

Studi costieri

Dinamica e difesa dei litorali - Gestione integrata della fascia costiera

N. 14
2008



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
E-mail: enzo.pranzini@unifi.it

Redazione: **Serena Ferri**

E-mail: serena.ferri@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
Leandro D'Alessandro - Chieti
Giuliano Fierro - Genova
Leopoldo Franco - Roma
Giovanni Battista La Monica - Roma
Alberto Lamberti - Bologna
Gianfranco Liberatore - Udine

Elvidio Lupia Palmieri - Roma
Giuseppe Matteotti - Padova
Alberto Noli - Roma
Arturo Ragone - Napoli
Giulio Scarsi - Genova
Umberto Simeoni - Ferrara
Sandro Stura - Genova
Ugo 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 14

Indice

Un contributo allo studio della variazione della linea di costa del litorale ferrarese settentrionale Andrea Chiorboli e Marco Gatti	pag. 3-12
Influenza del fattore scala sulla classificazione delle spiagge in base alla loro tendenza evolutiva Enzo Pranzini e Daniela Simonetti	pag. 13-28
L'intervento di stabilizzazione del litorale de Le Lame (Parco San Rossore Migliarino Massaciuccoli, Toscana) Enzo Pranzini	pag. 29-42
L'utilizzazione di immagini telerilevate ad alta risoluzione per lo studio dell'erosione costiera: estrazione della linea d'acqua e valutazione della sua accuratezza Sara Carli, Niccolò Iandelli, Enzo Pranzini e Rosamaria Salvatori	pag. 43-54
Studio dell'evoluzione della linea di costa della piana del Sele (Campania) mediante l'uso della cartografia numerica compreso tra la foce del torrente Sinarca e Campomarino Lido (Molise, Italia meridionale) Giuseppe D'Acunzi, Tommaso De Pippo, Carlo Donadio, Francesco Peduto, Ugo Santoro, Francesco Sessa, Francesco Terlizzi e Maria Donata Turturiello	pag. 55-68
Stima dell'affidabilità di opere marittime: un caso esemplificativo Piero Ruol, Luca Martinelli e Alberto Lamberti	pag. 69-90
Espressione analitica della formula di Hsu ed Evans per baie in equilibrio statico Mario Mita	pag. 91-102
Indagine sperimentale in vasca per la verifica della stabilità degli interventi di ripascimento sul litorale di Spinesante e S. Francesco ad Ischia Michele Di Natale, Stefania Di Ronza, Caterina Eramo e Roberto Greco	pag. 103-116
Verifica sperimentale di strutture per la protezione al piede di un intervento di ripascimento Michele Di Natale, Stefania Di Ronza, Caterina Eramo e Roberto Greco	pag. 117-134
Tesi	pag. 135-140
Norme per gli autori	pag. 141-142

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

ISSN 1129-8588

Un contributo allo studio della variazione della linea di costa del litorale ferrarese settentrionale

Andrea Chiorboli e Marco Gatti

Dipartimento di Ingegneria, Università degli Studi di Ferrara
via Saragat,1 - 44100 Ferrara. Tel. 0532-974837, Fax 0532-974870
E-mail: andrea.chiorboli@unife.it - marco.gatti@unife.it

Riassunto

Nel presente lavoro, dopo una breve ricostruzione storica della variazione della linea di costa di tutto il litorale ferrarese, è presentato uno studio sulla variazione planimetrica di un tratto di litorale affacciato sul mare Adriatico, posto in corrispondenza del Lido di Volano di una lunghezza complessiva di circa 4.5 km, delimitato a sud da scogliere aderenti e pennelli ed a nord dalla foce del Po di Volano.

Dai risultati ottenuti durante le campagne di rilievo GPS effettuate nel periodo 1999-2007, si evince che, negli ultimi anni, la tendenza erosiva presente nella zona attrezzata della spiaggia antistante il Lido di Volano si è attenuata, mentre risulta elevato il ritmo di accrescimento della porzione più a nord, priva peraltro di insediamenti balneari.

Parole chiave: erosione, GPS, litorale sabbioso, monitoraggio.

Abstract

In the present article, after a brief historical reconstruction of the waterfront variation of the whole seacoast of the province of Ferrara (Italy), we describe the last years trend of a portion of the waterfront close to the Lido di Volano (Ferrara). The Northern edge is the Po di Volano outfall, whereas the Southern one is made by sea defence works.

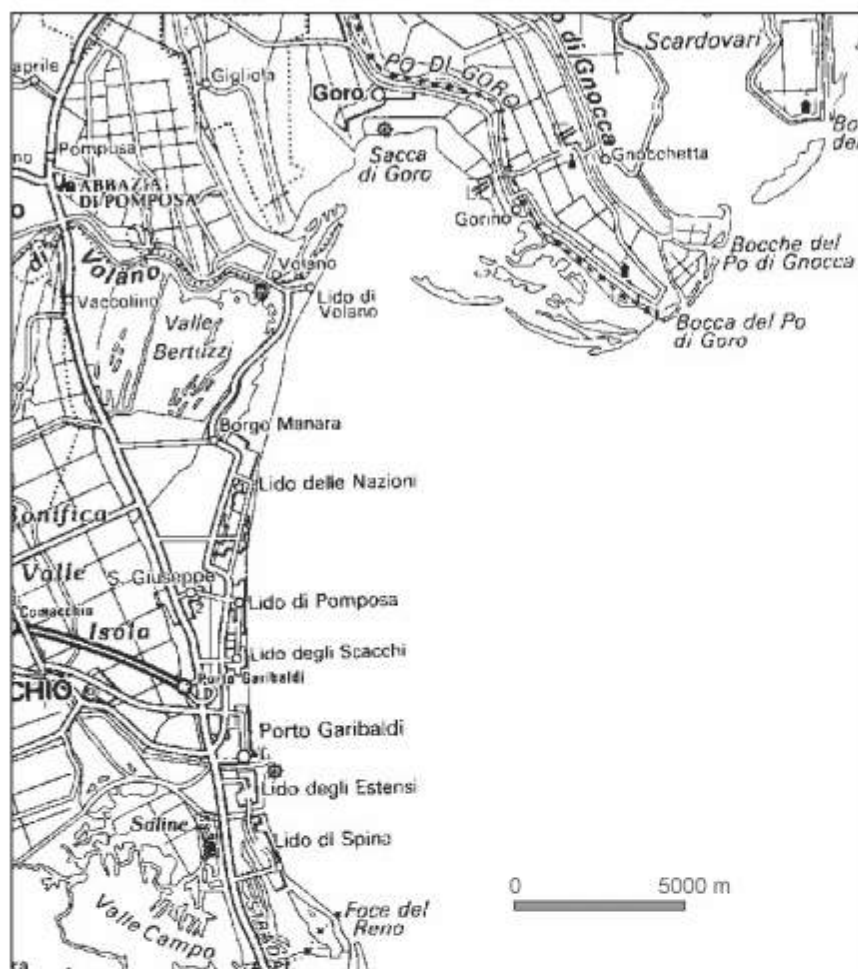
The GPS surveyings have been carried out during the period 1999-2007. During the earlier period, the natural tendency of the beach erosion along the main tourist part of Lido di Volano has been softened. The Northern beach tract, on the contrary, has seen a fast advancement.

Keywords: erosion, GPS, sandy beach, monitoring.

Introduzione

La costa della provincia di Ferrara, che si affaccia sul mare Adriatico a nord dalla foce del Po (Fig. 1), è costituita da litorali sabbiosi a bassa pendenza, in cui si alternano tratti dotati di insediamenti balneari a tratti di spiaggia pressoché naturale. Per le sue caratteristiche essa subisce sensibili variazioni geometriche nel corso degli anni. Fra le cause che contribuiscono a tali variazioni vanno ricordate le variazioni dell'apporto dalle estrazioni in alveo, l'effetto combinato dei trasporti delle correnti da moto ondoso e delle opere artificiali solido fluviale indotte costruite in corrispondenza della linea di costa, i fenomeni di subsidenza naturale ed antropici, l'innalzamento del livello del mare, lo smantellamento delle difese naturali (dune) in corrispondenza delle spiagge e l'azione dei venti dominanti (Dal Cin, 1983).

Va anche ricordato che nella zona sono stati effettuati negli ultimi anni interventi di ripascimento artificiale, con il conseguente trasferimento di elevate quantità di materiale sabbioso, generalmente prelevato nelle zone di maggiore accrescimento delle spiagge.



Questi interventi sono effettuati generalmente durante il periodo primaverile.

Figura 1 - La costa ferrarese, sul mare Adriatico, delimitata a sud dalla Foce del Reno ed a nord dalla Bocca del Po di Goro (CTR estratta dal portale cartografico SIG della Provincia di Ferrara).

In particolare, nel tratto considerato, durante periodo 1999-2007, sono stati effettuati 9 interventi di ripascimento, per un trasporto totale di sabbia di circa 220 mila m^3 (Tab. 1). Le fonti di prelievo utilizzate sono state:

- fonti esterne, quali il riciclo delle sabbie prelevate durante le pulizie delle spiagge ed i prelievi effettuati nella zona a ridosso del canale Logonovo del Lido degli Estensi (Fig. 1);
- il canale marino del porto di Goro, posto a poche centinaia di metri al largo delle spiagge del lido di Volano, oggetto di periodici dragaggi;
- la spiaggia posta a nord dell'abitato di Lido di Volano, caratterizzata dalla formazione costante di depositi sabbiosi e pertanto in continuo avanzamento.

Il monitoraggio di questa linea di costa è avvenuto attraverso diverse tecniche: fotogrammetria, GPS e, più recentemente, anche attraverso laser scanner aereo (Regione Emilia Romagna, 2004).

La tecnica GPS è ad oggi la più competitiva, in quanto permette, al contrario delle altre citate, una corretta valutazione della linea di costa, depurata dagli effetti dalle maree e valutata secondo il livello medio del mare, nonché la valutazione dei volumi attraverso la ricostruzione dei profili longitudinali. Inoltre consente, su brevi tratti di costa, la ripetibilità ravvicinata nel tempo, con investimenti modesti.

Nell'articolo, dopo un sintetico richiamo all'evoluzione morfologica del litorale ferrarese, vengono descritte le variazioni della linea di costa subite nel periodo 1999-2007, con particolare riferimento ad un tratto di litorale prospiciente il Lido di Volano. Le misure oggetto dei confronti sono state ottenute prevalentemente da rilevamenti GPS, in modalità differenziale o ad una via, a cui sono stati apportate le corrispondenti correzioni altimetriche di marea.

Tabella 1 - Interventi di ripascimento effettuati nel periodo 1999-2007 (dati forniti dal Servizio Tecnico Bacino Po di Volano della Regione Emilia-Romagna).

Progr.	Anno	Provenienza della sabbia	Area di ripascimento	Collocazione sabbia	Tratto [Km]	Volume [m ³]	Volume unitario
1	2002	Esterna	Lido di Volano Sud	Dune di retrospiaggia	1	13700	14
2	2002	Esterna	Lido di Volano Sud	Dune di retrospiaggia	0.2	3300	17
3	2003	Esterna	Lido di Volano Sud	Spiaggia emersa	1.2	37000	31
4	2003	Canale marino porto di Goro	Lido di Volano Sud	Spiaggia sommersa	1.2	51000	43
5	2004	Esterna	Lido di Volano	Spiaggia emersa e sommersa	0.2	4700	24
6	2005	Canale marino porto di Goro	Lido di Volano Sud e Nord	Spiaggia emersa e sommersa	0.9	68000	76
7	2006	Parzialmente dalla spiaggia a nord del Lido di Volano e parz. dall'esterno	Lido di Volano	Spiaggia emersa	0.7	15000	21
8	2007	Parzialmente dalla spiaggia a nord del Lido di Volano e parz. dall'esterno	Lido di Volano	Spiaggia emersa	0.2	16000	80
9	2007	Spiaggia a nord del Lido di Volano	Lido di Volano	Spiaggia emersa	0.8	9800	12

Evoluzione generale dell'intero litorale ferrarese fino al 1999

A partire dallo studio di mappe catastali e foto aeree sono state calcolate le variazioni geometriche medie del litorale ferrarese dal 1811 fino al 1999 (Bergamini e Gatti, 2005). Secondo queste analisi, dal 1811 al 1977, vi è una sostanziale compensazione fra le aree complessive di avanzamento e quelle di arretramento. In particolare, dal 1950 al 1978, la fascia compresa fra il confine ed il molo di Porto Garibaldi è risultata in avanzamento, con un valore medio di circa 10 m/anno, mentre il restante tratto, posto a nord di Porto Garibaldi fino alla foce del Po di Volano, ha visto un arretramento medio di circa 2 m/anno. I risultati vengono giustificati dal bilancio annuale del trasporto dei sedimenti, con risultante in direzione nord (Dal Cin, 1983), che vede un deposito in corrispondenza dell'imbocco del porto-canale di Porto Garibaldi causato dalla presenza di opere di difesa.

Dal periodo delle campagne aerofotogrammetriche per la realizzazione delle CTR (1973-78) al 1999, si è notato un lieve arretramento della costa in corrispondenza della foce del Reno, mentre più a nord, fino al molo di Porto Garibaldi, l'avanzamento si è mostrato continuo, con media di circa 3 m/anno. Grazie anche all'introduzione di opere di difesa, il "trend" di arretramento del tratto posto immediatamente a nord del molo del Porto Garibaldi si è invertito, segnando un lieve avanzamento valutabile in circa 1 m/anno. Segue poi un tratto in lieve arretramento, oggetto in seguito di interventi di difesa, per poi avere di nuovo un "trend" di avanzamento nel tratto costiero a nord del Lido di Volano, esaminato di seguito nel dettaglio.

Studio della variazione della linea di costa

Per l'esame dettagliato del tratto di costa, ci si è avvalsi delle seguenti fonti:

- mappe ottenute con rilevamenti topografici classici (1949);
- foto interpretazione di immagini aeree (1986);
- rilevamenti GPS diretti, ripetuti a cadenza annuale dal 1999 al 2007.

Le linee di costa ottenute da rilevamenti topografici classici, da foto interpretazione e da immagini satellitari sono polilinee istantanee, dedotte all'atto della misura o della presa. L'incertezza sulla posizione planimetrica della linea di costa dovuta alla tecnica di misura va sommata all'escursione prodotta dal livello del mare in quel particolare istante. Poiché queste metodologie di rilievo non consentono di ottenere i profili trasversali in corrispondenza della linea di battigia, non è possibile apportare alcuna correzione al fine di ricostruire l'andamento della linea di costa in corrispondenza dello zero idrometrico del livello del mare.

I rilevamenti GPS (periodo 1999-2007) sono stati effettuati in due diverse modalità:

- a) rilevamenti con metodo STOP and GO in post-processo; questa modalità prevede l'utilizzo di un ricevitore "master", statico, posto su un caposaldo di coordinate note e di uno o più ricevitori "rover", con i quali si rileva la linea di battigia (Gatti et al., 2000). Le coordinate tridimensionale dei punti battuti sono caratterizzate da errori quadratici medi non superiori ai dieci centimetri (Gatti et al., 1995);
- b) rilevamenti eseguiti in modalità RTK ad una via eseguiti con ricevitore GPS Navcom, con l'utilizzo dei segnali di correzione del sistema Starfire (Chiorboli e Gatti, 2004). Il sistema Starfire è caratterizzato da una precisione, nella determinazione di dislivelli e nel posizionamento planimetrico relativo a breve distanza, di circa ± 20 cm sia sulla componente orizzontale che verticale.

La procedura illustrata nel presente lavoro permette invece il confronto di una serie di posizioni della linea di costa, valutata in intervalli temporali distanziati di uno o più anni. Si tratta necessariamente di una serie temporale di diverse linee di costa ottenute nei giorni specifici dei rilevamenti, passibili di variazioni improvvise per eventi meteorologici, che tuttavia permettono di ottenere analisi globali specialmente nel medio e lungo periodo.

Altri studi (Ciavola e Corbau, 2002) si sono concentrati sulla valutazione ad intervalli temporali mensili dell'andamento della linea di costa e delle sezioni trasversali, dimostrando la correlazione fra mareggiate di energia variabile ed il conseguente trasporto di materiale dalla battigia al largo e viceversa.

Correzioni di marea

Dalle linee di costa istantanee rilevate con la tecnica GPS è possibile isolare l'effetto della marea, individuando così una linea di costa prodotta da un livello del mare corrispondente allo zero idrometrico.

In effetti, le linee ottenute dal "post processing" dei dati GPS, rappresentano la posizione istantanea della linea di costa nel momento dell'esecuzione del rilevamento in quel particolare tratto. Ora, poiché il rilevamento stesso richiede alcune ore per essere completato, ne consegue che in quello stesso arco temporale la quota del mare subisce la variazione dovuta alle maree, pertanto anche la linea di costa istantanea subisce delle variazioni rispetto alla linea di costa corrispondente alla quota teorica dello zero idrometrico del mare. Allo scopo di isolare tale effetto, si è proceduto con il metodo delle correzioni delle maree (Borghesi et al., 2000).

Il metodo prevede:

- a) il rilevamento della linea di costa istantanea; essa può essere definita come "la linea di contatto tra mare e terraferma, ovvero l'intersezione tra la superficie che rappresenta il livello medio del mare e la superficie del terreno" (Fig. 2);
- b) il rilevamento di sezioni trasversali ortogonali alla linea di costa, distanziate di circa 150-200 m, con punti sia esterni che interni al mare, fino alla profondità di circa 1 m. Per ciascuna sezione è necessario rilevare la posizione, in modalità statica, del punto corrispondente alla linea di costa istantanea, associando ad esso l'indicazione dell'ora di misura. Dalla conoscenza di questo dato e dell'andamento della marea giornaliera rilevata dal più vicino mareografo del Servizio Mareografico Nazionale APAT (mareografo Porto Corsini, a circa 45 km dal Lido di Volano, www.idromare.com), è possibile ricavare la correzione da apportare alla quota istantanea del mare per riportarsi allo zero idrometrico, nonché le quote di alta e di bassa marea corrispondenti a quella sezione. In questo modo, la linea di costa prodotta da livello fittizio del mare corrispondente allo zero idrometrico è immediatamente confrontabile con altre linee di costa ottenute in rilevamenti precedenti. Infatti, poiché la spiaggia è sabbiosa, a bassa pendenza, la fascia intertidale si aggira attorno ai 10 m, ma in alcuni tratti può raggiungere alcune decine di metri.

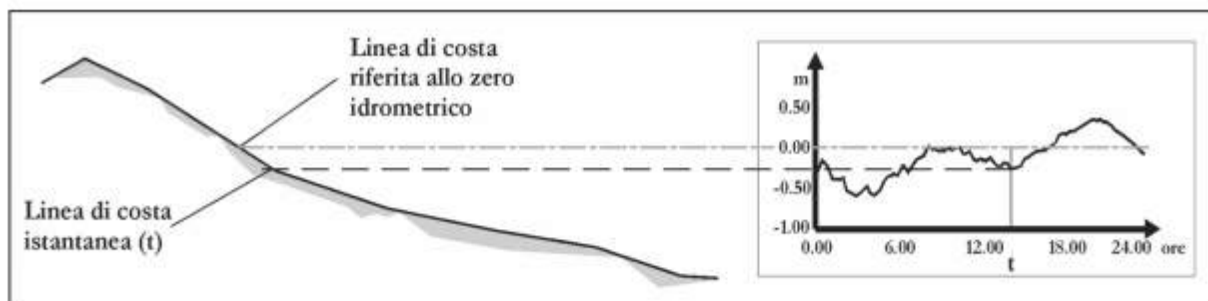


Figura 2 - Costruzione della linea di costa associata al livello medio del mare, con l'utilizzo dei grafici del livello (a destra) ottenuti dalla più vicina stazione di misura della Rete Mareografica Nazionale.

Evoluzione della linea di costa

Vengono di seguito illustrati gli andamenti della linea di costa del tratto di spiaggia posto nei pressi del centro turistico di Lido di Volano, in un tratto della lunghezza complessiva di circa 4.5 km, delimitato a sud da opere di difesa costiera ed a nord dalla Foce del Po di Volano. Le analisi presentate riguardano:

- il confronto fra linea di costa del 1949 e quella relativa al 2007;
- il confronto fra linea di costa 1986 e quella relativa al 2007;
- l'andamento tendenziale degli ultimi anni, dal 1999 al 2007 compresi.

Per convenzione, i valori di seguito riportati sono indicati con segno positivo se associati ad un avanzamento, mentre con segno negativo sono indicati gli arretramenti.

Confronto fra linea di costa 1949 e 2007

Durante il periodo 1949-2007 (Fig. 3, a sinistra) il tratto di litorale è risultato complessivamente, tranne un breve tratto, in avanzamento. Le velocità medie si attestano su valori compresi fra 1 e 4 m/anno nel tratto centrale, sede degli stabilimenti balneari, mentre a nord dello scanno, in corrispondenza della foce del Po di Volano, si sono riscontrate velocità decisamente superiori (circa 6 m/anno), con una vera e propria traslazione del fronte verso il largo di oltre 300 m.

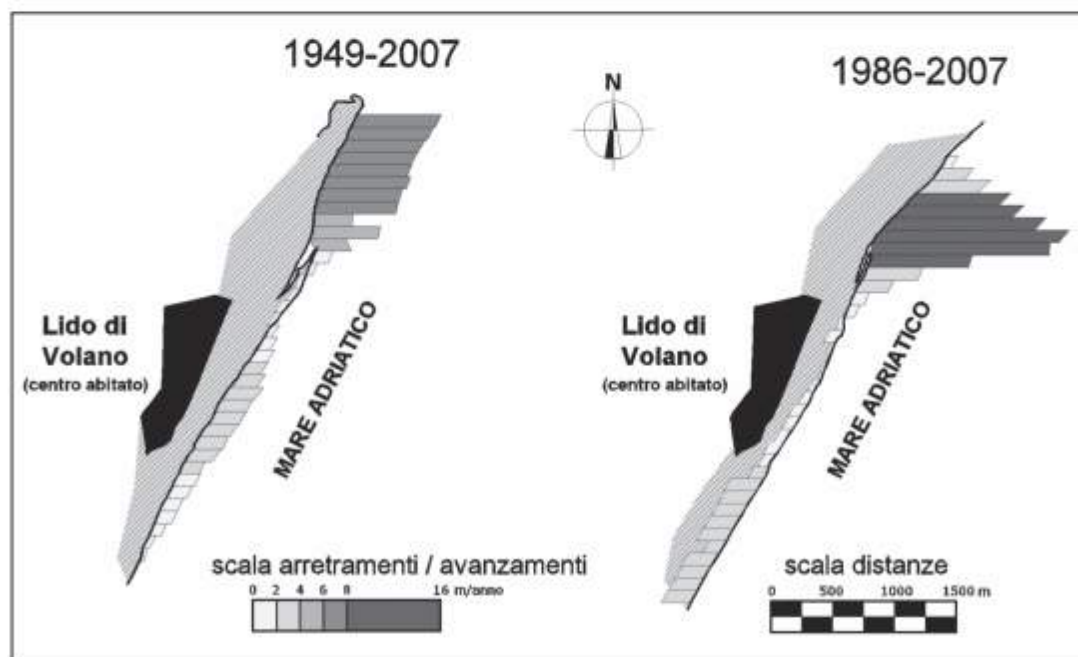


Figura 3 - Tratti in avanzamento e in arretramento valutati nei periodi 1949-2007 (a sinistra) e 1986-2007 (a destra).

