatesi nelle aree limitrofe non evidenziano particolari criticità connesse.

In conclusione, sebbene le simulazioni numeriche si siano rivelati utili ad avere indicazioni sulla fenomenologia e sul grado di impatto delle attività di dragaggio sulle biocenosi pregiate (es. *Posidonia Oceanica*), al fine di ottenere una pianificazione ottimale volta alla mitigazione dell'impatto, è necessario un attento piano di monitoraggio volto a caratterizzare e controllare l'evolversi delle attività e della situazione attuale.

Analisi dei potenziali energetici del nord del mediterraneo

Valentina Vannucchi

D.I.C.E.A. – Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale
Università degli Studi di Firenze, Via S.Marta, 3 - 50139 Firenze, Italia

L'energia da moto ondoso è una fonte di energia rinnovabile che si ottiene quando i convertitori di energia (WECs) vengono collocati in mare per raccogliere la potenza generata dalle onde. Nella letteratura scientifica (Falcao, 2010) i WECs sono di solito classificati per: i) la loro distanza dalla costa (shoreline, nearshore, offshore); ii) il tipo di interazione con i fronti d'onda (terminator, attenuator, point absorber); iii) il sistema di estrazione utilizzato.

In questo lavoro si riportano le mappe di distribuzione della potenza nel Mar Mediterraneo settentrionale, ottenute mediante analisi di un set di dati ondametrici.

Il set di dati utilizzato copre il periodo da Luglio 2009 ad Aprile 2011 ed è stato estratto dal modello MENOR 4000M, con risoluzione spaziale di 4000 m, appartenente al progetto PREVIMER dell'istituto francese IFREMER. I valori estratti di altezza d'onda significative e periodo medio spettrale sono stati utilizzati per stimare la potenza media mensile e media annuale, secondo la formula (1):

dove g è l'accelerazione di gravità [m/s^2], π la costante pi-greco, ρ la densità dell'acqua [kg/m^3], H_{m0} l'altezza d'onda significativa [m], $T_{m-1,0}$ il periodo d'onda spettrale [s].

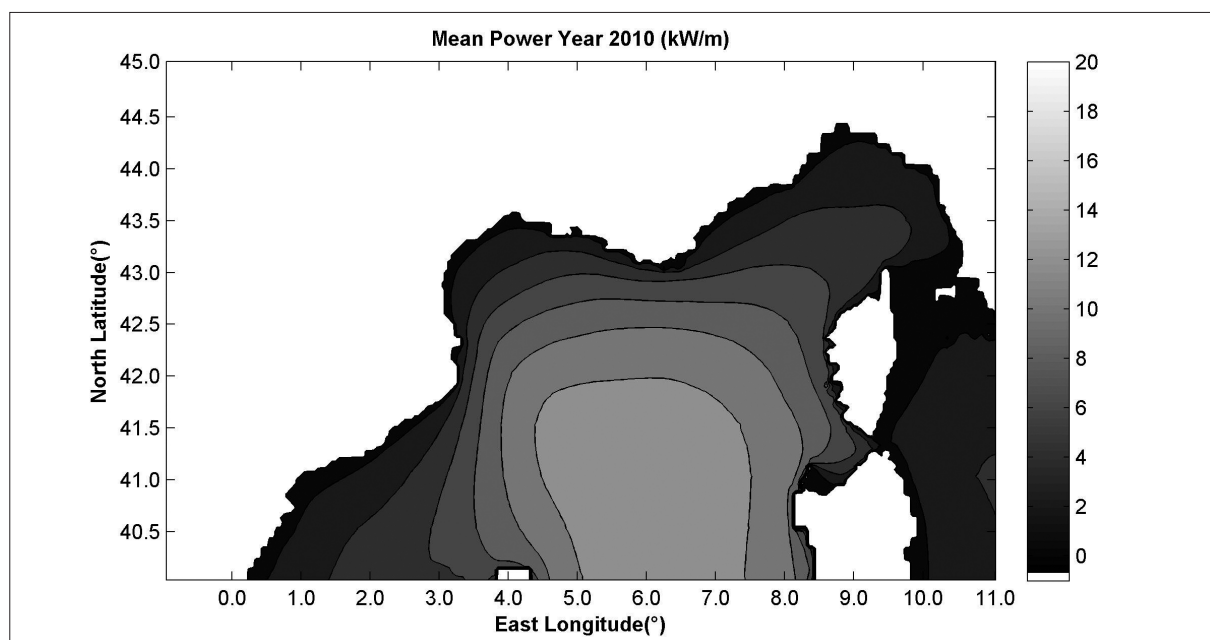


Figura 1 - Potenza media anno 2010.