Confronto fra linea di costa 1986 e 2007

Fra il 1986 ed il 2007 (Fig. 3, a destra), nel tratto meridionale vi è stata erosione, con arretramenti che oscillano fra 50 m e 10 m nella zona degli stabilimenti balneari. Elevate invece le velocità di avanzamento nel tratto settentrionale, con avanzamenti complessivi compresi fra i 50 e i 350 m.

Andamento ricavato dai rilevamenti GPS dal 1999 al 2007

Nel periodo 1999-2007, con le modalità di rilevamento GPS precedentemente descritte, sono state eseguiti rilevamenti a cadenza periodica annuale o biennale. Tipicamente, il rilevamento è stato eseguito alla fine del mese di maggio degli anni interessati, appena prima dell'apertura della stagione turistica e dell'inizio delle attività delle strutture ricettive, tranne per la campagna di misure 2007 eseguita nel mese di febbraio.

Nel periodo 1999-2002 (Fig. 4) il tratto settentrionale, composta da spiaggia naturale, è risultato in notevole avanzamento. Le caratteristiche di questa zona, con spiaggia a bassa pendenza, permettono una variazione notevole della linea di costa anche a fronte di apporti di materiale modesti. Il tratto centrale, sede delle infrastrutture turistiche, è risultato in lieve arretramento, così come il tratto più meridionale. Nel periodo 2002-2004, la zona considerata è risultata in prevalente arretramento, nonostante gli interventi di ripascimento (Tab. 1) e la costruzione dei pennelli nella zona a sud, avvenuta nell'inverno 2002-2003. Nel periodo 2004-2006, la zona centrale e la zona meridionale si sono dimostrate sostanzialmente invariate, grazie anche agli interventi citati, a fronte di una continua tendenza di avanzamento del tratto settentrionale.

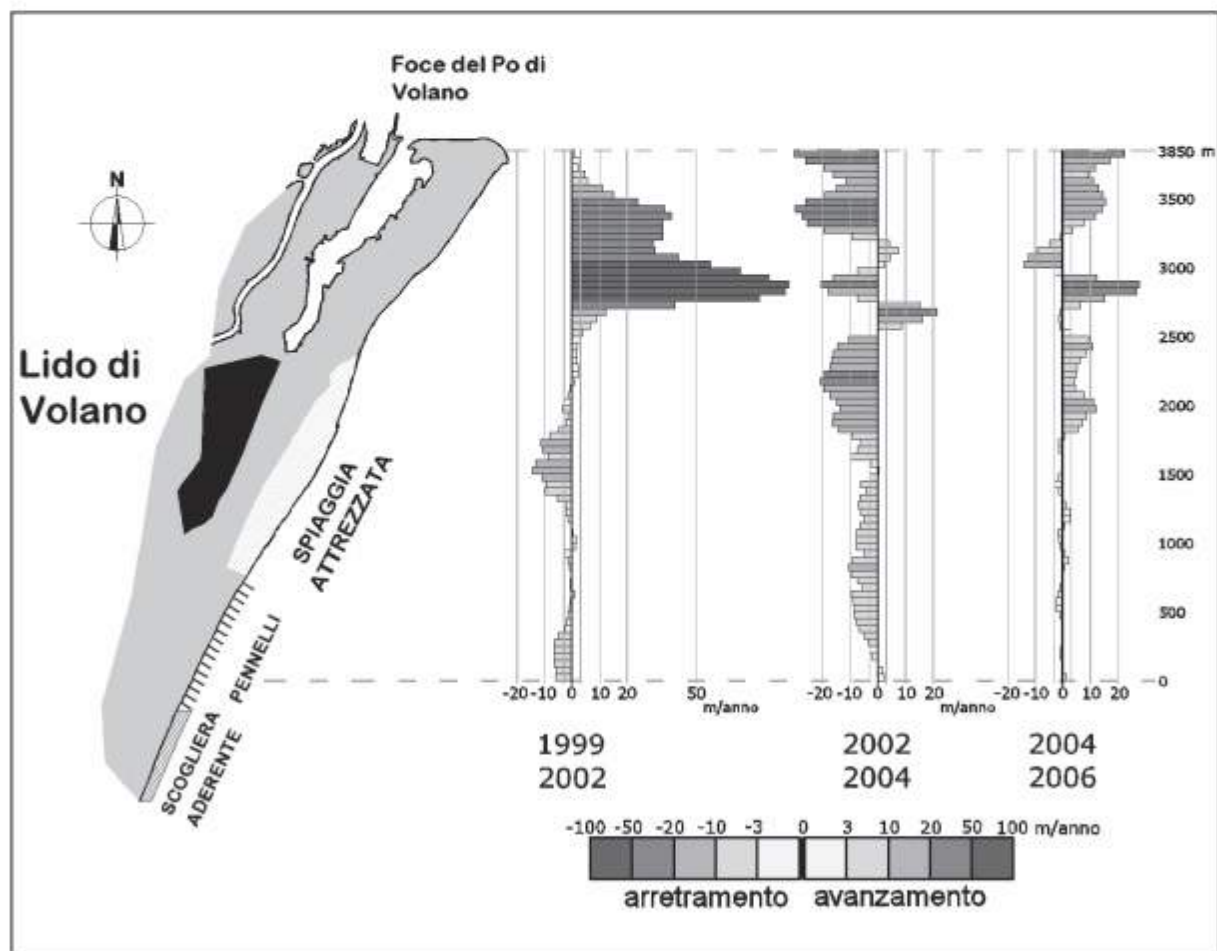


Figura 4 - Andamento della linea di costa nei periodi 1999-2002, 2002-2004 e 2004-2006.

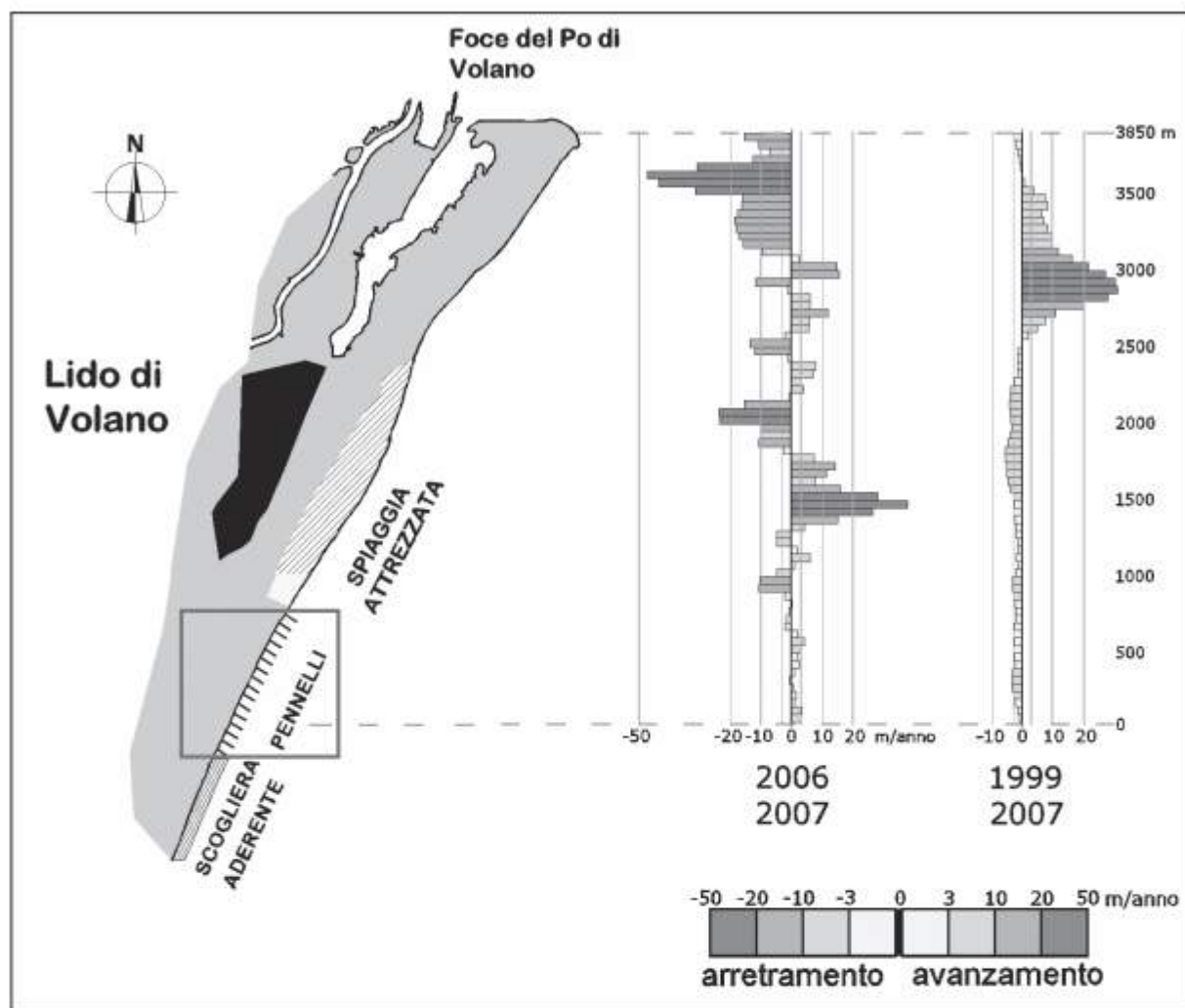


Figura 5 - Andamento della linea di costa nel periodi 2006-2007 ed andamento globale nel periodo 1999-2007. La zona contrassegnata dal riquadro è esaminata in dettaglio nella Figura 6.

Il periodo 2006-2007 (Fig. 5) vede un notevole arretramento della zona settentrionale, per la quale valgono tuttavia le considerazioni al riguardo, relative alla bassa pendenza della linea di costa e all'escursione elevata che si ha anche con modeste variazioni della quota della fascia costiera.

Ai fenomeni naturali, occorre poi aggiungere l'effetto dei ripascimenti attuati nella zona centrale, per i quali la zona di spiaggia posta fra il termine settentrionale della spiaggia attrezzata e la foce del Po di Volano è stata usata come punto di prelievo del materiale (Tab. 1).

L'andamento medio valutato nel periodo 1999-2007 offre una visione maggiormente indipendente da fenomeni locali e transitori. L'estremità settentrionale è risultata in lieve arretramento, ma la zona immediatamente vicina ha subito un avanzamento con velocità medie superiori a 5 m/anno fino a 30 m/anno. Diversa invece la situazione nella zona centrale, in lieve arretramento, pur se il "trend" si è nell'ultimo periodo invertito mostrando zone di recupero, con avanzamento del litorale.

La zona meridionale vede una velocità media di arretramento, valutata nei periodi 1986-1999 e 1999-2007, di circa 2 m/anno (Fig. 6). Tuttavia negli anni più recenti, in questo tratto, grazie agli interventi di ripascimento ed alla presenza di strutture di difesa a pennelli, la tendenza erosiva è stata rallentata, come risulta dall'andamento mostrato nei periodi 2006-2007, con segni di avanzamento, seppure di modesta entità (Fig. 5).

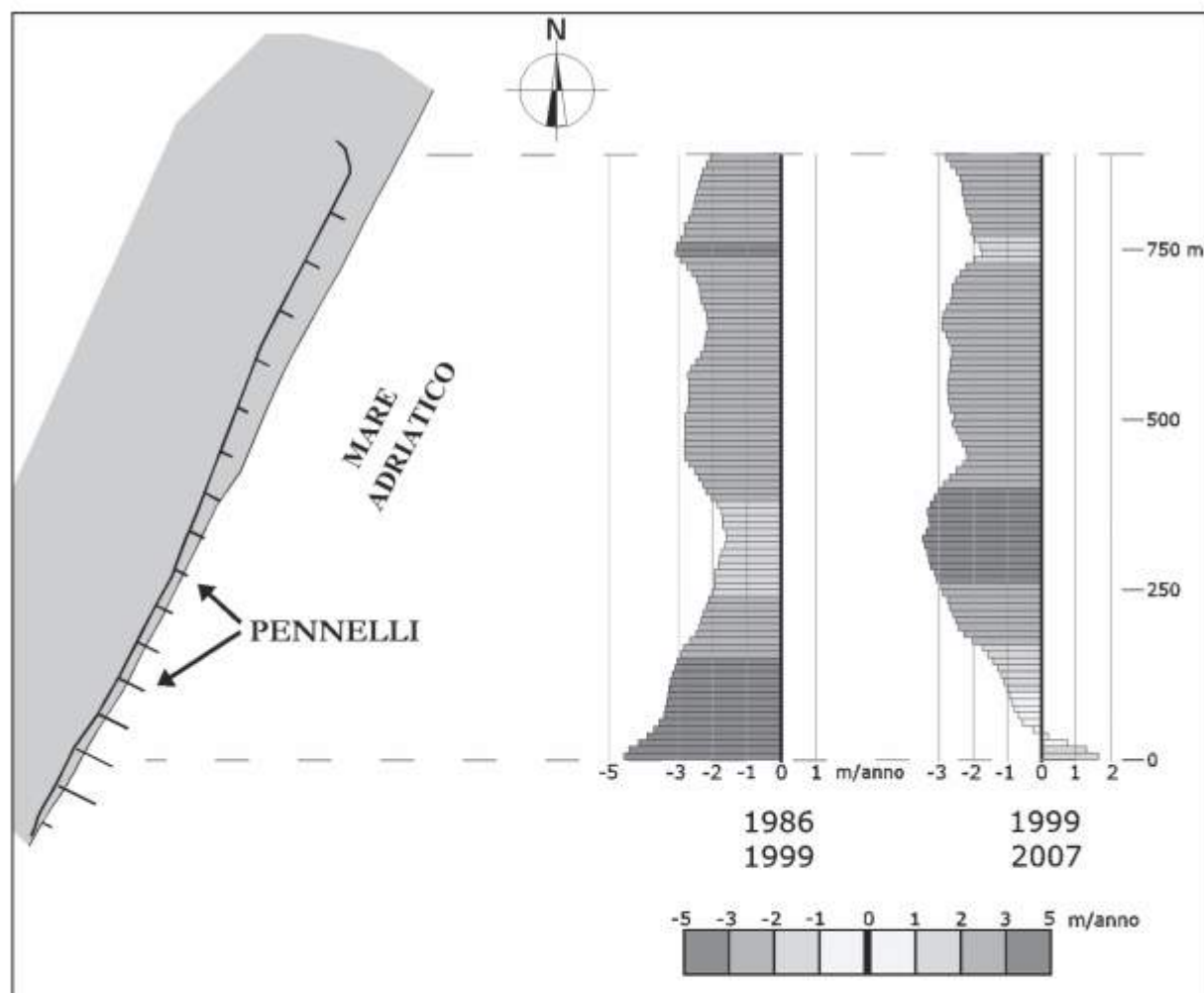


Figura 6 - Velocità di erosione/accrescimento nella zona dei pennelli (costruiti nell'inverno 2002-2003) nei periodi 1986-1999 e 1999-2007.

Il bilancio complessivo delle superfici di avanzamento e di arretramento (Tab. 2) per ciascun periodo vede un alternarsi dei periodi a bilancio positivo (1999-2002 e 2004-2006) con periodi a bilancio negativo e quindi di erosione prevalente (2002-2004 e 2006-2007).

Nell'intero periodo considerato, dal 1999 al 2007, il valore complessivo della superfici di avanzamento risulta essere pari a 10.97 Ha, mentre l'arretramento ha comportato una perdita di 5.87 Ha di spiaggia per un bilancio complessivo di 5.10 Ha di spiaggia in più rispetto al 1999.

Tabella 2 - Bilanci delle superfici di avanzamento e di arretramento della linea di costa.

Periodo	1999-2002	2002-2004	2004-2006	2006-2007	1999-2007
Avanzamento [Ha]	12.42	0.86	3.72	1.00	10.97
Arretramento [Ha]	-2.74	-7.81	-0.67	-1.68	-5.87
Bilancio [Ha]	9.68	-6.95	3.05	-0.68	5.10

Conclusioni

Nel tratto di costa considerato, la tendenza erosiva mostrata nella zona degli stabilimenti balneari sembra essersi arrestata, a fronte comunque di consistenti interventi di difesa. Il tratto settentrionale di spiaggia naturale ha ancora oggi un'evoluzione molto rapida, con variazioni della linea di costa che nel medio periodo sono tendenzialmente in accrescimento.

Ringraziamenti

Si ringraziano l'ing. Andrea Peretti e il dott. Maurizio Farina del Servizio Tecnico Bacino Po di Volano, per avere cortesemente fornito i dati relativi ai ripascimenti effettuati negli ultimi anni nel tratto di litorale oggetto di studio.

Bibliografia

- Bergamini B., Gatti M. (2005) - *La variazione della linea di costa lungo le spiagge emiliano-romagnole. Analisi evolutiva dall'inizio del secolo XIX alla fine del secolo scorso*. L'Universo, anno LXXXV, 4: 509-521.
- Borghesi A., Gatti M., Russo P. (2000) - *Studio della variazione della linea di costa a nord dei lidi ferraresi*. INARCOS Ingegneri Architetti Costruttori n. 615, dicembre 2000, Bologna.
- Ciavola P., Corbau C. (2002) - *Modeling the response of an intertidal bar to "medium energy" events*. Solutions to Coastal Disasters 02, Proceedings of the Conference, 24-27 February 2002, American Society of Civil Engineers.
- Chiorboli A., Gatti M. (2004) - *Il posizionamento GPS ad una via basata sul sistema StarFire. Test sperimentale in modalità statica e cinematica*. Bollettino SIFET Società Italiana di Topografia e Fotogrammetria, 2: 95-107.
- Dal Cin R. (1983) - *I litorali del Delta del Po e alle foci dell'Adige e del Brenta: caratteri tessiturali e dispersione dei sedimenti, cause dell'arretramento e previsioni sull'evoluzione futura*. Bollettino Società Geologica Italiana, 102: 9-56.
- Gatti M., Pellegrinelli A. e Russo P. (1995) - *Un contributo allo studio sperimentale del sistema GPS "Real Time Kinematic Survey" - On The Fly*. Bollettino SIFET Società Italiana di Topografia e Fotogrammetria, 3: 107-116.
- Gatti M., Ciavola P., Tessari U., Zamariolo A., Del Grande C. (2000) - *Caratterizzazione della morfologia di spiaggia lungo lo Scanno di Goro tramite tecniche GPS e rilievi batimetrici*. Studi Costieri, 2: 175-188.
- Regione Emilia Romagna, Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli (2004) - *Il rilievo Lidar della costa e del fiume Savio: costruzione di un modello digitale del terreno e di superficie ad altissima risoluzione*. Pubblicato in www.regione.emilia-romagna.it/wcm/geologia/canali/costa.htm

Siti internet consultati

www.idromare.com Portale del Servizio Mareografico - APAT

www.provincia.ferrara.it Sezione Portale tematico della Carta Geografica Unica della Provincia di Ferrara

Ricevuto il 28/05/2007, accettato il 10/03/2008.

Influenza del fattore scala sulla classificazione delle spiagge in base alla loro tendenza evolutiva

Enzo Pranzini e Daniela Simonetti

Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università di Firenze, Borgo Albizi, 28 - 50122 Firenze.
epranzini@unifi.it

Riassunto

Lo studio dell'evoluzione della linea di riva effettuato attraverso la misura della variazione areale della spiaggia emersa porta a risultati significativamente diversi al variare della lunghezza dei settori considerati. Ciò emerge dal confronto delle ultime due linee di riva disponibili per la spiaggia di Punta Ala e per quella di Follonica.

Per settori compresi fra 50 e 400 m le differenze non sono rilevanti, ma una loro ulteriore espansione porta a valori percentuali dei tratti in erosione molto diversi. L'attribuzione dei vari tratti costieri a classi di intensità dei processi in atto è ancora più sensibile alla scala a cui vengono effettuate le indagini, così come lo è il parametro di *Uniformità*, che descrive il numero di transizioni Erosione/Accrezione che si registrano al passaggio da un settore all'altro.

Il confronto fra lo stato di litorali diversi deve tenere conto delle modalità con le quali sono state ricavate le percentuali dei tratti in erosione e in accrezione.

Parole chiave: tecniche di monitoraggio, analisi delle linee di riva, classificazione delle spiagge.

Abstract

The study of the shoreline evolution performed by measuring the surface variation within coastal segments is strongly dependent of the length of segments. These are the results from the comparison of the two most recent shoreline positions acquired at Punta Ala and Follonica.

Differences are not relevant for sector lengths between 50 and 400 m, but longer sectors trigger very different erosion/accretion percentages. When shoreline displacement values enter a coastal classification system, results are even more sensitive to scale; the same can be verified when we analyse Uniformity – a parameter describing the number of Erosion/Accretion transitions that occur when we cross from one sector the adjacent one.

Comparing the status of different coastal segments, careful attention must be given to the procedure that was used to give percentages of eroding and accreting coasts in each case.

Keywords: monitoring techniques, shoreline analysis, beach classification.

Introduzione

Le funzioni di basso ordine difficilmente riescono a rappresentare fedelmente una linea di riva a causa delle distorsioni dovute a salienti o concavità distribuite regolarmente o irregolarmente lungo costa, tanto che non è possibile studiare l'evoluzione di un litorale con semplici strumenti matematici, se non per descrivere tendenze generali, come lo sviluppo di *zeta bays* (Silvester e Hsu, 1993) o la rotazione di *pocket beaches* (Short e Masselink, 1999).

Le forme che perturbano il regolare andamento della linea di riva possono essere stabili, come le *cusate forelands* (Gulliver, 1896), migrare lungo riva (Sonu, 1968) o svilupparsi e morire nella stessa posizione, come i *reversing storm hotspots* (Jeffrey et al., 2006).

Le forme regolari si sviluppano, si modificano e migrano in risposta alle diverse condizioni del moto ondoso: l'asimmetria delle *beach pads* (Tanner, 1975) è il risultato del trasporto di sedimenti indotto da onde oblique, mentre le cuspidi e le mega-cuspidi sono modulate dalle *edge waves* (Guza e Inman, 1975).

Le forme irregolari possono essere il risultato della convergenza o divergenza delle onde indotta dalla diffrazione su di un fondale irregolare indeformabile (Schwab et al., 1999) o deformabile (Courtney et al., 2006): variazioni della direzione di provenienza del moto ondoso o dei parametri d'onda (H e T) possono creare, incentivare o smussare queste morfologie.

Le strutture costiere artificiali fanno aumentare questa variabilità spaziale, inducendo la formazione di tomboli o di salienti (scogliere parallele), facendo assumere alla linea di riva l'andamento a denti di sega (penelli) o innescando la formazione di *spits* (i moli di sopraflutto dei porti) (Nordstrom, 2000). Queste morfologie sono soggette a modesti scorrimenti lungo costa, ma possono variare in modo significativo in estensione.

Su tempi brevi queste irregolarità possono produrre spostamenti della linea di riva maggiori delle variazioni medie di lungo periodo che interessano il tratto costiero a cui appartengono (Esteves et al., 2006).

Il monitoraggio dell'erosione costiera, che costituisce uno dei pilastri della Gestione Integrata delle Zone Costiere (GIZC), deve prendere in considerazione questo aspetto sia per migliorare l'accuratezza della previsione dell'evoluzione futura del litorale, sia per ottimizzare il rapporto costi/benefici nella scelta della frequenza spaziale e temporale dei rilievi.

Considerato un tratto costiero, lo spostamento medio della linea di riva viene calcolato dividendo la variazione areale della spiaggia emersa per la lunghezza del settore stesso (Rogers et al., 2004; Aminti et al., 2004). Questa Analisi della Variazione di Superficie (AVS) consente di determinare lo spostamento medio "effettivo" della linea di riva nei vari settori costieri, che possono avere o no lunghezza costante.

Una buona approssimazione di questo valore è considerata la variazione della distanza della linea di riva da un caposaldo, ed anche in questo caso i capisaldi possono essere equispaziati (Hicks et al., 2002; Morton et al., 2005; Różyński, 2004) o posti a distanza variabili lungo costa (Norcross et al., 2002; Pye e Blott, 2006).

Un'altra possibilità consiste nell'analisi continua della linea di riva effettuata estraendo le coordinate di ciascuna intersezione fra due linee, in modo da identificare ogni singolo tratto in erosione o in avanzamento (Aminti et al., 1995); anche in questo caso, però, è necessaria una sintesi, se non altro per fornire statistiche regionali, cumulando le distanze e riducendo quindi la scala dell'analisi.

Tutte queste metodologie implicano una discretizzazione della costa attraverso la definizione della distanza fra i profili o della lunghezza dei settori, valori che in genere vengono stabiliti sulla base della scala del progetto, e che possono variare fra pochi metri per studi di dettaglio (Bowman et al., 2007; Hicks et al., 2002), a centinaia di metri (White e El Asmar, 1999) fino a chilometri per studi regionali (Anfuso e Garcia, 2005; Krause e Soares, 2004).

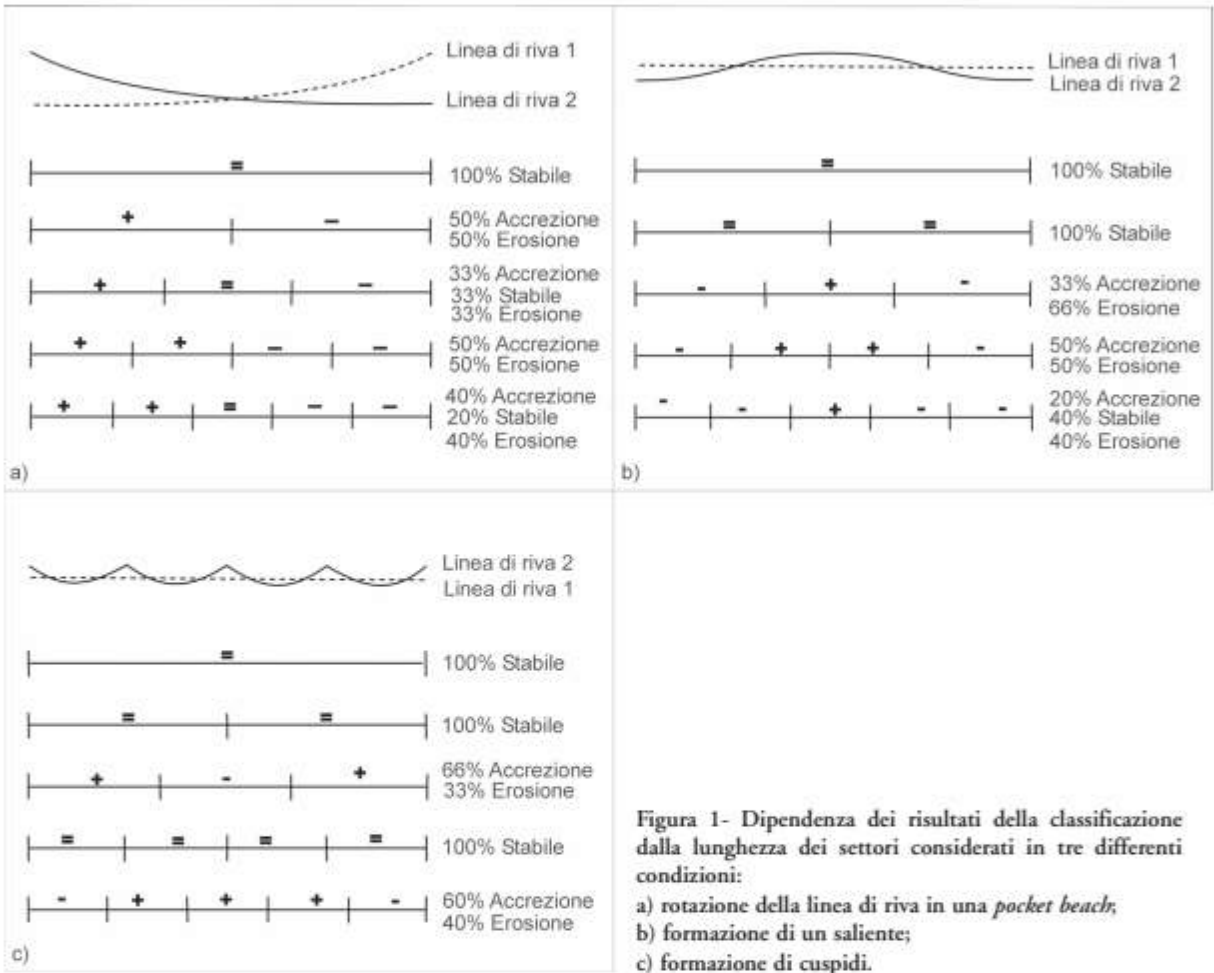
Operare su profili è più semplice e speditivo, anche se alcuni programmi basati su GIS, come il DSAS (Digital Shoreline Analysis System) dell'USGS-TMPC (Thieler e Martin, 2003), consentono di analizzare le variazioni areali di molti settori costieri in un tempo estremamente ridotto. Nell'ambito del Progetto BeachMed (INTERREG-III) l'Unità Operativa di Firenze ha sviluppato un modulo che opera all'interno di AutoCAD e che svolge le stesse funzioni (BEACHMED, 2004).

L'Analisi della Variazione di Superficie filtra le irregolarità ad alta frequenza spaziale che possono essere messe in evidenza con profili molto ravvicinati. Queste variazioni, però, sono spesso dovute alle irregolarità della costa precedentemente citate e devono essere considerate come *outliers* se si va ad analizzare una tendenza generale del litorale. Questo problema è ben conosciuto ed ha portato alcuni autori a filtrare con medie mobili i loro dati ad alta risoluzione (Esteves et al., 2006; Genz et al., 2007).

Una procedura concettualmente simile è alla base dell'Analisi delle Variazioni di Superficie se l'area delimitata dalle linee di riva viene considerata come la sommatoria delle variazioni misurate su di un numero infinito di profili.

Per ottenere un filtraggio efficace, ciascun settore costiero deve avere una lunghezza almeno doppia di ogni morfologia periodica presente lungo costa; morfologie irregolarmente distribuite lungo riva sono assai più difficili da filtrare, dato che lo *smoothing* dipende dalla loro ampiezza e distanza.

In Figura 1 vengono presentati alcuni esempi in cui è evidente la dipendenza della classificazione dei vari tratti costieri dalla lunghezza dei settori considerati; in tutti i casi presentati il litorale nel suo insieme è posto in equilibrio.



Fin dal 1985 per la Regione Toscana sono stati effettuati monitoraggi basati sull'Analisi delle Variazioni di Superficie lungo i 192 km delle spiagge continentali, composte da 8 ampie unità fisiografiche (da 8 a 65 km di lunghezza) e da una *pocket beach* lunga 2 km (Bartolini et al., 1989).

Da allora le indagini si sono basate sulla suddivisione della costa in 45 settori di lunghezza diversa, compresa fra 542 e 5705 m, ma omogenei nelle tendenze evolutive o nel tipo di opera di difesa presenti. Lo stesso metodo è stato poi applicato a venti *pocket beaches* dell'Isola d'Elba, di lunghezza compresa fra 1245 m e 121 m.

La necessità di una risoluzione maggiore (vedi in Tabella 1 una proposta di classificazione della risoluzione delle analisi) per valutare l'efficacia dei nuovi progetti di difesa costiera basati su opere strutturali e/o su ripascimenti artificiali, ha imposto l'adozione di settori più corti. Aumentando la risoluzione dell'analisi le statistiche relative allo stato dei litorali toscani sono cambiate in modo significativo. In questo lavoro si analizza appunto l'influenza della risoluzione dell'Analisi della Variazione di Superficie sui risultati della classificazione delle spiagge in termini di erosione/progradazione.

Tabella 1 - Proposta di classificazione della risoluzione dell'analisi per lo studio della variazione della linea di riva (L = lunghezza dei settori o distanza fra transetti).

Altissima	$L < 1^0 \text{ m}$
Molto alta	$10^0 \text{ m} < L < 10^1 \text{ m}$
Alta	$10^1 \text{ m} < L < 10^2 \text{ m}$
Media	$10^2 \text{ m} < L < 10^3 \text{ m}$
Bassa	$10^3 \text{ m} < L < 10^4 \text{ m}$
Molto bassa	$10^4 \text{ m} < L < 10^5 \text{ m}$
Bassissima	$L > 10^5 \text{ m}$

Materiali e metodi

Sono stati studiati due tratti della costa toscana lunghi 4800 m ciascuno:

- la spiaggia di Punta Ala, priva di opera di difesa che si sta evolvendo verso una *zeta bay* con erosione del tratto sopraflutto ed accrezione in quello sottoflutto (Pranzini e Rossi, 2000);
- la spiaggia di Follonica, in un tratto di costa intensamente difeso da scogliere parallele emerse e sommerse e da pennelli (Aminti et al., 2002).

Per ciascun tratto sono state prese in considerazione le due linee di riva più recenti al fine di analizzare la loro tendenza evolutiva. La costa è stata suddivisa in 96 settori lunghi 50 m ciascuno, per i quali è stata misurata la superficie persa o guadagnata utilizzando il sistema basato su AutoCAD precedentemente citato (BEACHMED, 2004); dividendo questo valore per la lunghezza del settore si è ottenuto lo spostamento medio della linea di riva. Le lunghezze cumulate dei settori in erosione o in avanzamento sono poi state trasformate in percentuali.

Successivamente, l'analisi è stata ripetuta fondendo settori adiacenti per crearne di nuovi sempre più ampi (100, 200, 300, 400, 600, 800, 1200, 1600, 2400 e 4800 m). La lunghezza totale del litorale da analizzare è stata definita in modo da poter fondere i settori di lunghezza unitaria per ottenerne di nuovi sempre più ampi senza escluderne alcuno.

I valori di spostamento medio della linea di riva sono stati poi confrontati per valutare quanto la risoluzione delle indagini influenzi i risultati della classificazione delle coste, sia in termini generali di settori in erosione o in accrescimento, sia facendo riferimento ad una classificazione più specifica in cui si tiene conto anche del valore dello spostamento:

Accrescimento > +5 m

Probabile accrescimento +5 m + +2 m

Stabile +2 m + -2 m

Probabile erosione -2 m + -5 m

Erosione < -5 m

Questa classificazione, recentemente adottata per le spiagge della Regione Toscana (Carli et al., 2006), è basata sull'accuratezza dei rilievi, nel senso che uno spostamento misurato della linea di riva entro +/-2 m è considerato non certo, mentre si ritiene che uno spostamento superiore a +/-5 metri indichi che quel settore è stato certamente in accrezione o in erosione nell'intervallo di tempo considerato. La velocità del processo (erosione o accrezione) viene poi definita in termini di tasso di spostamento (m/anno) ma non ha interesse ai fini del presente studio.

Si è analizzata anche la variabilità lungo costa degli spostamenti della linea di riva, espressa dal numero di variazioni +/- che si hanno al passaggio da un settore a quello adiacente. Se non si hanno variazioni il sistema costiero è molto ordinato (tutti i settori sono in erosione o in accrezione), mentre nel caso opposto si ha il massimo delle transizioni, ossia settori in erosione si alternano a settori in accrezione.

Possiamo chiamare questo ordine *Uniformità* e calcolarla con:

$$U = 1 - t_a/t_p$$

dove: t_a numero delle transizioni effettive,

t_p numero delle transizioni possibili, corrispondenti a n-1, dove n è il numero dei settori in cui è stato suddiviso il tratto di litorale.

La spiaggia di Punta Ala

La spiaggia di Punta Ala è lunga circa 6.1 km e collega Punta Hidalgo con Punta delle Cannelle, ai piedi della quale si trova la foce del Fiume Alma, protetta da due moli guardiani (Fig. 2). Studi recenti (Pranzini e Rossi, 2000) mostrano che questo litorale si sta evolvendo verso una *zeta bay* (Silvester e Hsu, 1993) con erosione del settore meridionale (*updrift*) ed espansione di quello settentrionale (*downdrift*). Nella parte meridionale alcuni affioramenti di *beach rock* rendono irregolare la linea di riva.

L'evoluzione della linea di riva è stata analizzata confrontando i rilievi del 1996 con quelli del 2005, entrambi effettuati con DGPS acquisendo circa un punto ogni 5 m percorrendo l'isoipsa 0 m.

La lunghezza dei settori di primo ordine (50 m) è sufficiente a mediare le piccole irregolarità dovute alla discontinua presenza della *beach rock* nella *nearshore* e le piccole cuspidi talora presenti in questo litorale.

A questa scala di indagine (settori lunghi 50 m) la spiaggia è caratterizzata da valori medi di spostamento compresi fra -16.30 e +15.13 m, con una distribuzione normale (Shapiro Wilk Test; $P = 0.42$); il 69.8% dei settori è in erosione e il valore medio dello spostamento della linea di riva è di -2.04 m (s.d. = 5.44 m) (Fig. 3).

In Figura 4 viene rappresentata l'evoluzione del litorale in modo classico per le diverse scale di analisi: istogrammi in cui ciascuna barra è associata ad un determinato settore. Se i settori hanno uguale lunghezza si ottiene un grafico "equivalente" in cui le variazioni di superficie sono in scala.

Dal primo grafico (settori lunghi 50 m) si rileva che la gran parte dei settori è soggetta ad una modesta erosione, con l'eccezione dei settori settentrionali e di alcuni centro-meridionali in accrezione. Alcuni *outliers* interrompono questo schema, ma l'*Uniformità* del sistema è molto alta ($U = 0.91$) con solo 9 transizioni +/- sulle 95 possibili; la differenza media in valore assoluto fra settori adiacenti è molto contenuta: 1.91 m.

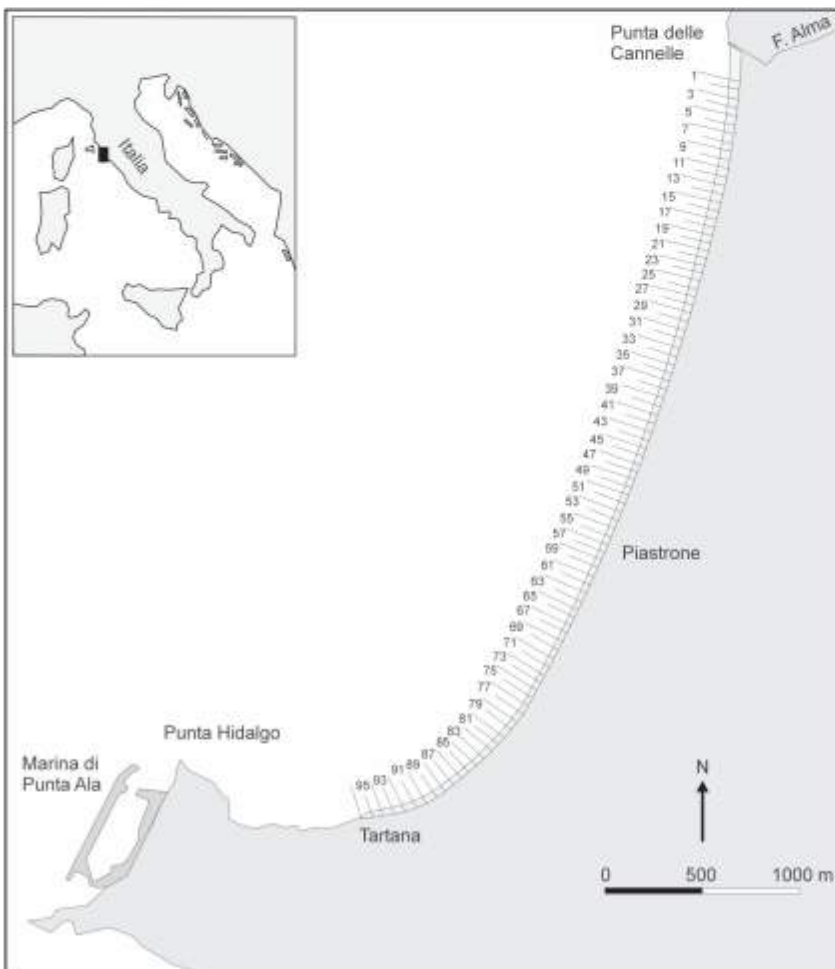


Figure 2 - Punta Ala: posizione dei settori analizzati.

La fusione dei settori unitari in settori di lunghezza crescente fino a 400 m non modifica in modo sostanziale lo stato del litorale (Fig. 5); con la percentuale di erosione che oscilla fra il 66.7% e il 70.8%; l'*Uniformità* si riduce fino ai 300 m ($U = 0.67$) e cresce nuovamente a 400 m ($U = 0.73$). Con settori di 600 m e di 1200 m il 75% del litorale è in erosione, mentre per settori di 800 e 1600 m questo valore scende al 66.7%. I due settori lunghi 2400 m risultano entrambi in erosione. L'*Uniformità*, dopo una ulteriore riduzione a 600 m ($U = 0.57$), passa a 0.80 (800 m) e 0.67 (1200 m) per diventare 1 a 2400 m.

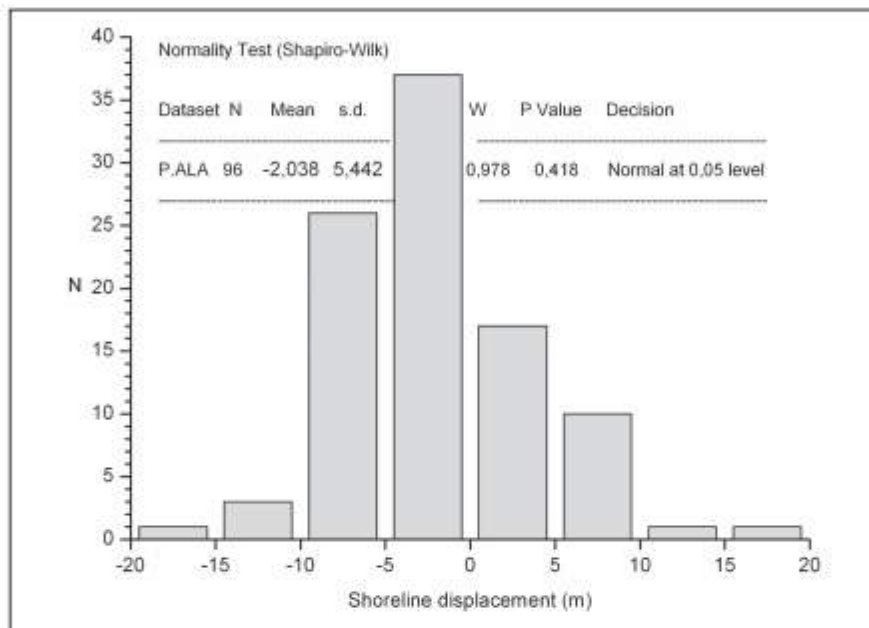


Figura 3 - Distribuzione di frequenza degli spostamenti della linea di riva per classi di ampiezza di 5 m per il litorale di Punta Ala.

Estendendo la lunghezza dei settori gli *outliers* spariscono e l'evoluzione del litorale diviene più regolare con i settori "forti" che mangiano i settori "deboli".

Questo avviene per il settore n. 24 in accrescimento, che è affiancato da due settori in forte erosione, quando viene fuso per l'analisi a 100 m (Fig. 4).

Ulteriori fusioni non modificano il *trend* generale, ma i valori dello spostamento medio della linea di riva si riducono progressivamente. Solo quando si arriva a due settori di 2400 m tutto il litorale risulta in erosione con valori di -1.62 e -2.45 m, e non rimane memoria né della forte erosione del settore più meridionale né della crescita di quelli settentrionali (dove si avevano anche più di 15 m di avanzamento).

Quando i valori di spostamento della linea di riva vengono inseriti nelle categorie utilizzate per la Regione Toscana la dipendenza dei risultati dalla lunghezza dei settori è ancora più evidente (Figg. 6 e 7).

Nel range 50 + 800 m le spiagge stabili oscillano fra il 16.7 e il 33.3%, mentre quelle in erosione hanno una variabilità ancora maggiore (25 + 41.7%). Questo dipende dagli alti valori di erosione di alcuni settori, che influenzano il comportamento dei settori adiacenti dopo la fusione.

I settori in crescita mostrano maggiore stabilità e fra 50 e 600 m rimangono nel range 8.3 + 12.5%, ma scompaiono poi con l'ulteriore fusione a 800 m.

Un'altra ragione per la stabilità delle classi estreme (Erosione e Accrescimento) alla prima fusione deriva dal fatto che molti settori che esse raccolgono sono contigui e la loro fusione non ne modifica lo *status*. Nel tratti di litorale in transizione, dove i settori in *Probabile accrescimento*, *Stabile* e in *Probabile erosione* si alternano è più facile che la fusione inneschi cambiamenti di appartenenza alle varie classi. La classe *Accrescimento* scompare a 800 m e quella in *Probabile accrescimento* a 1600.

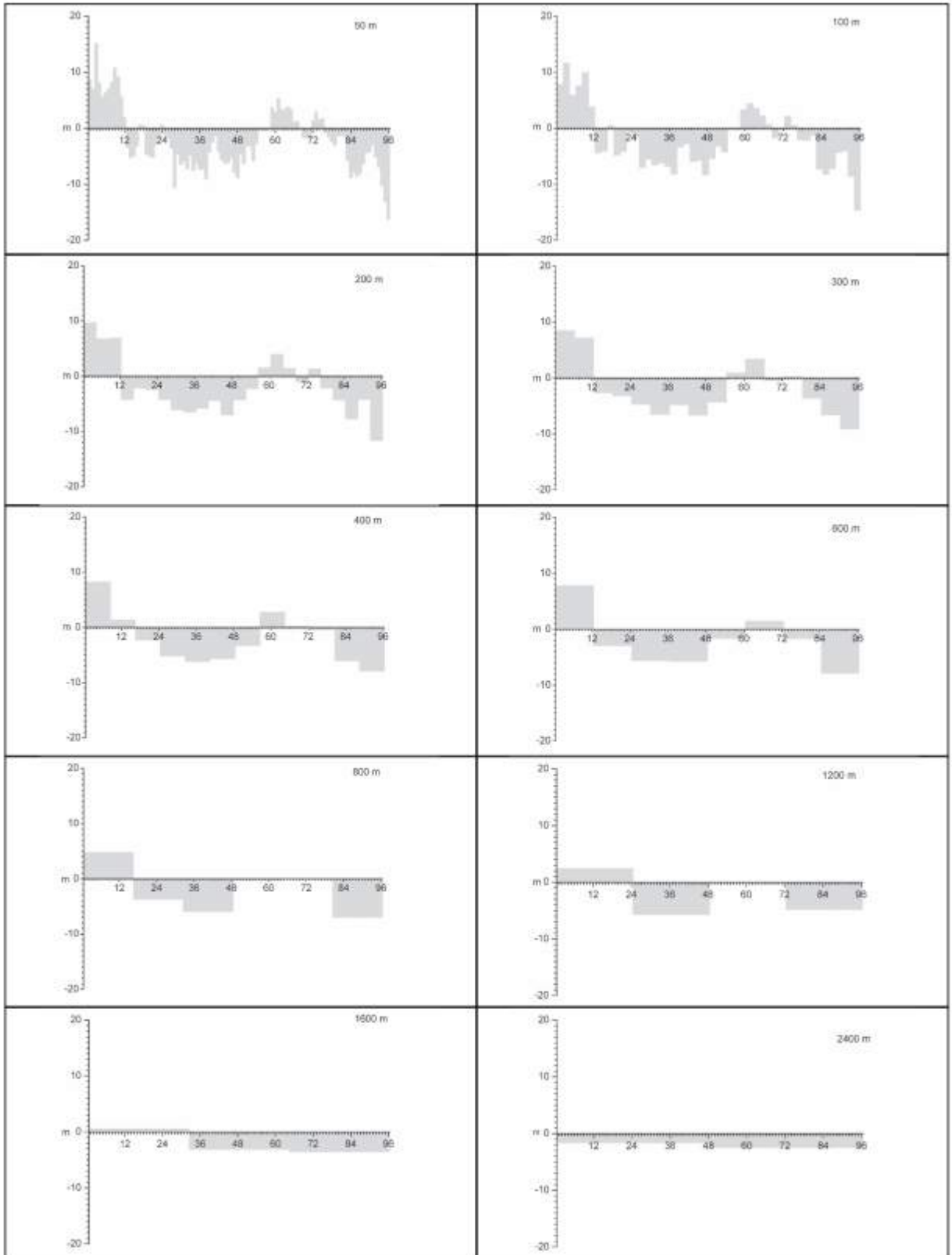


Figura 4 - Punta Ala: spostamento medio della linea di riva a Punta Ala per settori di lunghezza crescente da 50 a 2400 m.