In Figura 1 si riporta la mappa delle potenze medie annuali ricavata per l'anno 2010, il cui valore massimo risulta essere pari a 15.8 kW/m ed è localizzato a largo delle coste sarde. Invece le potenze medie annuali calcolate di fronte ai 37 porti analizzati (Tab. 1) sono normalmente inferiori ai 3.0 kW/m, e gli unici valori vicini o superiori ai 5 kW/m sono localizzati davanti al porto di Alghero (9.08 kW/m) e di Port de Centauri (4.84 kW/m).

Da queste analisi si evince che nel Mediterraneo settentrionale, in generale, non è sostenibile la costruzione di WECs (ad eccezione della zona di Alghero) solo ai fini della produzione di energia, a meno che non si realizzino strutture polifunzionali con il duplice scopo di produrre energia e di difesa della costa o di un porto. Si può considerare, invece, questa zona molto interessante per lo studio dell'efficacia e dell'ottimizzazione di possibili prototipi.

Tabella 1 - Potenza media anno 2010 davanti ai 37 porti analizzati.

		Potenza media 2010 [kW/m]				Potenza media 2010 [kW/m]	
1	Italia	Piombino	0.90	20	Francia	Port Cap d'Adge	2.00
2		San Vincenzo	0.74	21		Gruissan	1.71
3		Livorno	1.01	22	Spagna	Empuriabrava	0.36
4		Viareggio	1.56	23		L'Escala	2.13
5		Carrara	1.63	24		Palamos	1.71
6		La Spezia	2.02	25		Blanes	1.34
7		Genoa	2.15	26		Arenys de Mar	1.31
8		Savona	0.86	27		Barcellona	1.58
9		Imperia	2.63	28		Tarragona	1.21
10		SanRemo	2.30	29		Port de Cent.	4.84
11	Francia	Monaco	1.63	30	Francia - Corsica	San Fiorenzo	0.59
12		Nice	1.63	31		Isola Rossa	3.01
13		Cannes	1.24	32		Ajaccio	3.61
14		Saint Raphael	1.62	33		Propriano	3.12
15		Sainte Maxime	1.39	34		Bastia	0.87
16		Toulon	3.37	35	Italia - Sardegna	Alghero	9.08
17		La ciotat	2.66	36		Porto Torres	0.78
18		Marseille	2.14	37		Golfo Aranci	1.33
19		Sete	1.88				

Bibliografia

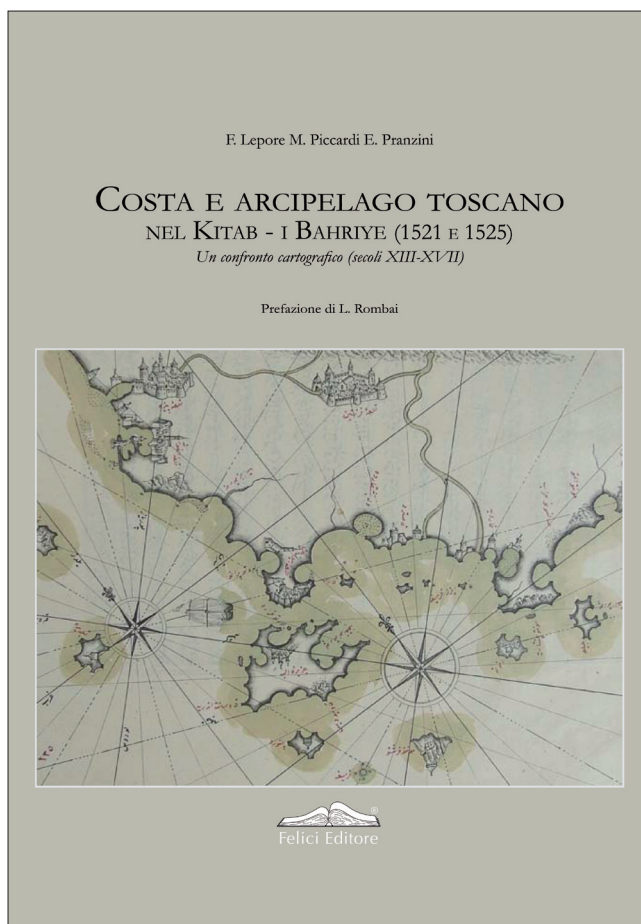
Falcao A. (2010) - *Wave energy utilization: a review of the technologies*. In: Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 14: 899-918.