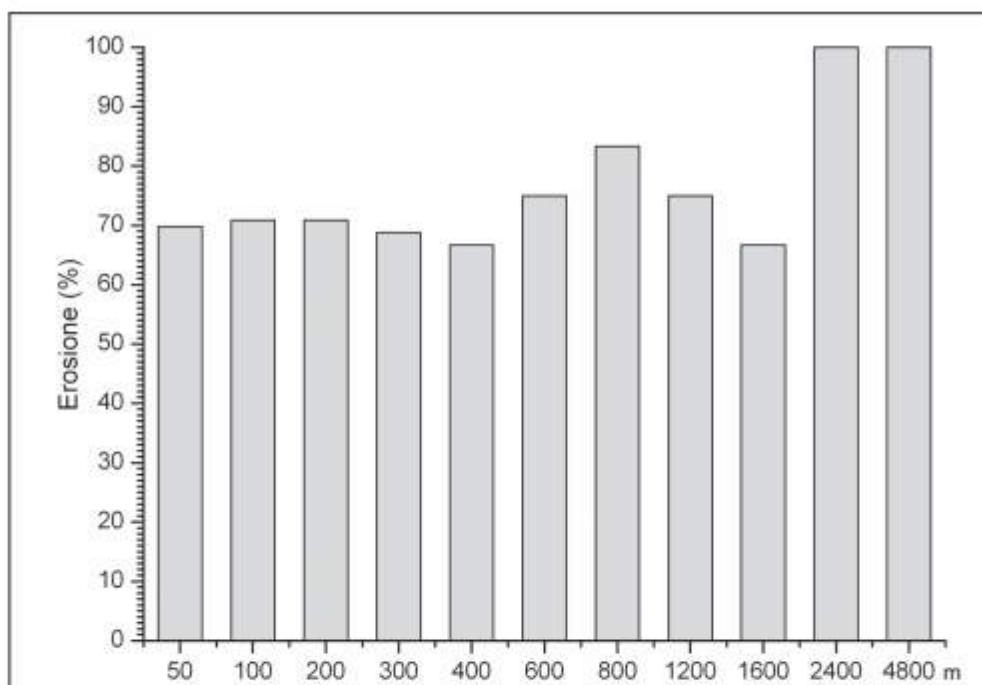


Figura 5 - Punta Ala: percentuale di spiaggia in erosione al variare della scala dell'indagine (i.e. lunghezza dei settori).

Tabella 2 - Numero di transizioni (+/-) e valori di *Uniformità* (*U*) alle diverse scale di analisi.

Lunghezza dei settori (m)	50	100	200	300	400	600	800	1200	2400
N. dei settori	96	48	24	16	12	8	6	4	2
Transizioni	9	7	5	5	3	3	1	1	0
<i>U</i>	0.91	0.85	0.78	0.67	0.73	0.57	0.80	0.67	1.00

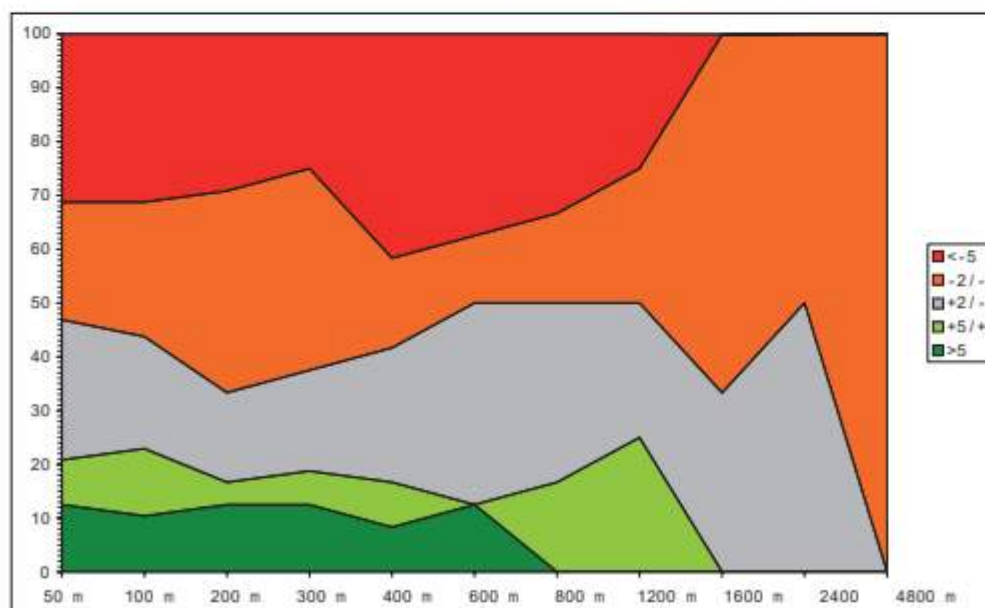


Figura 6 - Punta Ala: frequenza delle varie classi della Regione Toscana per differente lunghezza dei settori.

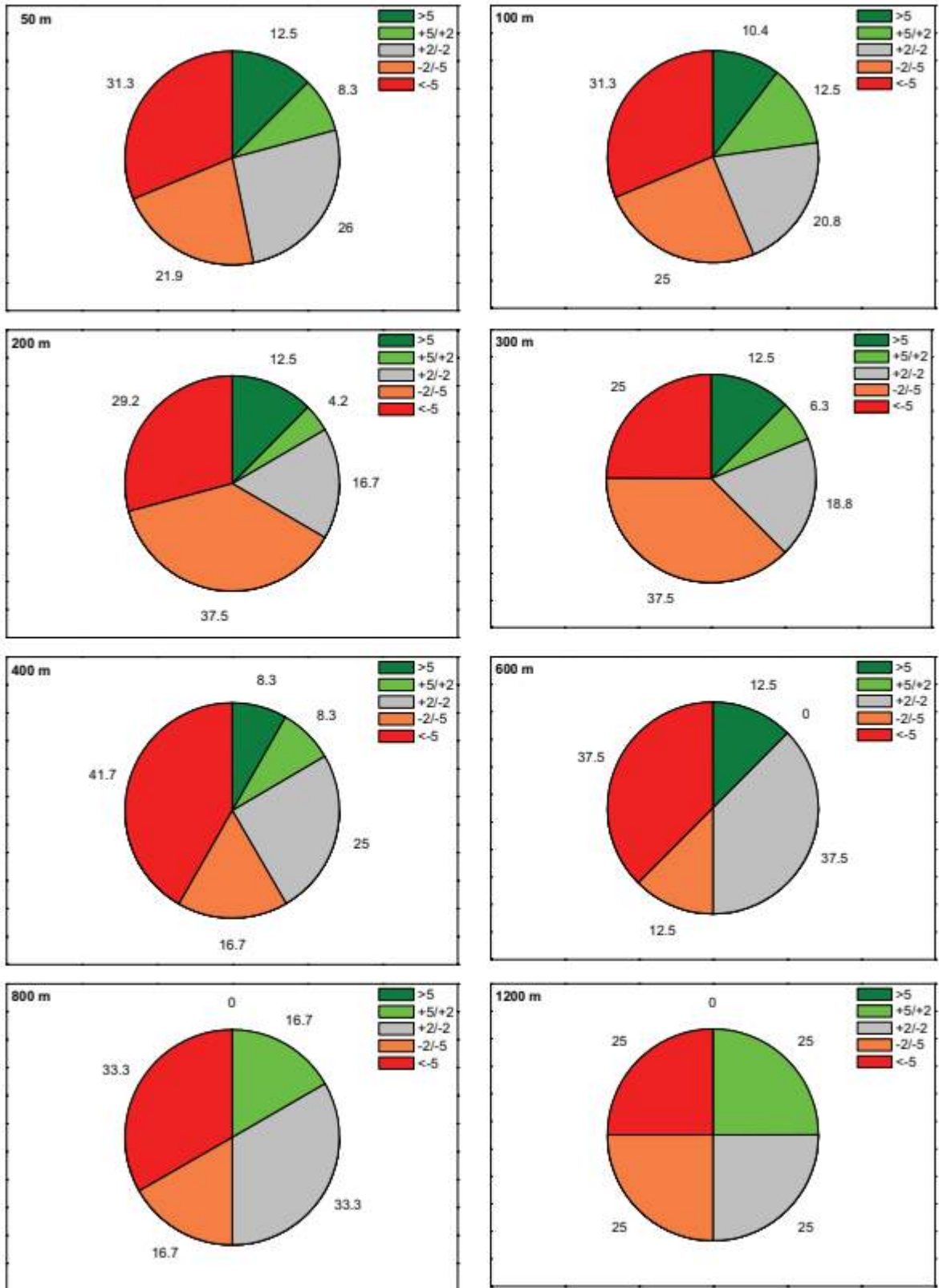


Figura 7 - Punta Ala: diagrammi a torta che mostrano la percentuale di settori appartenenti alle varie classi per lunghezze dei settori crescenti da 50 a 1200 m.

La spiaggia di Follonica

Il secondo caso di studio è costituito dal tratto di spiaggia antistante l'abitato di Follonica, intensamente protetto da opere di difesa (Fig. 8). In questo caso vengono messe a confronto le linee di riva del 2000 e del 2005 su di un fronte di 4800 m e diviso in settori lunghi 50 m, progressivamente uniti a formare settori di 100, 200, 300, 400, 600, 800, 1200, 2400 e 4800 m.

L'eterogeneità della costa, con numerose difese di vario tipo, rende le variazioni della linea di riva in ciascun settore più indipendenti da quelle dei settori adiacenti, tanto che si registrano 17 transizioni +/- sulle 95 possibili ($U = 0.82$) e una differenza assoluta fra settori adiacenti di 3.14 m (Tab. 3).

A questa scala di analisi (settori lunghi 50 m) i valori di spostamento della linea di riva hanno una distribuzione normale ($p = 0.05$); il 59.4% dei settori è in erosione e lo spostamento medio della linea di riva è di -1.41 (s.d. = 6.68) (Fig. 9).

Nei primi processi di fusione (100, 200, 300 e 400 m) l'erosione rimane quasi costante (56.3, 58.3, 56.3 e 58.3%; Fig. 10) mentre il valore di U subisce variazioni significative (0.68, 0.61, 0.53 e 0.36). Ulteriori estensioni dei settori portano ad un costante incremento dei settori in erosione: 62.5% per 600 m, 66.7% per 800 m e 75.0% per 1200 m; i due settori da 2400 m sono entrambi in erosione. L'*Uniformità*, anche se il suo significato è dubbio per settori molto lunghi, raggiunge il valore più basso a 600 m ($U = 0.29$) per salire di nuovo a 800 m ($U = 0.40$) e a 1200 ($U = 0.67$) arrivando ovviamente ad 1 quando entrambi i settori sono in erosione.

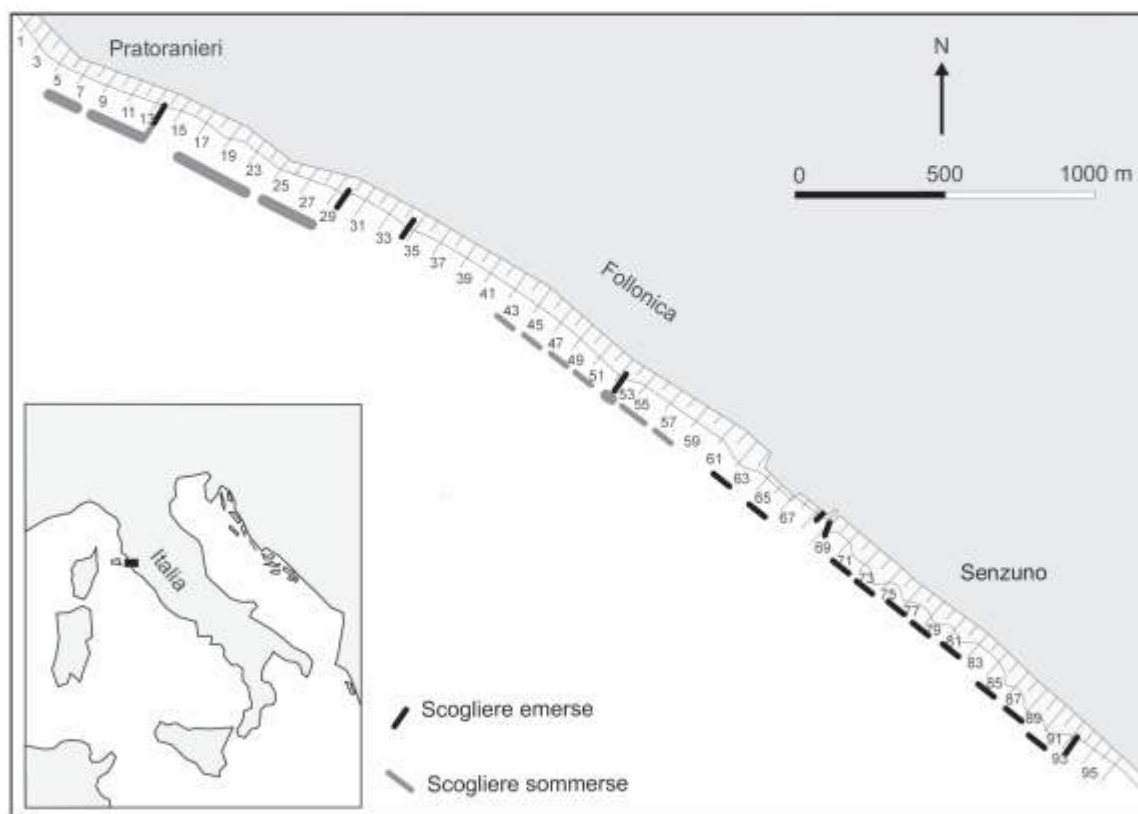


Figura 8 - Follonica: posizione dei settori analizzati e difese costiere presenti.

Tabella 3 - Numero di transizioni (+/-) e valore dell'*Uniformità* (U) alle diverse scale di analisi.

Lunghezza dei settori	50	100	200	300	400	600	800	1200	2400
N. di settori	96	48	24	16	12	8	6	4	2
Transizioni	17	15	9	7	7	5	3	1	0
U	0,82	0,68	0,61	0,53	0,36	0,29	0,40	0,67	1,00

Tutto ciò appare evidente dal confronto fra gli istogrammi che mostrano lo spostamento medio della linea di riva nei vari settori (Fig. 11) per settori di 50 m questi si raggruppano per tendenza evolutiva con valori positivi o negativi piuttosto elevati. Le prime fusioni non modificano quindi l'aspetto generale degli istogrammi, anche se alcuni settori "singolari" svaniscono, come avviene già al primo passaggio con il settore n. 59 in leggerissima accrezione, "annullato" dal settore n. 60 in forte erosione.

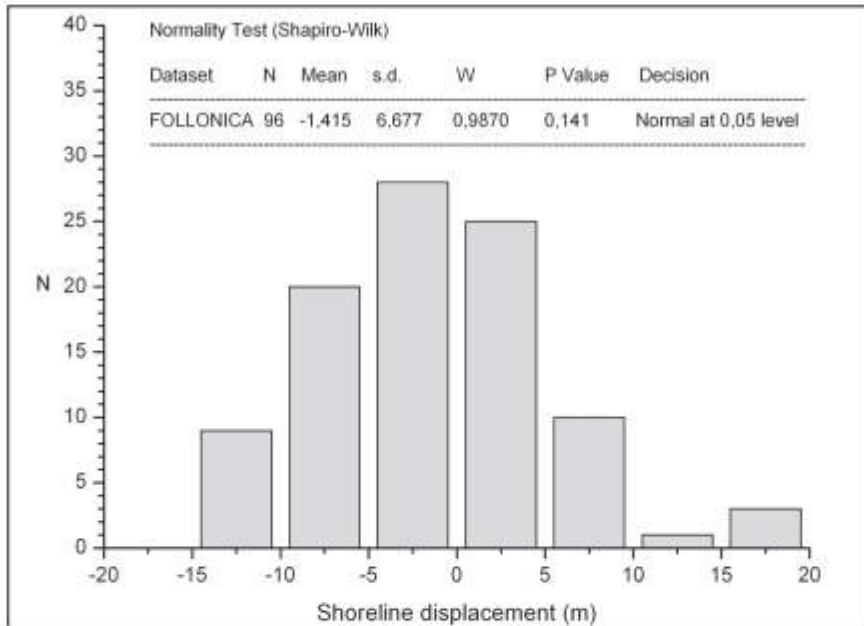


Figure 9 - Distribuzione di frequenza degli spostamenti della linea di riva per classi di ampiezza di 5 m per il litorale di Follonica.

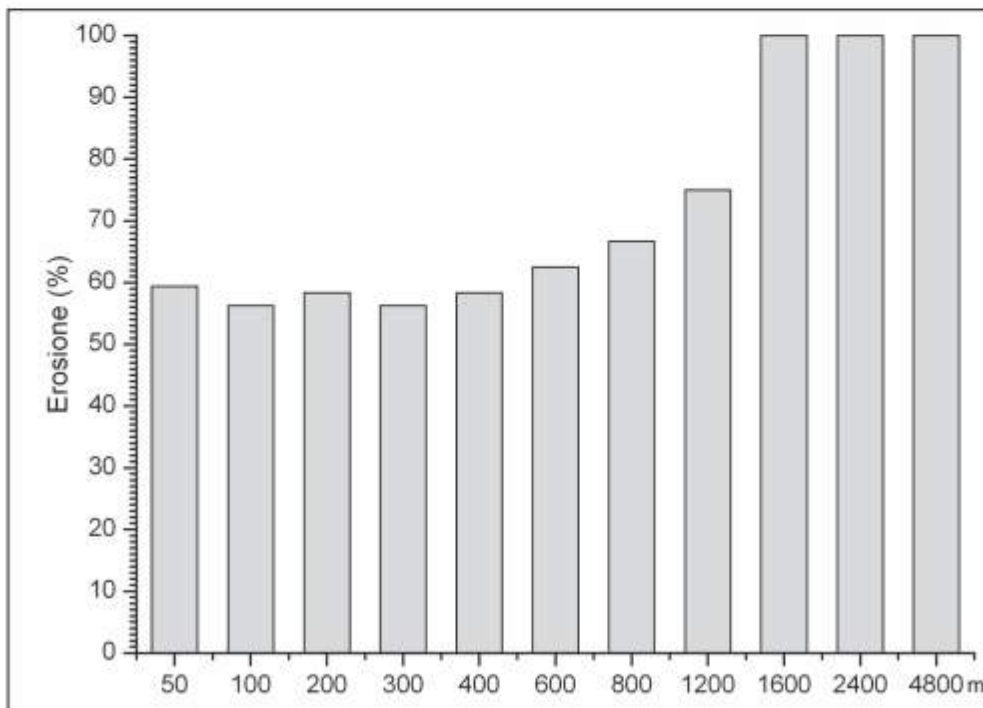


Figure 10 - Follonica: percentuale di spiaggia in erosione al variare della scala dell'analisi (*i.e.* lunghezza dei settori).

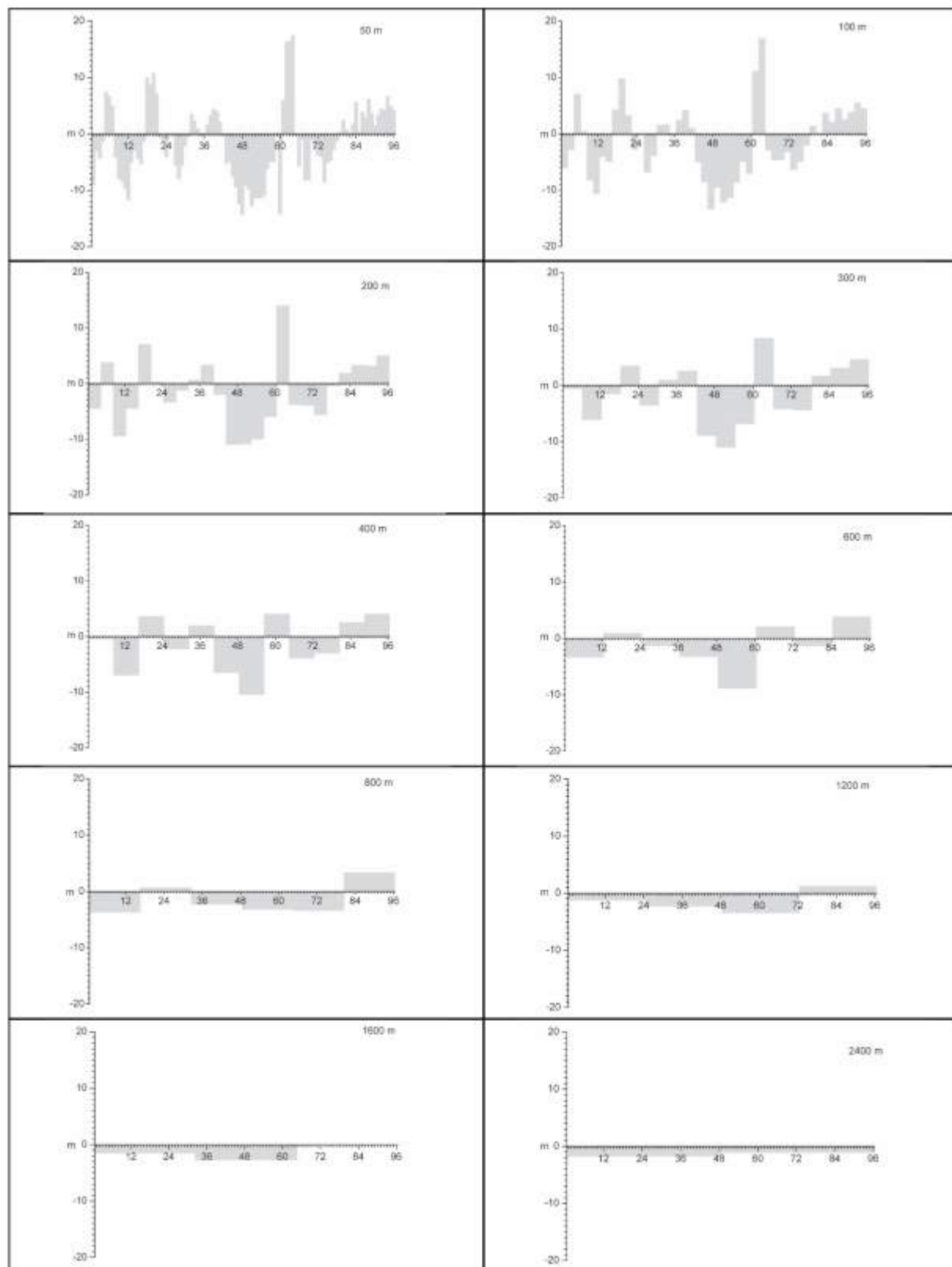


Figure 11 - Follonica: spostamento medio della linea di riva a Punta Ala per settori di lunghezza crescente da 50 a 2400 m.

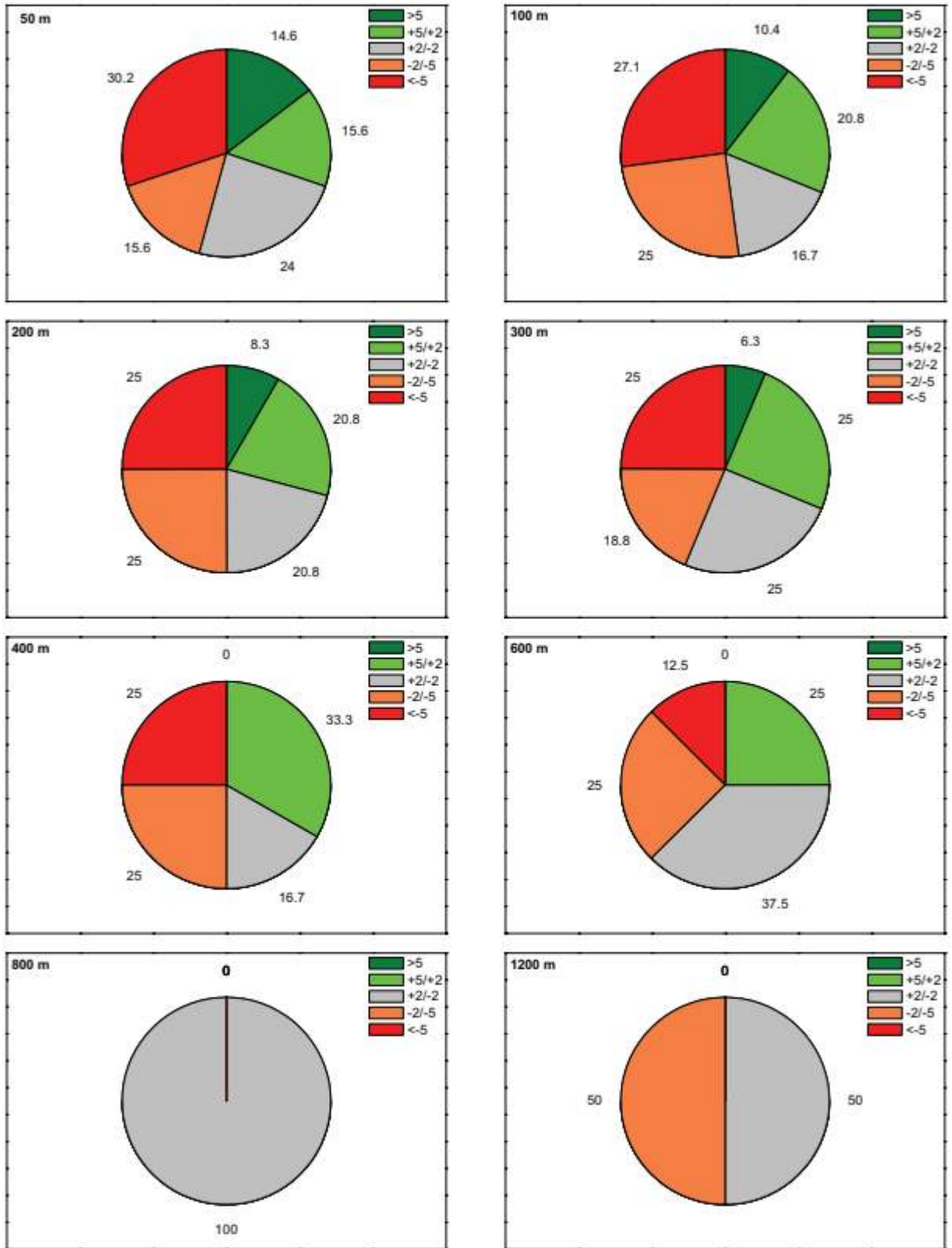


Figure 12 - Follonica: Diagrammi a torta che mostrano la percentuale di settori appartenenti alle varie classi per lunghezze dei settori crescenti da 50 a 1200 m.

La variabilità lungo riva si stabilizza solo dopo i 600 m, quando l'aspetto degli istogrammi non cambia se non per l'entità degli spostamenti della linea di riva. Già a 1600 m, in questo caso, si è persa traccia del processo di accumulo, dato che tutti e tre i settori che si vengono a creare sono in erosione (cfr. anche la Fig. 10).

Quando i valori di spostamento della linea di riva vengono raggruppati nelle classi adottate per la Regione Toscana, l'influenza della scala dell'indagine sui risultati della classificazione è ancor più evidente (Fig. 12). Con settori di 50 m il 30.2% delle costa è in *Erosione*, ma questa classe accoglie poi il 27.1% dei settori lunghi 100 m e solo il 25% quando la lunghezza è di 200, 300 e 400 m. A 600 m scende al 12.5% e questa classe scompare quando i settori raggiungono gli 800 m.

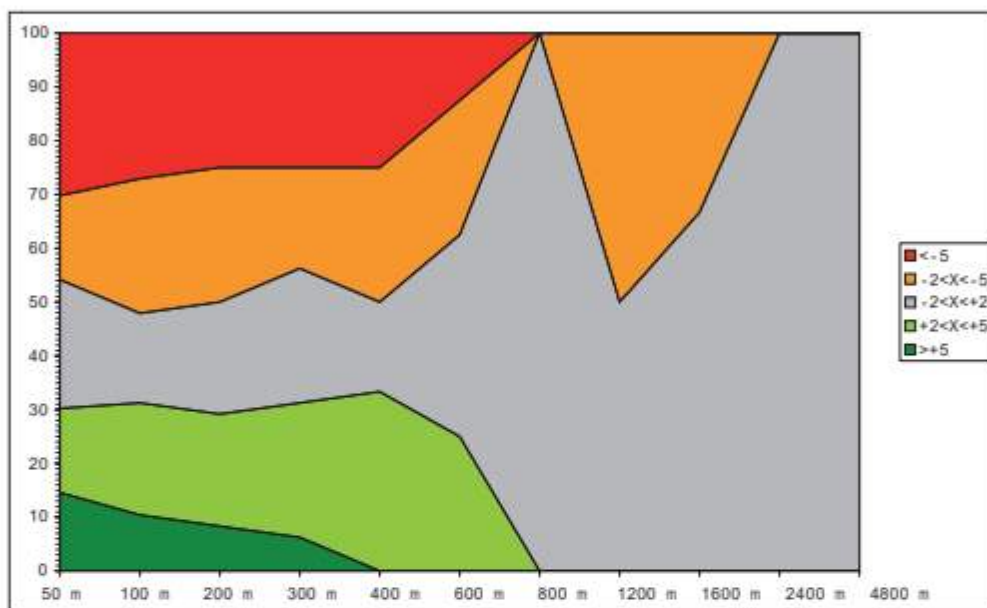


Figure 13 - Follonica: frequenza delle varie classi della Regione Toscana per differente lunghezza dei settori.

Anche la classe *Probabile erosione* registra variazioni notevoli: parte con il 15.6% a 50 m, è il 25% a 100, 200, 400 e 600 m, ma scende al 18.8% a 600 m. Questa classe non è presente quando i settori hanno una lunghezza di 800 m, ma salta al 50% a 1200 m, per scomparire poi alle successive fusioni.

La classe *Stabile* raccoglie inizialmente il 24% dei settori, per ridursi immediatamente al 16.7% a 100 m; oscilla poi fra questo valore e il 37.5% nelle successive espansioni fino a 600 m, ed è l'unica classe presente (100%) per settori lunghi 800 m, ma scompare ai 2400 m.

I settori in *Avanzamento* sono frequenti all'analisi a 50 m (14.6%) ma si riducono progressivamente per scomparire poi ai 400 m.

Anche la classe *Probabile accrescimento* mostra importanti cambiamenti: parte con 15.6%, raggiunge il 33% a 400 m, ma dopo un valore del 25% a 600 m non è più presente.

Conclusioni

E' stato analizzato lo spostamento della linea di riva in due tratti del litorale toscano applicando il metodo dell'Analisi della Variazione Areale della spiaggia emersa per settori di lunghezza crescente da 50 a 4800 m. I risultati, in termini di percentuale di settori in erosione, variano in modo sostanziale con il variare della lunghezza dei settori, senza che sia stato possibile riconoscere una regola generale, salvo la presenza di alcune *risonanze* per settori di lunghezza multipla.

L'Analisi della Variazione Areale per settori estesi filtra le variazioni ad alta frequenza spaziale della linea di riva, impedendo il riconoscimento di *hot spot* erosivi. La cancellazione dell'erosione del settore n. 24 a Punta Ala per analisi con scala superiore ai 50 m ne è una prova.

Riducendo la risoluzione (settori più lunghi) i settori con valori, sia positivi che negativi, molto elevati annullano i settori adiacenti, ma ovviamente producono spostamenti medi più moderati.

Il risultato finale della fusione dei settori è la creazione di un unico settore che porta ad affermare che il 100% del litorale è in accrezione o in erosione.

In ogni caso, in entrambi i tratti di litorale analizzati, entro "ragionevoli" valori di scala (i.e. 400 m) le percentuali non cambiano in modo significativo: la percentuale di settori in erosione oscilla entro una fascia del 4.1% a Punta Ala, mentre l'oscillazione è solo del 3.1% a Follonica, sebbene quest'ultimo tratto di litorale abbia una *Uniformità* minore (0.82 contro 0.91).

Se i valori di spostamento della linea di riva devono essere inseriti in classi, come qui fatto utilizzando quelle create per classificare il litorale toscano, i risultati sono ancor più influenzati dalla scala delle indagini.

Al momento, non è stato possibile definire una scala ottimale per un determinato tratto di litorale ed ancor meno una applicabile a tutte le spiagge.

Essendo i risultati "sensibili alla scala" ogni confronto fra tratti di litorale diversi dovrebbe essere effettuato solo utilizzando la stessa scala di analisi, ed anche ciò non garantisce di ottenere risultati affidabili.

Un criterio di classificazione più efficace potrebbe non solo basarsi sulla percentuale di settori in erosione ad una determinata scala di analisi, ma tenere conto anche della variabilità lungo riva delle tendenze, in termini di differenza media in valore assoluto fra settori adiacenti o di *Uniformità* (*U*). La necessità di avere informazioni omogenee per grandi aree geografiche, come le coste europee o quelle del Mediterraneo, per monitorare i cambiamenti globali in atto ed impostare opportune strategie di Gestione Integrata della Zona Costiera condivise a livello sovra-nazionale, impone lo sviluppo, non solo di tecniche di monitoraggio efficaci ed applicabili ai vari contesti, come quelle basate sul telerilevamento, ma anche di idonei protocolli di elaborazione dei dati. In questo senso il presente lavoro intende richiamare l'attenzione dei ricercatori e degli amministratori sulla scarsa affidabilità di un confronto fra dati non omogenei e sulla necessità di sviluppare metodi di elaborazione e di sintesi dei dati più oggettivi.

Ringraziamenti

Ricerca svolta nell'ambito dell'Operazione Quadro Regionale BEACHMED-e, Sottoprogetto OpTIMAL.

Bibliografia

- Aminti P., Cammelli C., Cappietti L., Jackson N.L., Nordstrom K.F. e Pranzini E. (2004) - *Evaluation of beach response to submerged groin construction at Marina di Ronchi, Italy, using field data and a numerical simulation model*. J. Coastal Research, 33: 99-120.
- Aminti P., Cipriani L.E. e Pranzini E. (2002) - *Beach erosion control along the Golfo di Follonica (Suthern Tuscany): actual hard protections vs. potential soft solutions*. Littoral 2002, 6th Int. Symp., Porto, Portogallo. Pp.355-363.
- Aminti P., Pruszek Z. e Zeidler R. (1995) - *Multiscale shore variability at two coasts*. Proc. Int. Conf. On Coastal Research in Terms of Large-Scale Experiments, Coastal Dynamics '95, Gdansk, Poland, pp. 617-628.
- Anfuso G. e Garcia F-J. (2005) - *Morphodynamics characteristics and short-term evolution of a coastal sector in SW Spain: implications for coastal erosion management*. J. Coastal Research, 21: 1139-1153.
- Bartolini C., Cipriani L.E., Pranzini E., Sargentini M. (1989) - *Caratteristiche geomorfologiche ed evoluzione della linea di riva del litorale toscano e criteri di lettura*. In: "Coste toscane", Regione Toscana. pp. 33-56.
- Bartolini C., Pranzini E., Lupia Palmieri C. e Caputo C. (1977) - *Studi di geomorfologia costiera: IV - L'erosione del Golfo di Follonica*. Boll. Soc. Geol. It., 96: 87-116.
- BEACHMED, 2004. *Quaderno tecnico n. 3*. Roma, pp. 278.
- Carli S., Iandelli N., Pranzini E. e Vitale G. (2006) - *L'erosione del litorale toscano*. Operazione Quadro Regionale BEACHMED-e, Sottoprogetto OpTIMAL, www.beachmed.it
- Bowman D. e Pranzini E. (2007) - *Beach morphodynamics under draining conditions*. Coastal Engineering, 54: 791-800.
- Courtney A.S., Jesse E.M. e Jeffrey H.L. (2006) - *Nearshore shore-oblique bars, gravel outcrops, and their correlation to shoreline change*. Marine Geology, 233: 63-79.
- Esteves L.S., Williams J.J. e Dillenburg S.R. (2006) - *Seasonal and Interannual influences on the patterns of shoreline changes in Rio Grande do Sol, Southern Brazil*. J. Coastal Research, 22: 1076-1093.
- Gulliver F.P. (1896) - *Cuspate forelands*. Geol. Soc. America Bull., 7: 399-422.

- Guza R. e Inman D. (1975) - *Edge waves and beach cusps*. J. Geophysical Research, 80: 2997-3012.
- Hicks D.M., Green M.O., Smith R.K., Swales A., Ovenden R. e Walsh J. (2002) - *Sand volume change and cross-shore sand transfer, Mangawhai Beach, New Zealand*. J. Coastal Research, 18: 760-775.
- Jeffrey H.L., Amy S.F. e Charlene S. (2006) - *Reversing storm hotspots on sandy beaches: Spatial and temporal characteristics*. Marine Geology, 226: 261-279.
- Krause G. e Soares C. (2004) - *Analysis of beach morphodynamics on the Bragantian mangrove peninsula (Pará, North Brazil) as prerequisite for coastal zone management recommendations*. Geomorphology, 60: 225-239.
- Morton R.A., Miller T. e Moore L. (2005) - *Historical shoreline changes along the US Gulf of Mexico: a summary of recent shoreline comparisons and analyses*. J. Coastal Research, 21: 704-709.
- Norcross Z.M., Fletcher C.H. e Merrifield M. (2002) - *Annual and interannual changes on a reef-fringed pocket beach: Kailua Bay, Hawaii*. Marine Geology, 2002: 553-580.
- Nordstrom K.F. (2000) - *Beaches and dunes of developed coasts*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, pp. 338.
- Pranzini E. e Rossi S. (2000) - *L'erosione del litorale di Punta Ala: un caso di naturale riequilibrio morfologico*. Studi costieri, 3: 3-27.
- Pye K. e Blott S.J. (2006) - *Coastal processes and morphological change in the Dunwich-Sizewell area, Suffolk, UK*. J. Coastal Research, 22: 453-473.
- Regione Toscana (1985) - *Coste toscane*. Firenze, pp. 62, con 14 carte alla scala di 1:5.000 con l'evoluzione della linea di riva dal 1938.
- Rogers S.S., Sandweiss D.H., Maasch K.A., Belknap D.F. e Agouris P. (2004) - *Coastal change and beach ridges along the Northwest coast of Peru: image and GIS analysis of the Chira, Piura, and Colán beach-ridge plains*. J. Coastal Research, 20: 1102-1125.
- Rózyński G. (2004) - *Long-term shoreline response of a nontidal, barred coast*. Coastal Engineering, 52: 79-91.
- Schwab W.C., Theiler E.R., Allen J.S., Foster D.S., Swift B.A., Denny J.F. e Danforth W.W. (1999) - *Geologic mapping of the nearshore area offshore Fire Island, New York*. Coastal sediments '99, New York. Amm. Soc. Civili Eng.: 1552-1567.
- Short A.D. e Masselink G. (1999) - *Embayed and structurally controlled beaches*. In Short A.D. (edit) Handbook of beach and shoreface morphodynamics, Wiley, pp.230-250.
- Silvester R. e Hsu J.R.C (1993) - *Coastal stabilization. Innovative concepts*. PRT Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, pp 578.
- Sonu C.J. (1968) - *Collective movement of sand in littoral environment*. Proc.11th Conf. Coastal Eng., London, pp. 373-400.
- Tanner W.F. (1975) - *Beach process*. Berrien County, Michigan. J. Great Lakes Res., 1: 171-178.
- Thieler E.R. e Martin D. (2003) - *The Digital Shoreline Analysis System, Version 2.0: Shoreline change measurement software extension for ArcView*. US Geol. Surv. Open-File Report 03-076.
- White K. e El Asmar H.M. (1999) - *Monitoring changing position of coastlines using Thematic Mapper imagery, an example from the Nile Delta*. Geomorphology, 29: 93-105.

Manoscritto ricevuto il 27/11/2007, accettato il 18/1/2008.

L'intervento di stabilizzazione del litorale de Le Lame (Parco San Rossore Migliarino Massaciuccoli, Toscana)

Enzo Pranzini

Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università di Firenze, Borgo Albizi, 28 - 50122 Firenze.
epranzini@unifi.it

Riassunto

Il lobo settentrionale del delta dell'Arno è in erosione fin dalla seconda metà dell'800 e fra il 1881 e il 2001 la linea di riva è arretrata di circa 1300 m. Alla fine del secolo scorso, nonostante che l'apice deltizio non fosse più prominente in mare, l'erosione procedeva ancora ad un tasso di circa 10 m/anno. Il Parco San Rossore Migliarino Massaciuccoli, al cui interno è posto il delta dell'Arno, ha predisposto un progetto di difesa costiera che è stato realizzato fra il 2001 e il 2003. Il progetto si basa sulla realizzazione di nove corti pennelli, quattro dei quali estesi come setti sommersi; nelle tre celle meridionali è stato effettuato anche un ripascimento in ghiaia con una densità compresa fra 30 e 100 m³/m. Il confronto fra l'evoluzione della linea di riva del periodo precedente l'intervento (1993 + 2001) e di quello successivo (2003 + 2007), escludendo quindi l'espansione della spiaggia creata durante i lavori, ha messo in evidenza come la tendenza evolutiva del tratto protetto si sia invertita. L'analisi della risposta della spiaggia porta a pensare che il merito del successo dell'intervento sia da attribuirsi prevalentemente alla nuova spiaggia in ghiaia e ai setti sommersi, più che ai pennelli emersi. Il litorale posto sottoflutto ha risentito negativamente dell'intervento, ma l'incremento del tasso di erosione che si è qui verificato è assai minore della riduzione registrata nel tratto protetto. Globalmente, il tratto studiato ha visto una riduzione del tasso medio di arretramento della linea di riva.

Parole chiave: delta, erosione costiera, pennelli, setti sommersi, spiagge in ghiaia, valutazione dell'efficacia.

Abstract

The northern side of the River Arno delta has been experiencing severe erosion since the middle of the 19th century; shoreline retreated approximately 1300 m from 1881 to 2001. By the end of the last century, although the cusp was no longer protruding onto the sea, beach erosion rate was approximately 10 m/yr. The San Rossore Migliarino Massaciuccoli Regional Park, where the delta is located, carried out a shore protection project which was executed from 2001 to 2003. The project was based on the construction of nine short groins, four of which having also a submerged extension, and works of gravel nourishment in the three southernmost cells, with a density of 30 to 100 m³/meter. Comparing the local shoreline evolution before (1993 + 2001) and after (2003 + 2007) the project completion, therefore excluding the beach expansion induced by the fill, an inversion in the evolution trend is observed in the protected segment. The analysis of beach response indicates that the main merit of this success can be attributed to the artificial gravel beach and to the submerged groins, whereas the short groins have induced a limited benefit. Sectors located downdrift from the groin field experienced an increase in the erosion rate. An overall reduction in the erosion rate was observed in the coastal segment under study.

Keywords: delta, beach erosion, groins, submerged groins, gravel beaches, efficiency evaluation.

Premessa

Il delta del Fiume Arno si è formato in epoca storica a seguito del forte input sedimentario indotto dalla riduzione della copertura boschiva nel suo bacino idrografico che ha accompagnato lo sviluppo sociale ed economico della Toscana (Pranzini, 2007). L'influenza delle vicende umane sulle fasi di crescita e di erosione del delta è ben documentata (Pranzini, 2007), così come certe sono le cause del processo erosivo instauratosi dalla seconda metà dell'800: la contrazione delle superfici agricole, la costruzione di briglie e dighe lungo le aste fluviali e l'estrazione di inerti in alveo (Bartolini e Pranzini, 1979).

L'erosione è iniziata all'apice deltizio ed è andata progressivamente ad interessare tratti costieri sempre più ampi (Pranzini, 1989). Sul lobo meridionale del delta si era nel frattempo sviluppata Marina di Pisa, mentre quello settentrionale è rimasto praticamente disabitato fino ai nostri giorni. Dai primissimi anni del XIX secolo si è provveduto a costruire difese costiere a protezione dell'abitato fino alla situazione attuale, in cui i due chilometri di costa antistanti il paese sono difesi da 10 scogliere parallele pressoché continue, da una scogliera aderente in massi naturali e da alcuni pennelli che collegano le opere aderenti a quelle distaccate: ogni kilometro di costa è difeso da 2.3 kilometri di scogliere (Aminti et al., 2003).