**Costa e arcipelago toscano
nel Kitab - i Bahriye (1521 e 1525)
Un confronto cartografico (secoli XIII-XVII)**

di Fortunato Lepore, Marco Piccardi e Enzo Pranzini

Edito da Felici Editore, Pisa, 2011

Il volume di Fortunato Lepore, Marco Piccardi ed Enzo Pranzini ruota attorno al *Kitab-i Bahriye*, il *Libro della Marina*, dell'ammiraglio turco Piri Reis (1465/70-1553/1554), un capolavoro della letteratura ma anche della storia del Mediterraneo, della cartografia e della navigazione. Piri Reis è conosciuto dagli studiosi della cartografia soprattutto per avere disegnato due grandi mappamondi o planisferi nel 1513 e nel 1528/29 (oggi conservati in frammenti nella biblioteca del Museo Topkapi di Istanbul). Diversamente, il *Kitab* venne redatto in prima versione nel 1521 e in seconda versione riveduta e corretta (con introduzione ed epilogo in versi) nel 1525 per il sultano Solimano il Magnifico. Del *Kitab-i Bahriye*, che raccoglie esperienze di navigazione sviluppate tra gli ultimi due decenni del XV secolo e il 1521, sono rimasti in tutto il mondo 44 esemplari più o meno completi. L'opera si compone di una parte testuale accompagnata, in talune versioni, da oltre 200 carte a grande scala dedicate alle coste del Mediterraneo, ben conosciute da Piri Reis: prima giovanissimo corsaro a fianco dello zio Kemal, poi capitano di nave e quindi ammiraglio della più potente flotta mediterranea, quella ottomana. Nel *Kitab-i Bahriye*, il Mediterraneo è frazionato in decine e decine di carte ciascuna delle quali raffigura, in ordinata successione spaziale, porzioni di territorio costiero abbastanza ristrette, con le caratteristiche tipiche delle 'carte per navigare', ovvero l'accentuazione delle dimensioni di golfi, promontori e isole e il disegno del profilo costiero come consueto susseguirsi di falcature quasi geometriche. L'apparato cartografico costituisce così un vero e proprio atlante nautico, mentre la parte descrittiva può



essere letta come un'approfondita interpretazione delle figure che ne allarga i contenuti, ossia, come scrivono gli autori, "come un vero e proprio trattato che entra nel merito di temi che valicano i contenuti dei tradizionali portolani: si esaminano argomenti che riguardano l'astronomia, la geografia, la cartografia, gli strumenti".

Otto sono i codici (riconducibili a tre versioni) che gli autori hanno sottoposto ad una lettura comparata, sia per i dati filologici e tecnici e sia per quelli contenutistici riguardanti la morfologia costiera. Guardando ai profili di Corsica, Sardegna, Mar Ligure, Mar Tirreno la loro attenzione si è concentrata sulle coste insulari e continentali della Toscana.

Gli autori, grazie anche alla collaborazione di due colleghi Turchi, Erendiz Ozbayoglu e Sinan Çuluk, e sfruttando l'abilità paleografica di Elena Cecchi Aste, offrono una nuova traduzione in italiano delle pagine del *Kitab-i Bahriye* per ciò che riguarda le coste toscane nei due tratti dal confine del Lazio a Pisa (comprendente anche l'Arcipelago) e da Pisa alla Liguria

L'opera ottomana viene quindi messa in relazione alla cartografia nautica di produzione europea di periodo precedente, coevo e posteriore anche con l'utilizzo di tabelle. Assai apprezzate dai lettori saranno pure le ampie e aggiornatissime messe a punto generali – per il periodo compreso fra il tardo medioevo e l'età moderna – sulla cartografia nautica, sui portolani, sugli isolari e sui singoli loro autori (tratteggiati questi ultimi con brevi ma puntuali schede bio-bibliografiche), sugli strumenti nautici e

terrestri utilizzati, sui diversi valori metrici del miglio e delle altre unità di misura, sulle tecniche di rilevamento e sull'orientamento spaziale (con l'uso delle rose dei venti non solo per individuare uno o più centri di posizionamento), sulle procedure di riduzione o ingrandimento delle carte.

Nelle pagine dedicate ai cartografi italiani ed europei considerati per il confronto della loro produzione con quella di Piri Reis, spicca la sottolineatura della modernità del genovese Francesco Beccari.

La contestualizzazione del *Kitab-i Bahriye* ha richiesto una ricostruzione preliminare della geografia della Toscana, partendo dai caratteri geografici attuali del litorale continentale e insulare per 'approdare' a quelle che potevano essere le evidenze ambientali-paesistiche territoriali dei tempi di Piri Reis: uno spazio contrassegnato dal frazionamento geopolitico, dalla presenza della malaria e di pochi insediamenti (centri abitati, ma soprattutto torri e fortini isolati). Da qui la delineazione del quadro generale dell'evoluzione fisiografica della costa toscana a partire dagli ultimi 20.000 anni, ovvero a causa dei processi di variazione del livello del mare, e soprattutto a decorrere dagli ultimi 6000 anni per effetto delle attività antropiche.