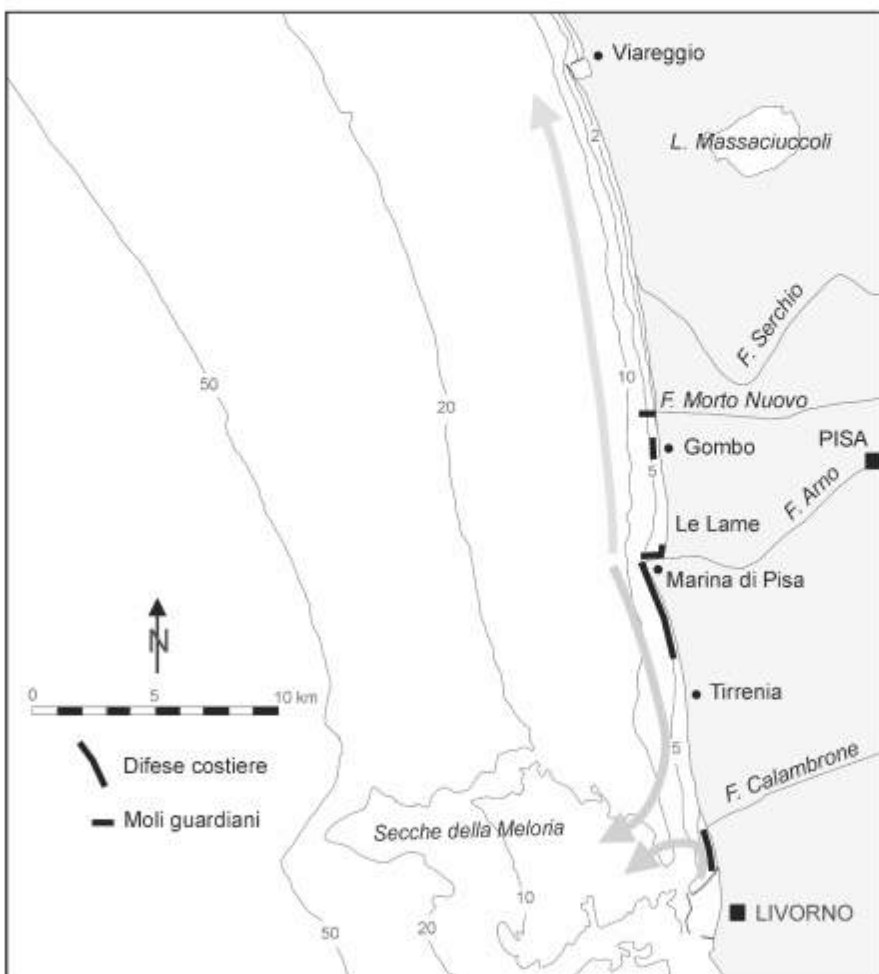


Figura 1 - Posizione dell'area di studio e direzione prevalente dei flussi sedimentari quale identificata da Cipriani et al. (2001).

spiaggia più prossima alla Villa Presidenziale, sulla quale l'erosione aveva fatto sentire pesantemente i suoi effetti. La risposta della spiaggia alla costruzione delle scogliere ed alle modifiche apportate nel 1985 è sta-

Se ciò ha determinato la stabilizzazione della linea di costa, non altrettanto è avvenuto sui fondali antistanti e al piede esterno delle scogliere parallele abbiamo profondità variabili fra i 5 e i 7 m.

L'assenza di insediamenti sul lobo settentrionale, sul quale si stendeva una Riserva Presidenziale, ha fatto sì che qui la linea di riva sia stata lasciata libera di arretrare, tanto che oggi la sua posizione, in prossimità della foce dell'Arno, è ben 1300 m più arretrata di quella del 1881.

Ciò ha determinato una asimmetria della foce fluviale (Fig. 1) che ha imposto la costruzione di un pennello in sponda destra per evitare che l'Arno sfociasse in una zona riparata dal "promontorio" di Marina di Pisa, con conseguenti problemi di insabbiamento della foce e difficoltà di smaltimento delle piene.

Fra il 1962 e il 1965 vengono costruite cinque scogliere parallele al Gombo (Fig. 1) a protezione della

ta studiata recentemente da Bowman e Pranzini (2003), che hanno messo in evidenza come queste abbiano innescato un processo di "up-drift erosion" mai descritto in letteratura.

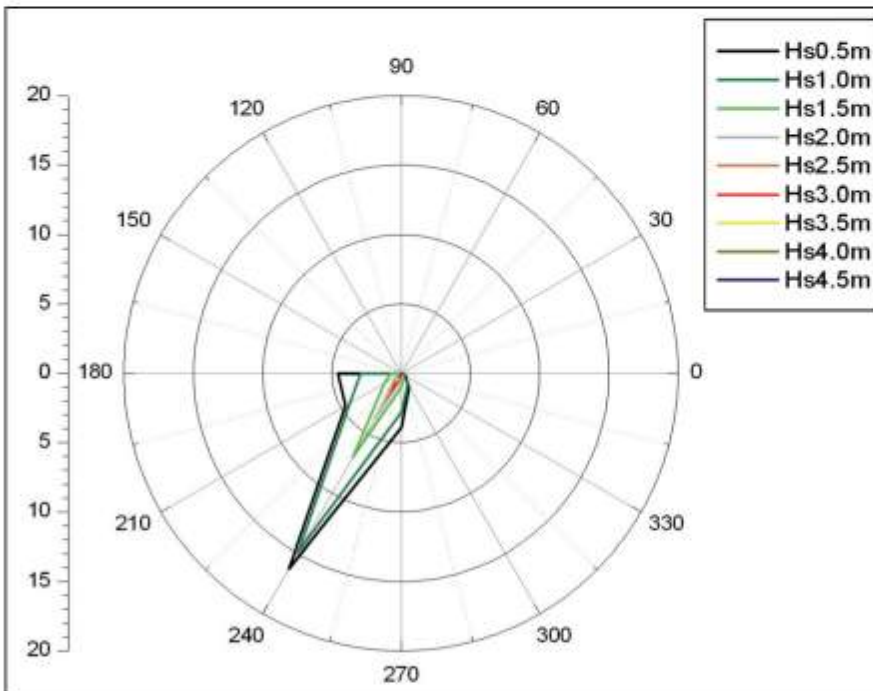
Altro elemento artificiale presente su questo tratto di litorale è la foce armata del Fiume Morto Nuovo (Fig. 1), un canale artificiale che assicura il drenaggio della pianura posta a nord di Pisa; questa struttura interrompe il flusso sedimentario diretto verso nord e protegge dall'erosione un breve tratto di litorale sopraflutto, ma incentiva l'erosione sottoflutto, dove il tasso di arretramento della linea di riva è ora di circa 5 m/anno (Cipriani et al., 2001).

La spiaggia de Le Lame, posta immediatamente a nord della foce dell'Arno, è stata soggetta ad un tasso di erosione compreso fra i 6 ed i 10 m/anno fra il 1938 e il 1993, valore che non è cambiato in modo significativo fra il 1993 e il 2001, nonostante che la costa non fosse più aggettante in mare.

La configurazione morfologica del delta vede numerosi cordoni di sabbia, vecchi *beach ridge*, decapitati dall'erosione costiera tanto che i bassi interdunali sono quasi ortogonali alla riva. Durante le mareggiate *set-up* e *run-up* favoriscono l'ingressione dell'acqua salata in superficie, e le vecchie "lame" di acqua dolce si sono trasformate in stagni salmastri, con la conseguente scomparsa dell'originaria vegetazione igrofila d'acqua dolce. Per porre un freno a questo processo, nel 1998 l'Ente Parco San Rossore Migliarino Massaciuccoli ha commissionato¹ un progetto di difesa del litorale che è stato poi realizzato dal Parco stesso fra il 2001 e il 2003.

Esposizione al moto ondoso del litorale di San Rossore²

Il litorale posto a nord della foce dell'Arno, dopo la completa erosione del lobo deltizio, ha un orientazione Nord-Sud ed è quindi esposto ai mari del terzo e quarto quadrante. Le caratteristiche del moto ondoso al largo, relativamente al periodo 1 Luglio 1992 + 31 Dicembre 2004, fornite da Metoffice, sono state propagate fino ad una profondità di 20 m tenendo conto di rifrazione, shoaling ed attrito. I dati, raggruppati per settori di 30°, sono riportati in Figura 2, dalla quale emerge una limitatissima dispersione direzionale del moto ondoso.



Mentre le calme rappresentano il 22.1% dei casi, la maggior parte degli eventi ha una provenienza da 240° (21.2%), cui seguono, con frequenze bassissime, i mari da 210° (2.1%) e quelli da 270° (1.9%). Considerando solamente le onde con Hs > 2 m, si nota come esse si verificano nel 5.4% del tempo e che ben nel 81.5% di questi casi esse provengono da 240°.

Figura 2 - Dispersione direzionale del moto ondoso calcolata sulla base dai dati Metoffice del periodo 1992 + 2004 su di un fondale di 20 m al largo della zona di studio.

¹ Il progetto è stato redatto dal Prof. Ing. Pierluigi Aminti con la collaborazione, per la parte morfologica e sedimentologica, dello scrivente.

² I dati riportati in questo paragrafo sono tratti da uno studio che DEAM s.r.l. ha effettuato per il Dipartimento di Scienze della Terra nell'ambito del Progetto BEACHMED-e / OpTIMAL.

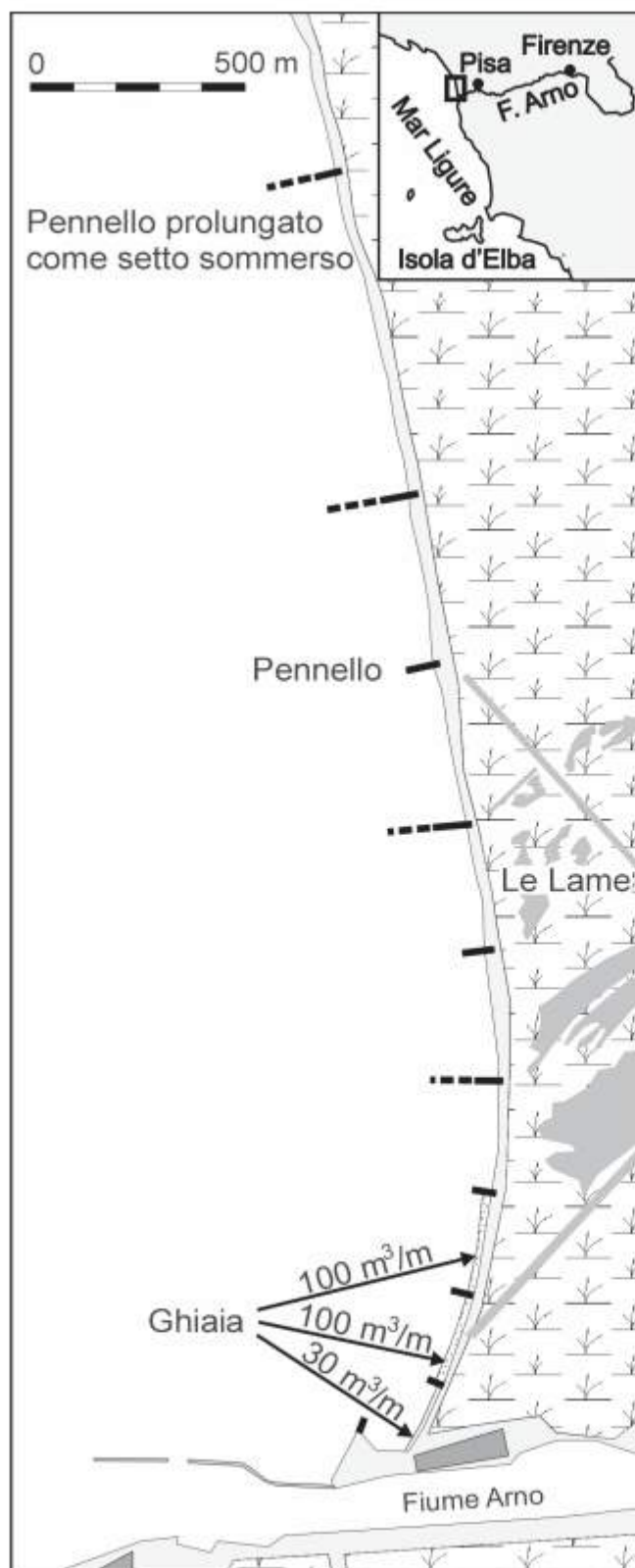


Figura 3 - Il progetto realizzato sulla spiaggia de Le Lame fra il 2001 e il 2003.

Con questa esposizione al moto ondoso, anche se questo tratto di litorale è schermato nei confronti dei mari da Libeccio dalle Secche della Meloria (Fig. 1), il trasporto litoraneo risultante è diretto verso Nord e stimato in circa 100.000 m³/anno (DEAM, 2007).

La profondità di chiusura, calcolata con la formula di Hallermeier (1978) e sulla base degli eventi registrati nei 12 anni di disponibilità dei dati Metoffice, è pari a 9.1 m, mentre quella stimata sulla distribuzione di Weibull per l'evento con periodo di ritorno cinquantennale è di 13.5 m. Nel 95% del tempo le onde non risultano in grado di modificare il profilo di spiaggia sotto alla profondità di 4.9 m.

Il progetto di difesa del litorale de Le Lame

Il progetto (Fig. 3) prevedeva la realizzazione di una scogliera semi-parallela, lunga 70 m, connessa alle difese di Bocca d'Arno e 10 pennelli in massi naturali, alcuni dei quali estesi come setti sommersi. I primi tre meridionali hanno una lunghezza di circa 60, mentre quelli più settentrionali arrivano ad essere lunghi 80 m; tutti hanno una testata che si spinge fino circa all'isobata dei 2 m. Quattro dei pennelli più lunghi sono estesi per altri 80-90 m come setti sommersi, fino a raggiungere l'isobata di circa 4 m (Fig. 4).

Il progetto prevedeva anche la realizzazione di una spiaggia in ghiaia con una densità di versamento pari a 30 m³ per metro di spiaggia e la costruzione di una duna artificiale volta ad impedire la tracimazione negli eventi meteomarinari estremi. La granulometria di progetto per la ghiaia prevedeva dimensioni medie comprese fra i 15 e i 25 mm, accettando una coda estesa dai 10 ai 30 mm, e non riconoscendo in contabilità il materiale di dimensioni esterne.

Il ripascimento è stato effettuato con frammenti di marmo bianco provenienti dagli scarti delle attività estrattive dell'area apuana, un materiale utilizzato anche altri interventi realizzati di recente lungo la costa della Toscana settentrionale (Nordstrom et al., 2007).

Alcuni problemi sorti in fase di esecuzione dei lavori, come l'approfondimento dei fondali durante la costruzione dei pennelli e i danni creati dalle mareggiate alla pista di servizio, hanno imposto un ridimensionamento del progetto, con la riduzione del volume del ripascimento in ghiaia e l'abolizione del pennello settentrionale e della duna artificiale.



Figura 4 - Il tratto settentrionale dell'intervento in cui si vedono i pennelli VIII e IX prolungati in setti sommersi che raggiungono la zona in cui si muovono le barre. I lobi chiari visibili nella parte meridionale dell'immagine sono *washover fans* che si formano preferenzialmente in corrispondenza dei bassi interdulari.

compresa fra i 231 e i 374 m, sono delimitati dalle varie coppie di pennelli, che sono più vicini nel tratto meridionale e più distanziati in quello settentrionale; i settori 9, 10 e 11 dividono in tre parti uguali il tratto di litorale che si stende per 773 m fra il pennello n. 8 e il n. 9 realizzato nel 2003.

L'assorbimento dei 30 m³/m di ghiaia inizialmente versati nella prima cella meridionale, senza la formazione di una cresta di berma sufficientemente sviluppata, ha suggerito di concentrare il volume ancora disponibile sulle due celle adiacenti, fino a giungere ad una densità di versamento di circa 100 m³/m.

Fra i problemi registrati in fase di esecuzione, che hanno influito sul risultato finale, vi è il fatto che il *tout-venant* di cava utilizzato per la costruzione della pista è stato disperso durante le mareggiate e si trova tutt'ora sulla spiaggia con elementi grossolani non previsti nel progetto. Anche le dimensioni della ghiaia versata sono risultate superiori a quelle di progetto.

I lavori si sono svolti tutti fra il 2001 e il 2002, ad eccezione della costruzione del pennello più settentrionale effettuata all'inizio del 2003.

Materiali e metodi

Lo studio dell'evoluzione del litorale sul lungo periodo si basa sul confronto fra la linea di riva del 1938 (dalla Carta delle linee di riva della Regione Toscana, 1989, in scala 1:5.000) ed una rilevata dal Dipartimento di Scienze della Terra nel 1993. La tendenza evolutiva del periodo precedente l'intervento è analizzata tramite il confronto delle linee del 1993, del 1997 (rilievo del Dipartimento di Scienze della Terra) e del 2001. Quest'ultima fa parte di una serie di tre rilievi eseguiti dalla Geostaff su incarico del Parco San Rossore Migliarino Massaciuccoli per il controllo dei lavori di riequilibrio della costa. Per l'analisi della risposta della spiaggia all'intervento sono stati utilizzati gli altri due rilievi Geostaff (2002 e 2003), uno effettuato nel 2005 dalla Geosystem per la Regione Toscana ed uno realizzato nel 2007 dalla GeoCoste appositamente per questo studio.

L'evoluzione subita dalla linea di riva negli intervalli di tempo considerati è stata analizzata suddividendo il tratto di litorale d'interesse in 21 settori di lunghezza variabile, ma omogenei al loro interno dal punto di vista delle opere di difesa che li interessano (Fig. 5). Il primo settore, lungo 197 m, è delimitato a sud della scogliera aderente posta a difesa di una caserma ed a nord dal primo pennello realizzato nel 2001. I successivi 7 settori, di lunghezza

I settori del tratto di costa non interessato dall'intervento (12 + 21) hanno lunghezze variabili fra i 182 e i 388 m, ma sono omogenei al loro interno o per il tipo di difesa o per l'evoluzione che hanno subito negli ultimi anni.

È da segnalare che i vari settori escludono il breve tratto di spiaggia coperto dai pennelli in modo da non considerare come incremento areale della spiaggia ciò che in realtà è la superficie delle varie strutture.

Per ciascun settore e per ciascun intervallo di tempo è stata misurata la variazione areale della spiaggia emersa (m^2) che, divisa per la lunghezza di ciascun settore, ha dato lo spostamento medio della linea di riva (m). Per normalizzare questi dati, riferiti ad intervalli temporali diversi, si sono calcolati i tassi di spostamento medio (m/anno).

Analisi dei dati

L'evoluzione del litorale prima dell'intervento

Per analizzare l'effetto delle opere è necessario fare riferimento a quanto accaduto negli anni precedenti e valutare quale sarebbe stata la tendenza evolutiva di questo litorale in assenza di interventi.

Fra il 1938 e il 1993 (Fig. 6a) tutto il litorale risulta interessato da un processo erosivo che raggiunge i valori massimi proprio sulla spiaggia de Le Lame, a nord di Bocca d'Arno, dove si registrano tassi di arretramento compresi fra i 5 e gli 8 m/anno (settori 1 + 6). Fanno eccezione i settori 14 e 15, al Gombo, dove si risente l'effetto positivo del potenziamento delle difese parallele (Bowman e Pranzini, 2003), ma sottoflutto ad esse l'erosione è consistente e i valori che si leggono nella Figura 5a danno una visione limitata del fenomeno, diluendo l'arretramento su 55 anni, mentre esso ha iniziato a verificarsi fra il 1954 e il 1967.

Il processo erosivo si aggrava negli anni successivi (1993-1997; Fig. 6b) e nel settore 6 si superano i 15 m/anno; solo il settore n. 3 subisce un'erosione modesta, ma la perdita di spiaggia è consistente fino al Gombo, dove le scogliere continuano ad avere un effetto di stabilizzazione, anche se prosegue l'impatto negativo nel settore posto sottoflutto. Nei quattro anni che precedono l'intervento (1997 - 2001; Fig. 6c) tutta la costa è in arretramento, con tassi che a Le Lame si collocano fra 10 e i 15 m/anno. Fra il 1938 e il 1993, lungo i 2937 m di litorale (tolta la larghezza cumulata dei pennelli) sui quali verrà effettuato l'intervento (settori 1 + 11) la linea di riva arretra in media di 245.8 m (4.50 m/anno); fra il 1993 e il 1997 arretra in media di 30.2 m (7.55 m/anno) e nei quattro anni successivi (1997 + 2001) l'arretramento è di ben 33.9 m (8.48 m/anno).



Figura 5 - Settori nei quali è stato diviso il litorale per l'analisi dell'evoluzione della linea di riva. I numeri romani identificano i pennelli. Base immagine Quickbird del 01/07/2005.

Ciò che è sorprendente è che il tasso erosivo del litorale posto a nord di Bocca d'Arno si mantenga elevatissimo nonostante che l'aggetto della cuspidè deltizia sia stato ormai completamente eliminato. Si ritiene possibile che ciò sia correlabile non solo alla ridotta alimentazione da parte dell'Arno ed al fatto che il flusso sedimentario passa al largo di questo tratto, come indica la forma della barra sabbiosa presente al largo, ma anche ad un processo erosivo innescato dalla riflessione delle onde sulle opere foranee di Bocca d'Arno (Cipriani et al., 2001).

E' in questo contesto che si colloca il progetto di difesa del litorale realizzato dall'Ente Parco San Rossore Migliarino Massaciuccoli.

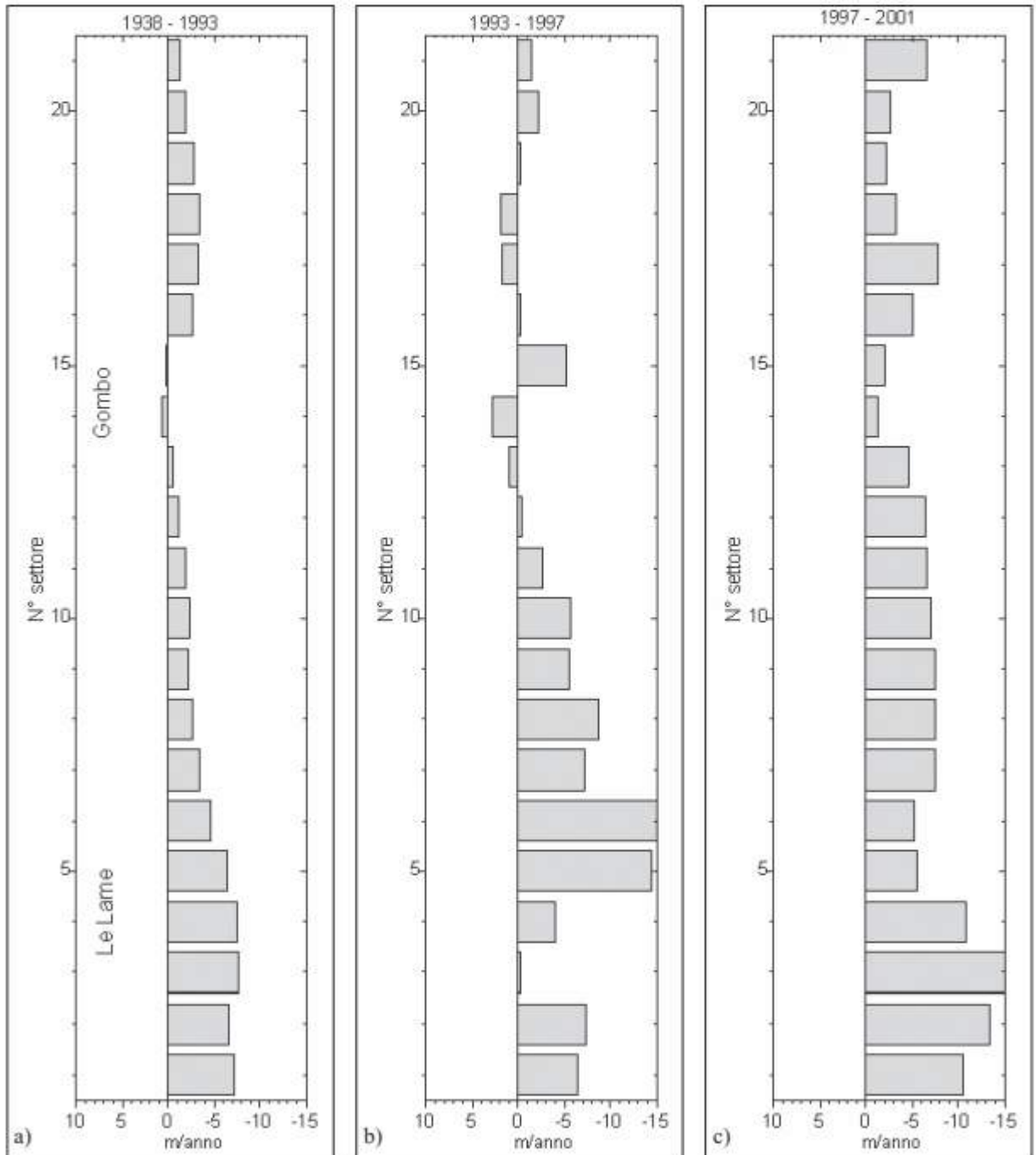


Figura 6 - Spostamento medio della linea di riva nei vari settori fra il 1938 e il 2001.