In questo contesto, particolare attenzione – con un contributo prezioso di nuove conoscenze – è riservata all'analisi del Porto Pisano e dell'Isola d'Elba. Questa analisi puntuale vale a dimostrare la sostanziale peculiarità ed originalità dell'opera di Piri Reis, pur non mancando nel *Libro della Marina* come sottolineato dagli stessi autori "ispirazioni e, talvolta, derivazioni più o meno evidenti": relativamente agli isolari quattrocenteschi del fiorentino Cristoforo Buondelmonti, ritenuto l'inventore del genere, e del veneziano Bartolomeo da li Sonetti, alla cartografia nautica di tanti autori quattrocenteschi soprattutto italiani e alla cartografia terrestre che prese piede soprattutto a partire dall'inizio del XVI secolo.

In effetti, le funzioni del *Kitab-i Bahriye* sono ancora oggi oggetto di discussione, ma tutto lascia credere – con i nostri autori – che esso fu per secoli uno "straordinario ausilio per il commercio marittimo" e, insieme, un importante "strumento della penetrazione militare ottomana in Europa".

Chiara Loii

La costa d'Italia

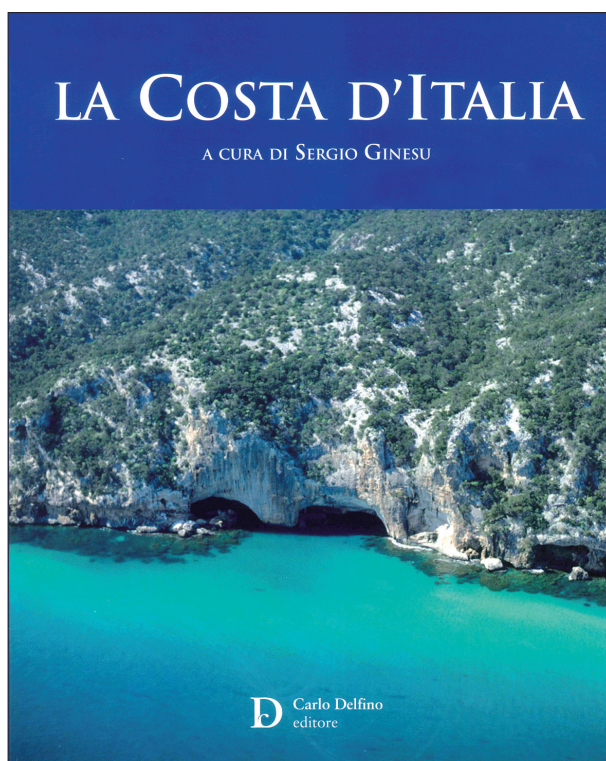
A cura di Sergio Ginesu

Edito da Carlo Delfino editore, Sassari, 2011

Uscito recentemente nelle librerie nazionali, il volume "La costa d'Italia" curato da Sergio Ginesu dell'Università degli Studi di Sassari ed Associato al Consiglio Nazionale delle Ricerche (IBIMET) di Firenze, si pone come un'opera ardua che, per la prima volta, affronta il tema della costa d'Italia da un punto di vista prettamente fisico, associando a questi elementi i caratteri tipici e peculiari dei litorali italiani. La sfida che ci si è posti nella realizzazione di quest'opera è soprattutto quella di riunire un esteso numero di esperti nei numerosi campi di studio sui problemi della costa, cercando di far convergere sull'argomento persone con culture e specializzazioni diverse ma finalizzate comunque alla conoscenza degli aspetti che riguardano la fascia costiera.

È nato così un corposo volume splendidamente redatto dalla casa editrice Carlo Delfino di Sassari, specializzata in opere di pregio, che raccoglie gli scritti di studiosi delle università, degli Enti di Ricerca e delle Associazioni scientifico e culturali che da anni finalizzano le proprie attività di ricerca sulle coste italiane. Il volume è strutturato in due parti ben distinte che affrontano il tema della costa: prima su scala nazionale, con schede che riguardano temi di interesse comuni a molti territori del Paese, e di seguito su scala regionale con schede che riguardano tutte le regioni d'Italia che si affacciano sul mare. Appare subito evidente al lettore l'uniformità e l'approccio metodologico all'argomento; infatti, ogni tema trattato viene considerato con un numero uniforme di spazio, di immagini e di iconografie che rendono il volume particolarmente didattico ed accattivante. Questo schema fa comprendere quanto l'argomento trattato sia ricco di studi ed informazioni che, in un territorio come quello italiano, costituiscono una ricchezza culturale ed un patrimonio economico che pochi paesi al mondo possono vantare.

Nel discorso sul paesaggio costiero non possono mancare anche gli argomenti inerenti la presenza dell'uomo ed il suo contributo alla modificazione stessa di questa porzione di territorio, ampie porzioni del volume sono proprio dedicate a questo argomento sottolineando l'unicità e la singolarità del paesaggio naturale arricchito, e talvolta maltrattato, dall'incessante opera dell'uomo; l'Italia, ombelico del Mediterraneo e da



millenni polo di richiamo per le genti di questo mare, conserva la storia dell'intero "Mare Nostrum" vengono trattate anche le condizioni climatiche che tanto connotano la penisola italiana.

Il principale risultato ottenuto da questa numerosa comunità scientifica è stato quello di cogliere l'occasione per poter comunicare alla gente ed al lettore di qualunque estrazione culturale la conoscenza acquisita in tanti anni di attività di ricerca e di monitoraggio dell'ambiente costiero e, nel contempo, pubblicare un vasto patrimonio di dati, di immagini e di elaborazioni cartografiche che spesso sono state tenute nei cassetti nell'attesa di poter essere pubblicate in un'opera adeguata all'argomento.

Questo libro è una preziosa guida che può accompagnare il lettore e l'esperto in un lungo viaggio attraverso le regioni costiere italiane illustrate con fotografie, immagini, cartografie antiche e moderne che rendono ancora più comprensivo e semplice il contenuto del testo rendendo ancora più accattivante l'argomento. Gli obiettivi che l'iniziativa si è posta sono evidenti dal contenuto delle due parti del volume: quella nazionale e quella regionale. Infatti, emerge chiaramente lo stato di salute e non solo della costa dell'Italia ma anche dei mari che la circondano; proprio da questo argomento si diparte un filo logico sugli avvenimenti, geologici e anche storici, che hanno reso unici molti tratti costieri dell'Italia. Proprio queste unicità sono state anche oggetto di argomenti specifici del volume, atti ad identificare meglio il ruolo dell'uomo nell'occupazione della fascia costiera oppure identificare alcuni processi che intervengono più pesantemente nella dinamica meteomarina. Non ultimo è stato trattato anche il problema della difesa della costa dagli avvenimenti, spesso disastrosi, che caratterizzano la fascia costiera del nostro Paese. Proprio su questo argomento sono stati enunciati gli interventi di difesa realizzati fin dai primi anni dell'unione d'Italia fino alle ultime attività di ricostruzione delle spiagge nel sentiero della nuova filosofia che si sta imponendo nell'intero pianeta. Infine, ci pare indicativo notare, nell'indice, la ricca elencazione delle località considerate, oltre 1000 voci, che potrà rendere più agevole la consultazione del volume.

Il successo dell'iniziativa è quello di essere riusciti a riversare la propria conoscenza al pubblico più vasto, nella convinzione che il ruolo del ricercatore e dello studioso sia quella di non chiudersi in una spirale viziosa delle ricerche e dell'accademia fine a se stessa, ma di beneficiare tutti dell'avanzamento della conoscenza nella convinzione che questo permette la crescita della sensibilità e del rispetto di tutti per quel territorio dell'Italia che, da sempre, ha conquistato, affascinato e fatto sognare il mondo intero.

Giuliano Fierro

Un approccio integrato geomorfologico e vegetazionale per lo studio di campi dunari complessi. L'esempio di Capo Comino (NE Sardegna, Italia).

Integrated assessment of geomorphological and vegetation dynamics in a complex dunefield. Capo Comino case study (NE Sardinia, Italy).

Tesi di Dottorato di Ileana Balduzzi

Relatore: Ilda Vagge

Correlatore: Nicola Corradi

Università degli Studi di Milano, Anno accademico 2010-2011

email: ileanabalduzzi@yahoo.it

L'ambiente costiero è soggetto ad un crescente e continuo utilizzo e a modifiche antropiche. In particolare, lo sfruttamento turistico dei litorali ha avuto un incremento sostanziale specialmente durante il secolo scorso con il risultato di modificare gli ecosistemi naturali. Le spiagge, i sistemi dunari, e gli ambienti umidi sono considerati sistemi fragili, a rischio e la salvaguardia della loro biodiversità nonché del potenziale economico rappresentano importanti temi di studio di programmi di management costiero.

In generale, i sistemi dunari costieri risentono degli effetti dovuti a modifiche naturali ed antropiche e rispondono in modo relativamente veloce ad essi. Ogni cambiamento può portare a sostanziali alterazioni alla qualità e distribuzione delle fitocenosi. Le modifiche risultano ancor più evidenti se gli eventi hanno caratteri estremi, come per le alluvioni o gli eventi meteomarinari eccezionali, che possono erodere i primi cordoni dunari e le fitocenosi presenti, portando a processi di ricostruzione da parte delle specie pioniere. I piani di monitoraggio collegato a questi ambienti risultano fondamentali per una miglior comprensione dei processi presenti e la previsione dell'evoluzione del paesaggio, anche nell'ottica di implementazione i protocolli ICZM. Lo scopo è di proteggere e ricostituire gli ambienti naturali e pianificare una gestione appropriata. Infatti, anche solo considerando il comparto biotico del sistema, è possibile annoverare nel settore di Capo Comino alcuni habitat protetti (Direttiva UE Habitat 92/43/CEE e Natura 2000). Tra essi, l'habitat delle "dune pioniere mobili" (EUR15 per Natura 2000). L'area di Capo Comino è inoltre parzialmente inclusa in un SIC (SIC-ITB020012); un piano di gestione sostenibile, affiancato dal monitoraggio, sarebbe dunque un o strumento fondamentale per proteggerne i suoi caratteri naturali e la biodiversità.