L'evoluzione del litorale dopo l'intervento

I lavori che si svolgono fra il 2001 e il 2003 determinano importanti modificazioni al litorale, non solo per la costruzione dei pennelli e il versamento di circa 65.000 m³ di ghiaia, ma anche per la realizzazione della pista che consente alle macchine di muoversi lungo costa, non essendovi percorsi alternativi per raggiungere la base dei vari pennelli. Nel progetto originario questa avrebbe dovuto essere costruita con gli stessi sedimenti da utilizzare per il ripascimento, ma problemi legati alla sicurezza hanno comportato l'utilizzazione di materiali assai più grossolani e meno classati, che si ritrovano tutt'ora sparsi in un'ampia fascia in prossimità della riva.

La lettura della risposta immediata della spiaggia a questi lavori non è semplice, sommandosi l'azione diretta del cantiere ai primi effetti delle opere; inoltre la realizzazione dei pennelli si è diluita nel tempo, con quello più settentrionale costruito solo nel 2003.

Alcuni pennelli sono stati costruiti in parallelo, interrompendo la costruzione di uno per dare inizio a quella di un altro. In questo modo le mareggiate che trovavano l'opera incompleta creavano una buca alla testa del pennello, che doveva venire riempita con massi alla ripresa dei lavori. Anche ciò, insieme alle mareggiate che spesso hanno danneggiato la pista, ha determinato quell'incremento dei costi che ha portato alla non completa realizzazione del progetto.

Fra il 2001 e il 2003, nella zona dell'intervento, solo i settori alimentati con 100 m³/m di ghiaia (settori 2 e 3) registrano un deciso avanzamento della linea di riva (Fig. 7a) e le osservazioni sul posto indicano che la sabbia è spesso andata a coprire la ghiaia sulla battigia (Fig. 8). Nella zona settentrionale prevalgono i processi erosivi, fatta eccezione per il tratto posto a nord delle scogliere del Gombo (settori 16 e 17) che riceve i sedimenti provenienti dai tomboli in fase di smatellamento.

Nei due anni successivi (2003 + 2005; Figura 7b) i settori 12 + 17 e il 21 risultano in forte erosione, mentre tutto il tratto dell'intervento (settori 1 + 11) subisce dinamiche alterne, ma con una tendenza generale alla progradazione della linea di riva (+0.42 m) sebbene nel settore 5 si verifichi una evidente erosione. Il litorale del Gombo continua a vedere una riduzione apprezzabile della spiaggia emersa, che dà luogo alle già descritte pulsazione del tratto posto sottoflutto (sette n. 19 in progradazione).

Fra il 2005 e il 2007 (Fig. 7c) tutto il tratto di litorale oggetto dell'intervento registra o una consistente progradazione o una erosione assai modesta, mentre il tratto compreso fra il Gombo e il Fiume Morto Nuovo risulta interessato da un processo erosivo di entità leggermente superiore a quella degli anni precedenti. Nel tratto in cui è stato effettuato il ripascimento in ghiaia si è formato un cordone che viene attaccato dalle onde durante gli eventi estremi (Fig. 9) ma che risulta quasi ovunque idoneo a prevenire la tracimazione delle onde nei terreni retrostanti. Ciò, in realtà, avviene solo in brevi tratti e dà luogo alla formazione di *washover fans* ghiaiosi (Fig. 10), non sempre ben identificabili perché ubicati in corrispondenza della vecchia pista del cantiere.

La crescita della spiaggia nei settori n. 20 e 21 è spiegabile alla luce dei lavori eseguiti sul pennello meridionale della foce del Fiume Morto Nuovo: la realizzazione di un martello in scogli per ridurre la riflessione delle onde sulla struttura che innescava una forte erosione alla radice dell'opera stessa (Fig. 11).

La valutazione dell'efficacia dell'intervento viene effettuata confrontando l'evoluzione subita dalla linea di riva fra il 2003 (fine lavori) e il 2007 con quella "attesa" in assenza di lavori, ossia quella che ha caratterizzato il litorale fra il 1993 e il 2001 (Fig. 12). È una procedura che penalizza i risultati raggiunti, dato che non vengono presi in considerazione gli incrementi di superficie determinati dal ripascimento del litorale, ma che ci consente di valutare se le tendenze evolutive della spiaggia sono state modificate dall'intervento.

Sebbene il tempo intercorso fra la fine dei lavori e l'ultimo rilievo sia oggettivamente esiguo (circa 4 anni), si ritiene che l'analisi possa essere considerata affidabile in considerazione della velocità dei processi che, con continuità, attaccavano questo litorale, determinando un'erosione che procedeva a tassi elevatissimi, che non trovano forse pari sulle coste italiane.

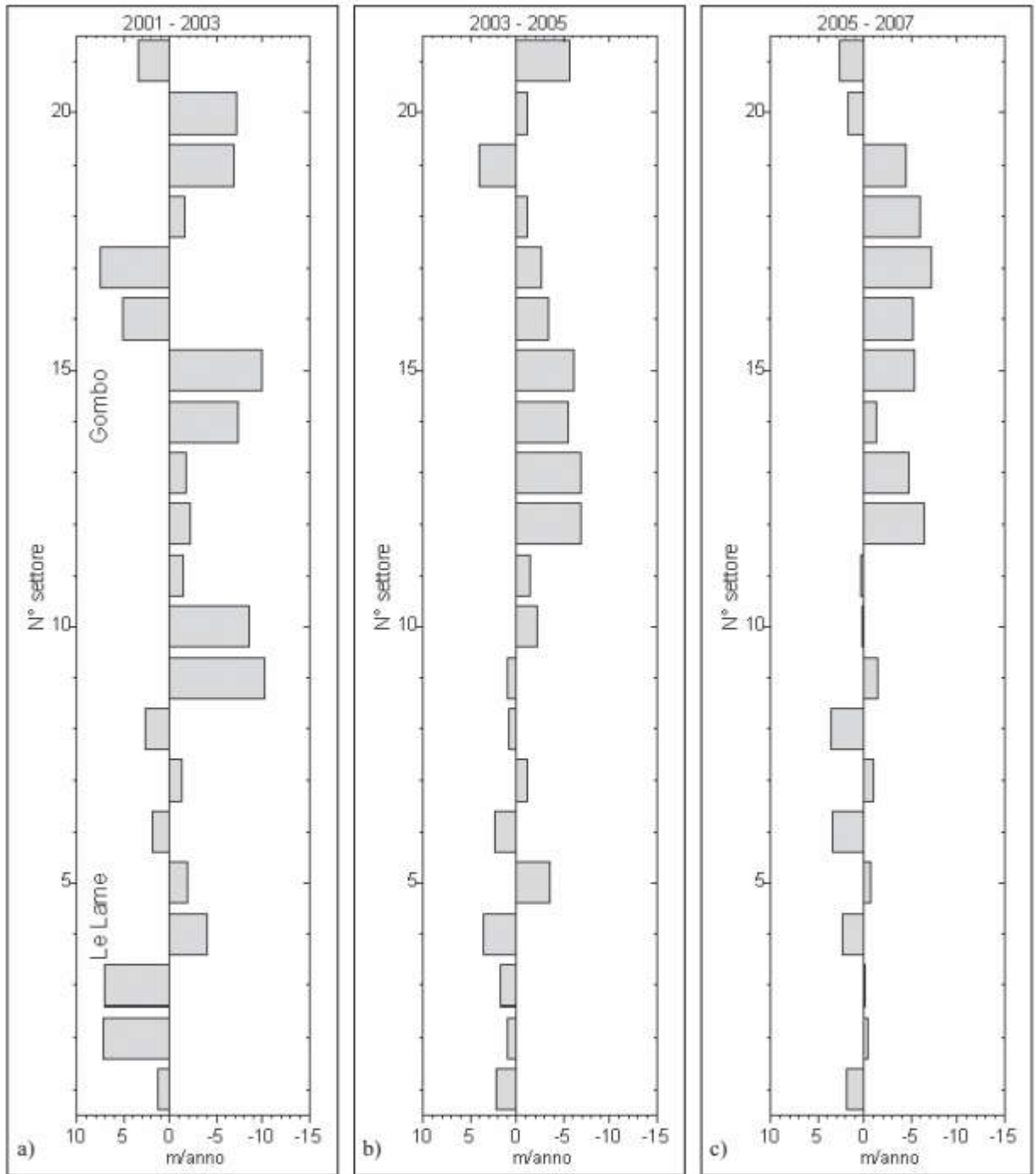


Figura 7 - Tasso di spostamento medio della linea di riva nei vari settori calcolati per periodi biennali fra il 2001 e il 2007.

Confrontando il tasso di spostamento medio della linea di riva nei vari settori per il periodo 2003 + 2007, con quello "naturale" tenuto fra il 1993 e il 2001 (Fig. 12) si nota come nel tratto interessato dall'intervento si sia avuta una inversione delle tendenze o, comunque, una forte riduzione dell'erosione.

I risultati migliori sono stati ottenuti nei tratti in cui alle opere strutturali sono stati affiancati i ripascimenti in ghiaia (Settori n. 1, 2 e 3) e quelli posti sopraflutto ai pennelli prolungati con setti sommersi (Settori n. 4, 6, 8 e 11).

Al contrario, i tratti posti sottoflutto ai pennelli rimangono in erosione, sebbene tutti con tassi decisamente inferiori a quelli "naturali".



Figura 8 - Seconda cella con ripascimento in ghiaia nelle fasi di realizzazione (30 Ottobre 2001) e sei mesi dopo, a destra, quando parte della ghiaia è coperta dalla sabbia (24 Aprile 2002).



Figura 9 - Seconda cella dove la ghiaia forma un cordone che, in quasi tutte le condizioni meteomarine, impedisce la tracimazione (Foto del 31 1 2007).



Figura 10 - Washover fan formato dietro al cordone ghiaioso in un punto in cui si è avuta tracimazione (Foto del 31 1 2007).



Figura 11 - Erosione della duna alla radice del molo guardiano della foce del Fiume Morto Nuovo. La struttura, invece che favorire la deposizione sul lato posto sopraflutto, determina la riflessione delle onde e l'erosione della spiaggia. In lontananza si vede una cuspide che si posiziona nel punto di convergenza fra il flusso sedimentario normale (diretto verso nord) e quello inverso generato dalla riflessione (diretto verso sud).

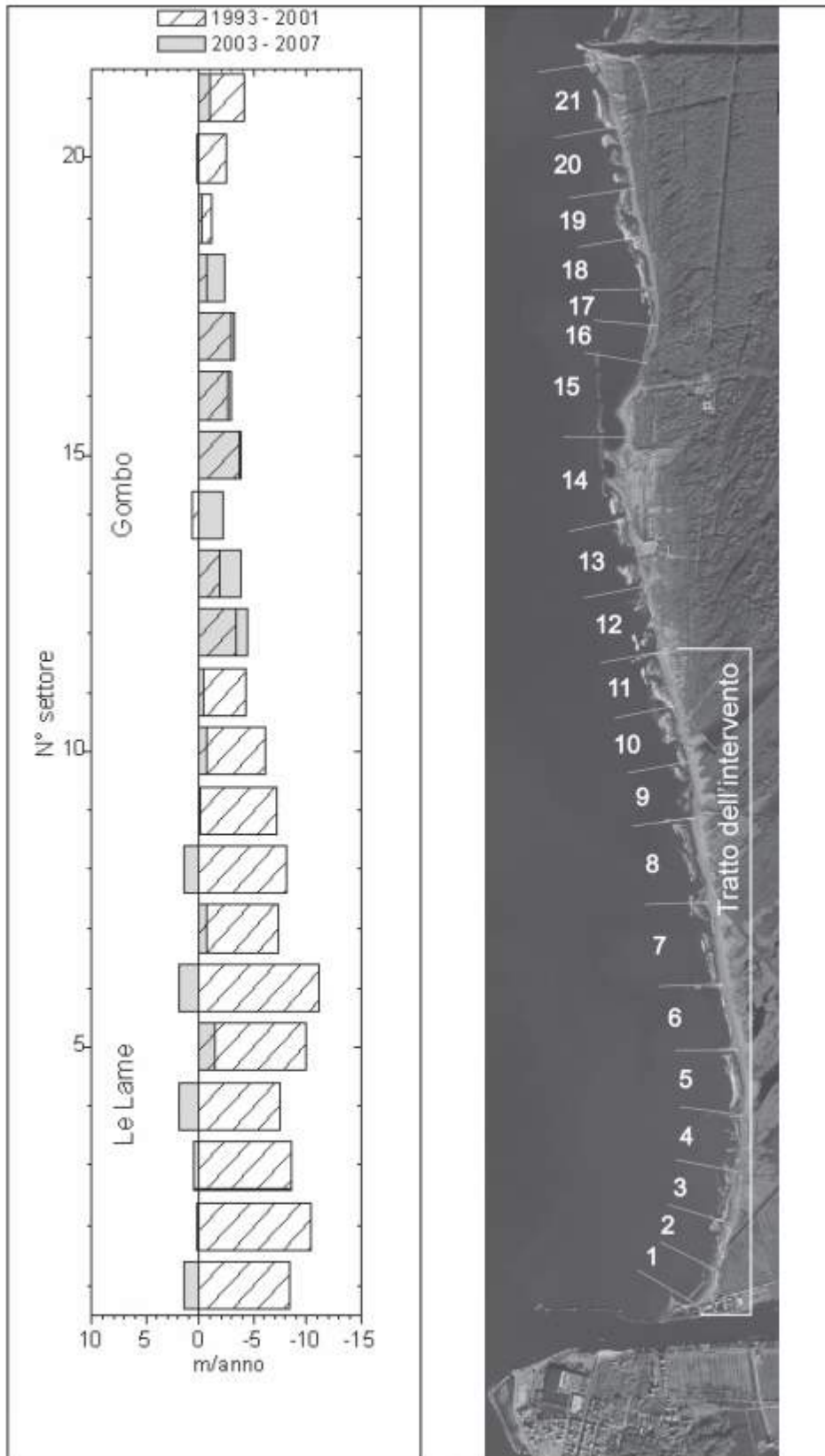


Figura 12 - Tasso di spostamento medio della linea di riva nei vari settori calcolato per il periodo successivo alla conclusione dei lavori (2003 - 2007) confrontato con quello del periodo pre-lavori (1993 - 2001).



Figura 13 - Prima cella, in cui la densità di ripascimento è stata minore (alimentata con 30 m³/m) e dove in superficie è presente quasi sempre solamente la sabbia che si è depositata a fine versamento.



Figura 14 - Terza cella (alimentata con 100 m³/m) in cui prevale l'affioramento di ghiaia.



Figura 15 - Le scogliere parallele del Gombo. A sinistra: prima e seconda scogliera riprese da nord verso sud. A destra: foto ripresa dalla seconda scogliera verso nord.

Sembrirebbe di poter affermare che la combinazione pennelli corti e ripascimento in ghiaia abbia dato una risposta decisamente migliore, sia in termini di stabilità della spiaggia che per l'assenza di impatti negativi sui tratti posti sottoflutto.

Purtroppo questi effetti positivi si accompagnano ad un incremento del tasso erosivo dei settori non protetti, dal Gombo al Fiume Morto Nuovo, che potrebbe essere letto come il normale effetto dei pennelli sui tratti di costa posti sottoflutto rispetto alla direzione del trasporto sedimentario.

In realtà l'evoluzione di quel tratto di litorale aveva già portato alla previsione dell'incremento del tasso erosivo ben prima della realizzazione dell'intervento (Bowman e Pranzini, 2001). Da quando le scogliere parallele del Gombo si sono collegate a riva con i tomboli, ossia subito dopo il loro potenziamento del 1985, si è notevolmente ridotto il flusso sedimentario che deve oggi passare al largo delle opere. Si genera così una *zeta bay* (Yasso, 1965; Silvester e Hsu, 1993) con le scogliere del Gombo quale *updrift point* e con la foce armata del Fiume Morto Nuovo quale *downdrift point*. L'approfondimento della spirale per l'erosione della spiaggia posta a nord delle scogliere determina il progressivo spostamento verso sud del punto di collegamento fra la spiaggia e le opere (Fig. 15) con lo sviluppo di una *zeta bay* sempre più ampia (Fig. 16).



Figura 16 - Parte iniziale del tratto di litorale che collega il Gombo alla foce del Fiume Morto Nuovo: la recinzione che impedisce l'accesso alla Villa Presidenziale viene costantemente demolita nonostante che ogni volta venga ricostruita in posizione arretrata.

Conclusioni

L'analisi dell'evoluzione della linea di riva del tratto di costa compreso fra la foce dell'Arno e quella del Fiume Morto Nuovo consente di affermare che l'intervento di difesa realizzato fra il 2001 e il 2003 in corrispondenza de Le Lame ha determinato una inversione di quel trend evolutivo che era in atto da più di un secolo.

L'espansione della spiaggia, o anche la sua sola stabilizzazione, dopo decenni di arretramento ad un tasso di circa 10 m/anno, ha un significato oggettivo anche se il quadro completo dei processi in corso non è definibile per l'assenza di dati batimetrici affidabili.

I piccoli pennelli associati al ripascimento in ghiaia del tratto meridionale e quelli prolungati come setti sommersi, diluiti fra i pennelli tradizionali, sembrano essere ben più efficaci di quest'ultimi.

La ghiaia risulta spesso totalmente o in buona parte coperta dalla sabbia sulla spiaggia emersa e, ladove il ripascimento ha raggiunto i 100 m³/m, si è formato un cordone ghiaioso che ostacola la tracimazione durante gli eventi meteomarinari più intensi. In alcuni punti, comunque, anche questo viene rotto e si ha la formazione di *washover fans* che disperdono la ghiaia verso l'interno. Ciò dimostra che la densità di versamento deve essere aumentata.

Il litorale non interessato dai nuovi lavori ha visto un incremento del processo erosivo, ma non è possibile stabilire se ciò sia da imputare all'effetto delle opere o a quella evoluzione che era già stata prevista in lavori precedenti ed innescata dal distacco degli elementi settentrionali delle scogliere parallele del Gombo e al conseguente approfondimento della *spiral bay* che si sviluppa sottoflutto al Gombo.

In ogni caso il bilancio netto di superficie ha visto una perdita di 238.000 m²/anno fra il 1993 e il 2001 e di soli 35.000 m²/anno fra il 2003 e il 2007, corrispondenti rispettivamente ad arretramenti di 5.2 e 1.5 m/anno, segno anche questo di un effetto "globalmente" positivo dell'intervento.

Ringraziamenti

Studio effettuato nell'ambito di una convenzione di ricerca in atto fra la Provincia di Pisa e il Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università di Firenze. Alcuni dati sono stati prodotti nell'ambito del Progetto Interreg IIIc BEACHMED-e OpTIMAL e del P.R.I.N. 2004.

Bibliografia

- Aminti P.L., Cipriani L.E. e Pranzini E. (2003) - *'Back to the beach': converting seawalls into gravel beaches*. In *Soft Shore Protection, Coastal Systems and Continental Margins Volume 7*, C. Goudas et al. (eds), Kluwer Academic Publishers, 2003, pp. 261-274.
- Bartolini C. e Pranzini E. (1979) - *Le alterazioni del bilancio sedimentario dei litorali toscani*. Convegno sulla Difesa del suolo. Firenze, maggio 1979. 8 pp.
- Bowman D. e Pranzini E. (2003) - *Reversed response within a segmented detached breakwater - the Gombo case, Tuscany coast, Italy*. *Coastal Engineering*, 49: 263-274.
- Bowman D. e Pranzini E. (2001) - *Erosion within a segmented detached breakwater (Gombo Presidential Villa beach, Tuscany, Italy)*. Proc. 5th Medcoast Conf, Hammamet, Tunisia, pp. 1479-1487.
- Cipriani L. E., Ferri S., Iannotta P., Paolieri F. e Pranzini E. (2001) - *Morfologia e dinamica dei sedimenti del litorale della Toscana settentrionale*. *Studi costieri*, 4: 119-156.
- Nordstrom K.F, Pranzini E., Jackson N. (2007) - *The marble beaches of Tuscany*. Geographical review (submitted).
- Pranzini E. (1989) - *A model for cusped delta erosion*. 6th Symp. on Coastal and Ocean Management/ASCE. Charleston, SC. Coastal Zone '89. Pp. 4345-4357.
- Pranzini E. (2001) - *Updrift river mouth migration on cusped deltas: two examples from the coast of Tuscany (Italy)*. *Geomorphology*, 1-2: 125-132.
- Silvester R. e Hsu J.R.C (1993) - *Coastal stabilization. Innovative concepts*. PRT Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, pp 578.
- Yasso W. (1965) - *Plan geometry of headland-bay beaches*. *Journ. Geology*, 73: 702-714.

Manoscritto ricevuto il 5/5/2007, accettato il 21/1/2008.

L'utilizzazione di immagini telerilevate ad alta risoluzione per lo studio dell'erosione costiera: estrazione della linea d'acqua e valutazione della sua accuratezza

Sara Carli ¹, Niccolò Iandelli ¹, Enzo Pranzini ¹ e Rosamaria Salvatori ²

¹ Dipartimento di Scienze della Terra, Università degli Studi di Firenze, Borgo Albizi, 28 - 50122 Firenze.

² CNR - Istituto per lo Studio dell'Inquinamento Atmosferico,
Via Salaria, km 29.300 - 00016 Monterotondo Stazione (RM).

Riassunto

Il confronto fra le firme spettrali acquisite lungo un profilo di spiaggia in punti caratterizzati da diverse condizioni di umidità (sabbia asciutta, umida, satura e coperta da un velo d'acqua) mette in evidenza la difficoltà di identificazione della linea di riva su immagini telerilevate. La misura della distanza media fra la linea d'acqua rilevata *in situ* con DGPS e l'analoga linea estratta automaticamente da una immagine Ikonos ha consentito di valutare l'efficacia delle varie tecniche di elaborazione finalizzate al monitoraggio dell'erosione costiera.

Lo scostamento medio fra la linea d'acqua estratta dal rapporto B2/B4 e dall'NDVI è risultato inferiore alle dimensioni del pixel al suolo.

La distanza fra le due linee risulta essere minima in quei tratti di litorale in cui la pendenza della *nearshore* è elevata, mentre dove questa è modesta lo scostamento diventa estremamente variabile. L'accuratezza della linea d'acqua estratta da dati telerilevati è quindi tale da consentire il monitoraggio dell'erosione in quei tratti costieri in cui il tasso di arretramento è elevato. I risultati qui ottenuti consentono di affermare che i dati che verranno prodotti dai satelliti che stanno per essere messi in orbita, e che ospiteranno sensori a maggiore risoluzione spaziale e con bande di acquisizione più estese verso l'IR, consentiranno il controllo dell'erosione costiera anche dove il processo è meno intenso.