In quest'ottica, lo scopo principale del Dottorato di Ricerca è stato lo sviluppo di una nuova procedura integrata di monitoraggio che descriva la dinamica morfo-sedimentaria e vegetazionale di sistemi dunari complessi. Il monitoraggio vede l'analisi di transetti sistematicamente ripetuti nel tempo attraverso la misura delle principali forme morfologiche e l'integrazione dei dati di distribuzione della vegetazione lungo i profili stessi. Inoltre, campioni di sedimento della spiaggia e del campo dunare, sono prelevati per una miglior informazione riguardante la tessitura del sedimento ed il trasporto eolico.

Il metodo è stato applicato nel settore costiero di Capo Comino (NE Sardegna). Il campo dunare e la spiaggia si sviluppano per circa 3.5 km di lunghezza con orientazione NW-SE ed è caratterizzato da due differenti sistemi dunari costieri: un complesso frontemare di *foredunes/blowouts* ed un complesso di tipo trasgressivo nel settore interno, principalmente caratterizzato da dune di tipo parabolico.

Un'indagine di fotointerpretazione storica condotta su fotografie aeree (1954-1977-2006), propedeutica allo

studio geomorfologico, ha permesso di definire il rate di migrazione del complesso trasgressivo (circa 3.75 m y^{-1}) e i cambiamenti occorsi al sistema costiero, compreso lo spostamento della linea di riva. L'evoluzione morfologica dei sistemi dunare e costiero di Capo Comino ha visto la stabilizzazione degli ampi bacini di deflazione che caratterizzavano la costa a metà del secolo scorso. In particolare, il settore centrale, caratterizzato da dune paraboliche particolarmente dinamiche, si è stabilizzato in un complesso di dune di tipo *hummocky*, mentre il settore trasgressivo interno si è evoluto in un complesso trasgressivo/parabolico con lo sviluppo di un ben definito cordone mediano (*trailing ridge*). Il settore centrale più interno si è invece evoluto in un complesso parabolico, che in alcuni settori risulta attualmente definito da dune paraboliche digitate.

Il contributo portato dalla costruzione delle *sand roses* è risultato fondamentale per la comprensione della direzione di trasporto sedimentario. Infatti, considerando i venti e la relazione con la tessitura dei sedimenti, il trasporto prevalente è risultato essere da NNW verso SSE. Nei settori centrale e meridionale il trasporto medio, però, risulta anche fortemente influenzato da fattori locali, quali le brezze di mare e di terra, che determinano piccole morfologie erosive (*blowout*) orientate a volte in antitesi con quella del generale sviluppo del campo dunare. Il settore settentrionale, invece, è principalmente influenzato dai venti provenienti dai settori marini (soprattutto Grecale) che determinano anche la formazione e l'evoluzione dei *blowouts*.

L'evoluzione della spiaggia e delle dune embrionali fino al primo ordine di avandune è interessato da tempeste marine. Gli eventi più importanti provengono da NE-NNE, mentre le tempeste di Scirocco (SSE) sono parzialmente attenuate dal promontorio di Capo Comino.

L'integrazione dei dati della fotointerpretazione (1954-2006) con i rilievi della linea di riva (2009-2011) e quelli delle indagini batimetriche della spiaggia sottomarina, (che mostrano una debole pendenza della spiaggia e la presenza di più ordini di barre), indica un basso grado di erosione della linea di riva sia nel lungo che breve termine e la spiaggia può essere considerata relativamente stabile ed i principali cambiamenti sono legati a tempeste periodiche che possono erodere le dune embrionali e a volte anche le dune fisse. Il monitoraggio di transetti perpendicolari a riva ha inoltre evidenziato che la dinamica spiaggia-duna è particolarmente attiva e può rapidamente ricostruire le forme morfologiche che sono state erose.

Dal punto di vista floristico-vegetazionale, l'area di Capo Comino mostra le tipiche caratteristiche degli ambienti costieri mediterranei. Lo studio della vegetazione è stato condotto per mezzo del metodo fitosociologico e i risultati mostrano la presenza di 11 associazione vegetali nel campo dunare e 12 nelle aree retrodunali, con la valutazione degli aspetti biologici ed ecologici del settore studiato.

La redazione della mappa della vegetazione del campo dunare di Capo Comino permette la rapida comprensione della distribuzione delle associazioni vegetali, strettamente legata ai bisogni ecologici. Le associazioni vegetali sono distribuite secondo la loro valenza ecologica, definita dalle caratteristiche delle specie e delle comunità che le compongono; ad esempio, le associazioni alofite e nitrofile sono posizionate prossime alla linea di riva mentre le comunità presenti diventano via via meno alo-tolleranti e relativamente più evolute nei settori più interni. L'integrazione dei dati morfo-sedimentologici con la distribuzione delle associazioni vegetali consente di comprendere meglio la dinamica complessiva dei campi dunari. Infatti i risultati mostrano la veloce dinamicità di alcuni settori di studio e la forte sinergia tra l'apparato dunare e la spiaggia. Infatti, nonostante che il periodo di monitoraggio triennale sia breve, è stato possibile notare i processi erosivi dovuti per lo più a tempeste marine e i processi di ricostruzione delle dune con la presenza di nuove - o parzialmente nuove - dune embrionali. Allo stesso modo la vegetazione segue questi cambiamenti. In particolare l'associazione *Sileno corsicae-Elytrigetum juncea*, che caratterizza le dune embrionali, mostra una risposta dinamicamente veloce agli stress ambientali. Le "dune bianche" ad *Ammophila arenaria* sono presenti nei settori centrale e meridionale del campo dunare, vicino alla linea di riva ma anche al top delle dune paraboliche più elevate del complesso trasgressivo. Le "dune fisse a *Crucianellion maritimae*" caratterizzano tutta l'area di studio e sono particolarmente ben sviluppate e conservate nel settore centrale più interno. Le "dune costiere a *Juniperus spp*" sono invece principalmente presenti nel complesso delle foredune/blowout. Dal punto di vista delle metodologie d'indagine integrate i risultati mostrano che è possibile monitorare una vasta area utilizzando un numero limitato di transetti, che la procedura integrata è precisa ed efficiente e la sua esecuzione è più veloce rispetto all'analisi dell'intero campo dunare. Queste risultano particolarmente efficienti per sviluppare piani di monitoraggio continui nel tempo e piani di gestione appropriati, strumenti fondamentali per migliorare i protocolli ICZM e contribuire alla conservazione degli ecosistemi naturali costieri.

Norme per gli Autori

Studi costieri pubblica articoli scientifici originali in lingua italiana su argomenti relativi alla dinamica e difesa dei litorali ed alla gestione integrata della fascia costiera. Gli articoli scientifici sono sottoposti a revisione da parte di due esperti indicati dal Comitato scientifico.

Studi costieri pubblica anche Note tecniche e Riassunti di tesi di Laurea e di Dottorato di ricerca inerenti gli stessi temi. **Studi costieri** ospita inoltre rapporti sull'attività svolta da Amministrazioni pubbliche in materia di gestione integrata della fascia costiera. Questi ultimi due tipi di contributi sono soggetti solo ad una revisione di tipo redazionale.

Gli Autori degli articoli sono pregati di rispettare le seguenti norme. Gli articoli non redatti in piena conformità con esse non potranno essere presi in considerazione per la pubblicazione.

I manoscritti devono essere inviati in triplice copia con allegare figure e tabelle. Dopo l'accettazione deve essere inviata la copia definitiva su CD o per posta elettronica secondo le istruzioni riportate in seguito.

Titolo - Massimo 150 caratteri inclusa la spaziatura fra le parole.

Titolo corrente - Massimo 80 caratteri inclusa la spaziatura fra le parole.

Autore/i - Nome e Cognome per esteso, seguito da un numero in apice per indicare l'eventuale Istituto di appartenenza ed il relativo indirizzo.

Riassunto - Non più di 2.000 caratteri inclusa la spaziatura fra le parole.

Parole chiave - Inserire 5-8 parole chiave, possibilmente non già comprese nel titolo.

Abstract - Riassunto, anche esteso, in lingua inglese di non più di 5.000 caratteri.

Keywords - In questo caso le parole chiave possono anche essere la traduzione di termini compresi nel titolo.

Stile - Adeguarsi allo stile dei lavori pubblicati su questo numero. Tutti i testi, compreso il titolo generale e quello dei paragrafi, devono essere scritti in Maiuscolo e minuscolo, carattere Garamond. Non inserire caratteri strani, di formato diverso o sottolineati. Il neretto è utilizzato solo per il titolo dei paragrafi.

Eventuali sottoparagrafi possono portare un titolo in corsivo neretto. Non inserire righe bianche nel testo se non alla fine dei paragrafi e dei sottoparagrafi.

Evitare il più possibile i rientri e, comunque, farne di un solo ordine. Gli elenchi puntati sono identificati da -, 1) oppure a); ogni elemento dell'elenco è chiuso con ; salvo l'ultimo che chiude con un punto.

Formule - Se possibile utilizzare il formato testo; in alternativa l'editore di formule di Word impostando il carattere Garamond corpo 11 chiaro (corpo 9 nero se le formule sono incluse in una didascalia di figure o di tabella). Utilizzare caratteri in neretto e corsivo solo se imposto dalla nomenclatura internazionale.

Tabelle - I caratteri alfabetici/numerici per le tabelle sono in stile Garamond corpo 10. Le Tabelle sono identificate con Tabella n, oppure (Tab. n) se fra parentesi. Devono essere precedute da una didascalia. Non inserire tabelle in forma di immagini.

Figure (fotografie, schemi, diagrammi) - Salvo accordi specifici con la Redazione, vengono pubblicate solo figure in bianco e nero. Le Figure sono identificate con Figura n, oppure (Fig. n) se fra parentesi. Tutte le figure devono avere una didascalia. La larghezza massima a stampa delle figure è 15 cm. Ad eccezione

delle figure stampate a giustezza piena, tutte le altre non potranno avere una base superiore a 10 cm. La Redazione è a disposizione per discutere aspetti tecnici relativi a questo punto.

Note a piè di pagina - Sono da evitare il più possibile e, se lunghe o numerose, verranno riportate in corpo minore in fondo all'ultima pagina dell'articolo con richiami numerici nel testo. Indicazioni di Progetti e Finanziamenti verranno inserite prima della Bibliografia con gli eventuali Ringraziamenti.

Riferimenti bibliografici - Nell'articolo le citazioni sono racchiuse fra () con il seguente formato: (Verdi, 1990) o (Rossi e Verdi, 1989); (Verdi et al., 1987) qualora il numero degli Autori sia maggiore di due. Se citato nell'ambito di una frase il nome di un Autore (1995) è seguito dall'anno della pubblicazione a cui si fa riferimento.

Bibliografia - Tutti e solo i lavori citati nel testo devono comparire in Bibliografia. La Bibliografia deve essere in ordine alfabetico per cognome; es.:

Bianchi A., Rossi V. e Verdi T. (1999) - *Nuovi metodi di difesa dei litorali*. Studi costieri, 19: 153-157 (19 è il numero del fascicolo, 153-157 le pagine).

Neri A. e Rossi C. (1978) - *Elementi di geomorfologia costiera*. Nessuno Ed., Roma. pp. 324.

Violi K. (1998) - *Il ripascimento dei litorali in Italia*. Atti XXI Congr. Soc. Ital. Geomorfologia. Bari. pp. 34-76.

Evitare di usare AA.VV., anche se il numero degli Autori è elevato.

Versione definitiva - Il file contenente la versione definitiva dell'articolo, in Word per Windows, deve essere inviato dopo la comunicazione di accettazione del manoscritto. Il testo non deve essere giustificato e, fatta eccezione per le formule scritte con l'editore specifico, può essere scritto con qualsiasi carattere.

Le didascalie delle figure (grafici e foto) dovranno essere inserite nel testo nel punto più opportuno.

Le figure dovranno essere inviate in file separati (.tif o .jpg a 300 DPI alla dimensione di stampa) e salvate con il nome del primo Autore seguito da Fig n (es. Rossi Fig 1.tif). Figure costituite da più parti devono essere montate dagli Autori in un file unico.

Per evitare errori di importazione, è preferibile ricevere le formule, singolarmente e numerate, in formato immagine .tif o .jpg a 300 DPI.

Altre informazioni - Nella preparazione degli articoli si tenga conto del fatto che una buona impaginazione necessita di un elevato rapporto testo/figure. Anche se gli Autori non devono procedere all'impaginazione dell'articolo, è bene che operino in modo tale da facilitare l'inserimento di ciascuna Figura dopo il rispettivo richiamo. Analogo discorso vale per le Tabelle.

Diritti d'autore - Nella lettera di accompagnamento del manoscritto gli autori, o anche uno solo di essi, devono dichiarare che quanto contenuto nell'articolo è di loro proprietà e che autorizzano l'Editore a pubblicare tutto il materiale da loro inviato. Nel caso di utilizzazione di figure tratte da altra pubblicazione gli Autori dovranno inviare l'autorizzazione alla stampa dell'Editore proprietario dei diritti. Analogamente deve essere fatto per riprese aeree e per la cartografia.

Il Direttore della collana si ritiene autorizzato ad utilizzare gli articoli per eventuali ristampe o per l'edizione di volumi tematici. Di ciò verrà comunque data notizia agli Autori.

Estratti - È prevista la stampa di 100 estratti per ciascun articolo. Agli Autori è richiesto un contributo di € 26 +IVA per pagina pubblicata in bianco e nero sulla Rivista. Gli Autori sono pregati di inviare, insieme alle bozze corrette, le indicazioni necessarie per l'intestazione della nota di debito.

I manoscritti devono essere inviati alla **Redazione di Studi costieri**
c/o Dipartimento di Scienze della Terra
Borgo Albizi, 28 - 50122 Firenze
Tel. 055 2479241 - Fax 055 2001618
E-mail: serena.ferri@unifi.it