Parole chiave: telerilevamento, erosione costiera, Ikonos, firme spettrali.

Abstract

Comparison of spectral signatures acquired along a beach transect, in points characterised by different wetness conditions (sand that is dry, wet, saturated, and covered by a water layer) puts into evidence the difficulty that arises when identifying the shoreline position using satellite images, and suggests which are the best image processing techniques to be used for this end. Measuring the mean distance between the shoreline position obtained in situ using DGPS, and the corresponding shoreline position that was extracted automatically from an Ikonos image, allowed to evaluate the efficiency of different image processing techniques that are used in coastal erosion monitoring. The mean difference between the DGPS shoreline position, and the shoreline positions extracted from the B4/B2 rapport and from the NDVI were, respectively, 2.27 m and 2.89 m, being therefore smaller than the pixel dimensions at the ground.

The distance between the two shoreline positions results to be very short in those coastal sections where the slope of the nearshore is high, whereas distance varies considerably where this slope is low. The accuracy of the position of the water line extracted from remotely sensed data is able to allow erosion monitoring in

coastal sections which are under severe shoreline retreat. Our results allow to state that data that will come from satellites that will be put into orbit in the near future, hosting sensors at a higher spatial resolution which will have acquisition bands that are enlarged towards the IR, will allow to monitor coastal erosion even where this process is less intense.

Keywords: *Remote sensing, beach erosion, Ikonos, spectral signatures.*

Introduzione

Fin dal 1972, anno in cui si resero disponibili alla comunità scientifica i dati del primo satellite a media risoluzione per l'Osservazione della Terra (ERTS-1, poi ribattezzato Landsat-1) si cercò di utilizzarli per lo studio delle aree costiere, sia nella loro parte emersa che in quella sommersa (Nayak e Sahai, 1985; King e Green, 2003).

Nonostante gli ottimi risultati ottenuti nella caratterizzazione morfologica dei litorali, nello studio degli estuari e dei fondali, l'estrazione della linea di riva, sia in modo manuale che automatico, e quindi lo studio dei processi erosivi, non raggiunse mai risultati soddisfacenti per la scarsa risoluzione geometrica del sensore MSS (IFOW = 79 m x 79 m; dimensioni nominali del pixel = 56 m x 79 m).

La messa in orbita dei satelliti Landsat di seconda generazione (1982), con il sensore TM (Thematic Mapper), aprì nuove possibilità per lo studio dei litorali grazie alle ridotte dimensioni del pixel al suolo (IFOW = 30 m x 30 m nominali; 28.5 x 28.5 m nelle immagini georiferite) ed anche alla estensione della finestra di osservazione all'infrarosso medio, parte dello spettro elettromagnetico in cui la riflettività dell'acqua e della sabbia bagnata è prossima a zero.

Con SPOT (Système Pour l'Observation de la Terre; 1986), oltre ad un ulteriore incremento della risoluzione geometrica nelle bande multispettrali (20 m), si creò la possibilità di una loro fusione con la banda Pancromatica con risoluzione di 10 m; cosa possibile dal 1999 con i dati Landsat ETM (Enhanced Thematic Mapper), in cui vi è una banda Pancromatica a 15 m.

L'accuratezza che si poteva raggiungere nella determinazione della posizione della linea di riva poteva quindi arrivare ad una decina di metri, anche se con tecniche di "unmixing" era teoricamente possibile scendere a valori ancora più bassi (Yates et al., 1993).

Per il monitoraggio di breve e medio termine dell'erosione costiera una simile accuratezza non era sufficiente, dato che lo spostamento della linea di riva procede in genere con tassi annuali assai inferiori, anche se vi sono casi di arretramento maggiori, come quelli registrati sul delta del Nilo (39m/anno; Frihy et al., 1998) e sul delta del Gange-Brahmaputra (25 m/anno; Allison, 1998), dove infatti i dati telerilevati furono usati con successo.

Anche in Italia, dove il 42% delle spiagge è in erosione (G.N.R.A.C., 2006), i tassi massimi di arretramento si verificano sui delta fluviali e si attestano proprio intorno ai 10 m/anno: delta dell'Arno e dell'Ombrone (Pranzini, 2001), del Tevere (Caputo et al., 1986) e del Po, (Cecini, 1998). In genere, però, raramente superano i 5 m/anno. Con i dati rilevati da satellite non era quindi possibile effettuare un vero monitoraggio del fenomeno, a meno di non accettare un errore nel posizionamento della linea di riva dello stesso ordine di grandezza del dato che si andava a misurare.

Recentemente sono stati messi in orbita nuovi sensori che riprendono immagini ad altissima risoluzione spaziale e rendono quindi possibile affrontare il problema del monitoraggio dell'erosione costiera con dati da remoto.

I satelliti Ikonos e Quickbird, ad esempio, acquisiscono immagini multispettrali con risoluzione rispettivamente di 4 m e 2.40 m, ed immagini pancromatiche a 1 m e 0.61 m di risoluzione, e quindi compatibili con l'entità del fenomeno da monitorare.

Entrambi i sensori, però, operano solo nell'intervallo spettrale compreso tra 450 e 900 nm e di conseguenza non acquisiscono dati in quelle bande dell'infrarosso in cui l'acqua modifica sensibilmente la risposta spettrale delle superfici e che permettono quindi di enfatizzare il contrasto terra-acqua, o meglio, sabbia asciutta-sabbia bagnata.

Nonostante ciò, il monitoraggio dell'erosione costiera da satellite diventa una possibilità concreta, anche se non sono state ancora sviluppate quelle metodologie certe ed efficaci di estrazione automa-

tica della linea di riva che renderebbero il processo di analisi e confronto rapido e completamente indipendente dall'operatore.

Nell'ambito del Progetto BEACHMED-e l'Unità operativa di Firenze sviluppò e testò una procedura di estrazione della linea di riva da dati Landsat TM che consentiva il tracciamento semiautomatico della linea di riva, intesa come l'isobata "zero". Il processo si basava sull'identificazione del bordo acqua-non acqua fatta su di una banda rilevata nell'InfraRosso Vicino (NIR), nell'estrazione della linea di contatto attraverso l'applicazione di un filtro *edge detection* e nella sua traslazione in funzione della pendenza della spiaggia (da rilievi a terra indipendenti) e dei valori di marea astronomica e barica. In questo modo l'accuratezza raggiunta si aggirava intorno ad 1-2 pixel (BEACHMED, 2004).

In questo lavoro si intende valutare l'efficacia dei tradizionali algoritmi di estrazione della "linea d'acqua" da immagini ad alta risoluzione; ove per linea d'acqua si intende l'insieme dei punti in cui terra, mare ed aria si incontrano (Pranzini, 2004). Ovviamente questa linea non costituisce un *datum* assoluto, ma questo può essere ricavato con le tecniche di traslazione prima citate.

I dati utilizzati sono quelli acquisiti dal satellite Ikonos e l'area di test corrisponde ad un tratto del litorale del Golfo di Follonica.

L'area di studio: la spiaggia di Follonica

La spiaggia antistante l'abitato di Follonica (Fig. 1) fa parte dell'unità fisiografica che si estende dal promontorio di Piombino al Puntone di Scarlino ed è alimentata prevalentemente dal F. Cornia, dal F. Bruna e dal Fosso di Valmaggiore.



Figura 1 - Immagine Ikonos della spiaggia di Follonica acquisita il 18/04/2007 (Bande 1-2-3; B-G-R) sulla quale sono state effettuate tutte le elaborazioni. Nel riquadro il tratto di costa per il quale vengono presentati i dati nelle figure successive (in blu la linea d'acqua rilevata con GPS).

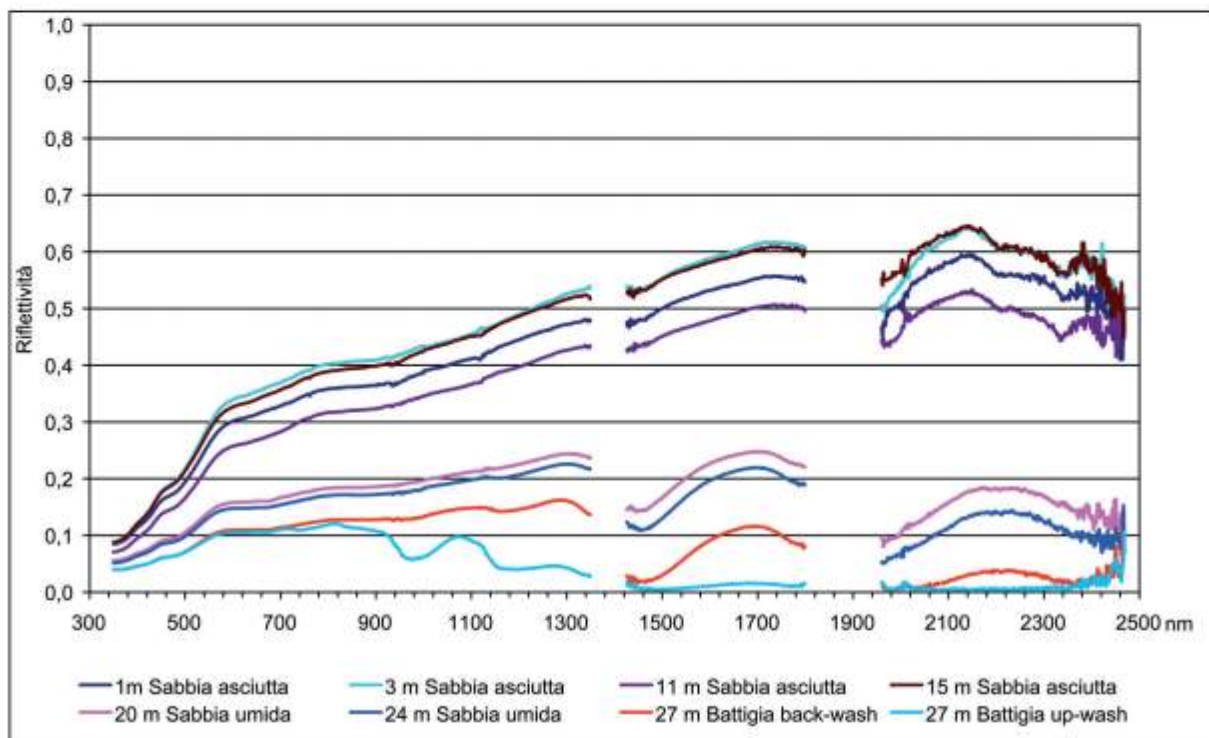
I sedimenti che formano la spiaggia di Follonica sono costituiti da *sabbia fine* ($2 < Mz < 3 \text{ phi}$) *ben classata* ($0.35 < \sigma_1 < 0.50 \text{ phi}$) secondo la classificazione di Folk e Ward (1957). Nella composizione mineralogica principale prevale il Quarzo monocristallino (56%) e subordinatamente i frammenti litici carbonatici (18%); seguono poi i frammenti litici metamorfici (10%), i Feldspati potassici (7%) e i litici terrigeni (5%). Fra i minerali pesanti prevalgono Augite, Epidoto e Picotite (Gandolfi e Paganelli, 1975).

Il litorale del Golfo di Follonica è entrato in erosione nel XIX sec., quando i principali corsi d'acqua che lo alimentano furono deviati per la bonifica delle numerose aree palustri presenti lungo la costa (Bartolini et al., 1977). Nel XX secolo furono le variazioni di uso del suolo nei bacini di alimentazione e le estrazioni di inerti in alveo a favorire il perpetuarsi del processo erosivo che, nel tratto di litorale in questione, è stato combattuto fin dagli anni '60 con la costruzione di opere di difesa aderenti, parallele emerse e sommerse e pennelli, che conferiscono oggi alla linea di riva una forte variabilità.

La firma spettrale della spiaggia

Per valutare come la presenza di acqua modifichi la risposta spettrale dei sedimenti di spiaggia, sono state effettuate misure *in situ* per acquisire la firma spettrale della sabbia asciutta, bagnata e coperta da un velo d'acqua. A questo scopo è stato utilizzato un radiometro FieldSpec 3 (ASD inc. USA) con risoluzione spettrale di 1 nm nell'intervallo 350 + 2500 nm, mediando 10 misure successive ed utilizzando un pannello di *Spectralon* come superficie di riferimento per il calcolo della riflettanza.

Le misure sono state effettuate in 8 punti lungo un transetto ortogonale a riva partendo dalla spiaggia alta e giungendo sulla battigia: in 4 punti sulla spiaggia asciutta, in 2 all'interno della fascia bagnata e in uno sulla battigia. In quest'ultimo punto la misura è stata fatta sia in fase di *wash-up* (con uno spessore di circa 1 cm di acqua) sia in fase di *wash-down* (spiaggia satura). In Figura 2 compaiono le firme spettrali nel range 350 + 2500 nm, mentre in Figura 3 sono tracciate le firme spettrali limitatamente all'intervallo di acquisizione del sensore posto a bordo del satellite Ikonos, del quale sono indicati i valori medi delle quattro bande.



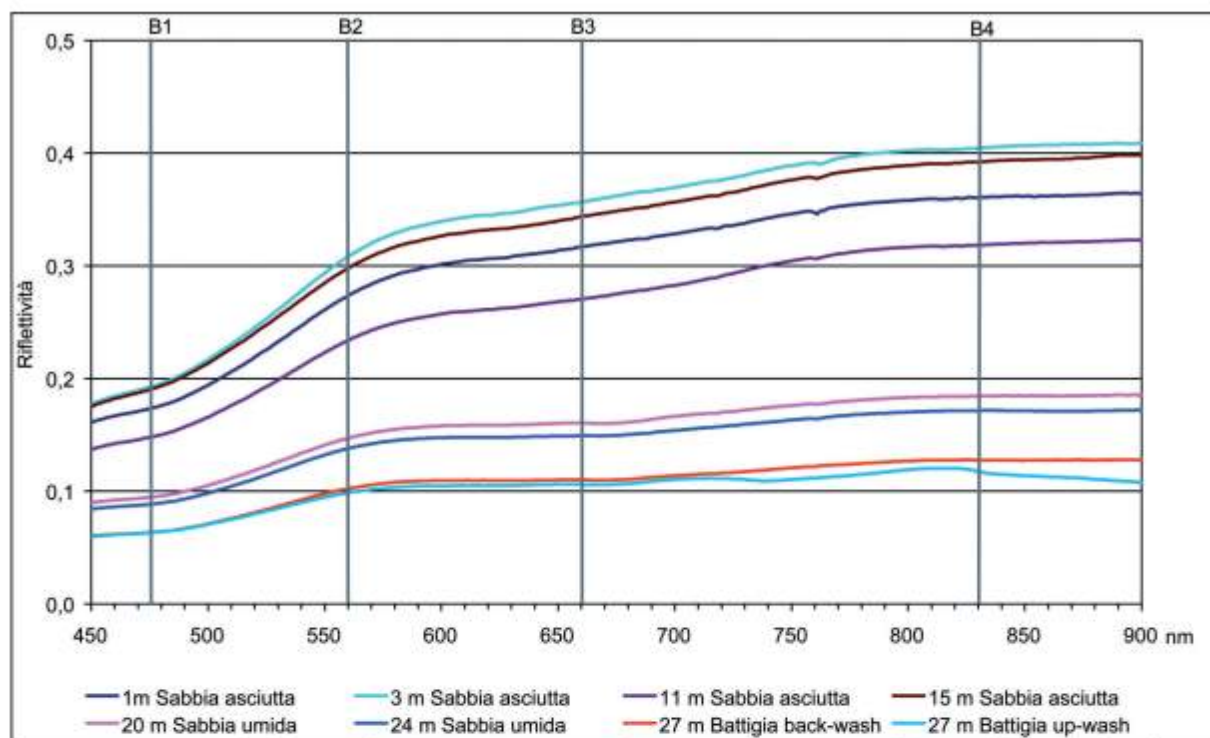


Figura 2 - Firme spettrali nell'intervallo 350 + 2500 nm acquisite lungo un transetto ortogonale a riva sulla spiaggia di Follonica.

Figura 3 - Firme spettrali nell'intervallo 450 + 900 nm acquisite lungo un transetto ortogonale a riva sulla spiaggia di Follonica. È indicato anche il centro dell'intervallo spettrale di acquisizione delle 4 bande multispettrali Ikonos. Scala verticale limitata al valore di 0.5.

La sabbia asciutta mostra valori di riflettività estremamente bassi al limite inferiore del visibile fra 350 e 450 nm, ma che crescono rapidamente andando verso il rosso, per poi proseguire a crescere in modo più leggero fino ai 2200 nm. Per i quattro punti osservati la variazione di riflettanza è circa del 10% e sembra non esserci correlazione tra i valori di riflettanza e la distanza lungo il transetto.

La sabbia bagnata, nella zona che era stata interessata dal *run-up* poche ore prima delle misure, mostra un andamento simile ma con una variabilità minore e con valori decisamente più bassi nel visibile ed ancor più bassi nell'IR vicino e medio, evidenziando così la presenza di acqua, che a queste lunghezze d'onda assorbe la radiazione solare, come già osservato in spiagge diverse (Deronde et al., 2006).

La battigia, sia nel momento di *wash-up* che di *wash-down* ha riflettività identica fino a 650 nm per differenziarsi poi con un abbassamento rapido nella fase in cui è coperta da un velo d'acqua; le differenze sono ovviamente ancora maggiori nell'NIR dove l'acqua ha riflettività praticamente uguale a zero.

Purtroppo le differenze maggiori fra le firme acquisite si manifestano oltre il range di acquisizione del sensore a bordo di Ikonos, mentre fra 450 e 900 nm i valori di riflettività sono piuttosto omogenei e le curve hanno un andamento circa parallelo.

L'albedo nel range 475 + 900 nm è di 0.309 per la sabbia asciutta, 0.128 per quelle umida, 0.108 per quella saturata e di 0.101 per l'acqua.

Questi valori mostrano che una discriminazione fra le superfici non è semplice, fatta eccezione per la separazione fra sabbia asciutta e sabbia umida, tanto da fare pensare che, in assenza di un controllo a terra, la gran parte delle elaborazioni presenti in letteratura per l'identificazione della linea di riva nella banda pancromatica del sensore Ikonos mettano in realtà in evidenza il limite superiore raggiunto dal *run-up* nelle ore precedenti l'acquisizione.

Tabella 1 - Misure di campo ricampionate per l'ampiezza delle bande Ikonos e valore dei due rapporti che hanno permesso la migliore discriminazione fra le superfici analizzate.

Bande Ikonos (nm)	1 m Sabbia asciutta	3 m Sabbia asciutta	11 m Sabbia asciutta	15 m Sabbia asciutta	20 m Sabbia umida	24 m Sabbia umida	27 m Battigia back-wash	27 m Battigia up-wash
Pan 450 ÷ 900	0.3030	0.3405	0.2631	0.3297	0.1567	0.1459	0.1078	0.1015
B1 450 ÷ 520	0.1839	0.2047	0.1570	0.2018	0.1003	0.0938	0.0675	0.0671
B2 510 ÷ 600	0.2621	0.2948	0.2239	0.2857	0.1404	0.1316	0.0972	0.0941
B3 630 ÷ 700	0.3181	0.3585	0.2723	0.3450	0.1611	0.1498	0.1105	0.1067
B4 760 ÷ 850	0.3575	0.4012	0.3157	0.3886	0.1826	0.1697	0.1262	0.1166
B2/B4	0.7331	0.7349	0.7095	0.7352	0.7693	0.7751	0.7707	0.8070
B3/B4	0.8899	0.8937	0.8626	0.8878	0.8825	0.8826	0.8760	0.9147

La verità al suolo

Nel presente studio la verità al suolo è costituita dalla linea d'acqua acquisita in contemporanea al sorvolo del satellite da due squadre che operavano con un DGPS in modalità RTK.

Al momento del rilievo il mare era calmo e la posizione della linea d'acqua era facilmente individuabile dagli operatori. I rilievi sono stati effettuati fra un'ora prima ed un'ora dopo il passaggio del satellite, cosa che ha contenuto le variazioni di marea astronomica e barica entro i 5 cm che, data la modesta pendenza della battigia (media 4.76%), implicano uno spostamento della linea d'acqua di circa ± 0.5 m.

In alcuni punti è stata rilevata anche la posizione del limite fra la sabbia bagnata e quella asciutta, che corrisponde alla posizione raggiunta dal *run-up* alcune ore prima del rilievo, e dista in media 6.0 m dalla linea d'acqua.

Elaborazione delle immagini

L'elaborazione delle immagini è stata effettuata con il software ENVI ver. 4.4 e i risultati sono stati confrontati con la verità al suolo in ambiente GIS (ESRI ArcGIS, ver. 9.1).

Una prima fase di elaborazione è consistita in semplici *stretch* lineari delle varie bande, nello *slicing* in due livelli, nell'estrazione del bordo con filtro *edge detection*.

Successivamente, sono state effettuate differenze normalizzate e rapporti fra bande (Fig. 4), per procedere poi ad elaborazioni più complesse, dall'Analisi delle Componenti Principali al *Ratio Transform Method* (Stumpf e Holderied, 2003); è stata effettuata anche una classificazione *unsupervised* (ISO-DATA) in due classi, ipoteticamente "acqua" e "non acqua" (Alphan, 2005).

Dato che le varie elaborazioni producono immagini con una distribuzione bimodale dei valori digitali, esse sono state oggetto di *slicing* in due livelli ponendo la separazione nel cavo presente fra le due mode, in modo da rendere più oggettiva la decisione. Nel caso in cui gli indici portino a valori positivi e negativi, è stato usato lo zero come valore di separazione. Per consentire una più chiara comprensione dei risultati delle varie elaborazioni, nella Figura 4 sono riprodotte le bande Ikonos come appaiono prima della separazione di toni.

Le linee di riva così estratte sono state confrontate con la posizione della linea d'acqua rilevata *in situ*, calcolandone la distanza lungo 33 profili per i quali è stata misurata la pendenza del tratto compreso fra le quote 0.0 e -0.5 m su di un rilievo batimetrico effettuato due mesi dopo il sorvolo. Il tratto studiato è difeso intensamente da scogliere parallele e le condizioni meteomarine dei due mesi intercorsi consentono di ritenere che non si siano verificate variazioni significative della pendenza del profilo di spiaggia nel tratto considerato.

Tabella 1 - Distanza media fra la linea di riva estratta dall'immagine Ikonos e quella rilevata *in situ* con DGPS. I valori negativi indicano che la linea telerilevata è posta a terra rispetto a quella "vera".

	GPS - B4	GPS - NDVI	GPS - NDWI	GPS - UNSUP	GPS - RWD Algorithm	GPS - (B2/B4)	GPS - PCA1 (Green vs NIR)
Media	-8.40	-2.89	11.85	-3.83	-7.61	-2.27	-4.75
Dev. Std.	5.42	2.11	11.57	3.01	5.66	2.21	2.59

Sono state effettuate anche elaborazioni sulle bande multispettrali dopo averne portato la risoluzione ad 1 m con una tecnica di fusione con la banda Pancromatica (*Pan-sharpening*), ma i risultati raggiunti non sono stati soddisfacenti per problemi relativi alle tecniche di ricampionamento: quella basata sul *nearest neighbour* delocalizza i valori originari dei pixel con spostamenti dello stesso ordine di grandezza dell'accuratezza raggiunta, mentre quella basata sull'interpolazione (bilineare o cubica) riduce il contrasto spettrale fra i pixel d'interesse che hanno già differenze modestissime.

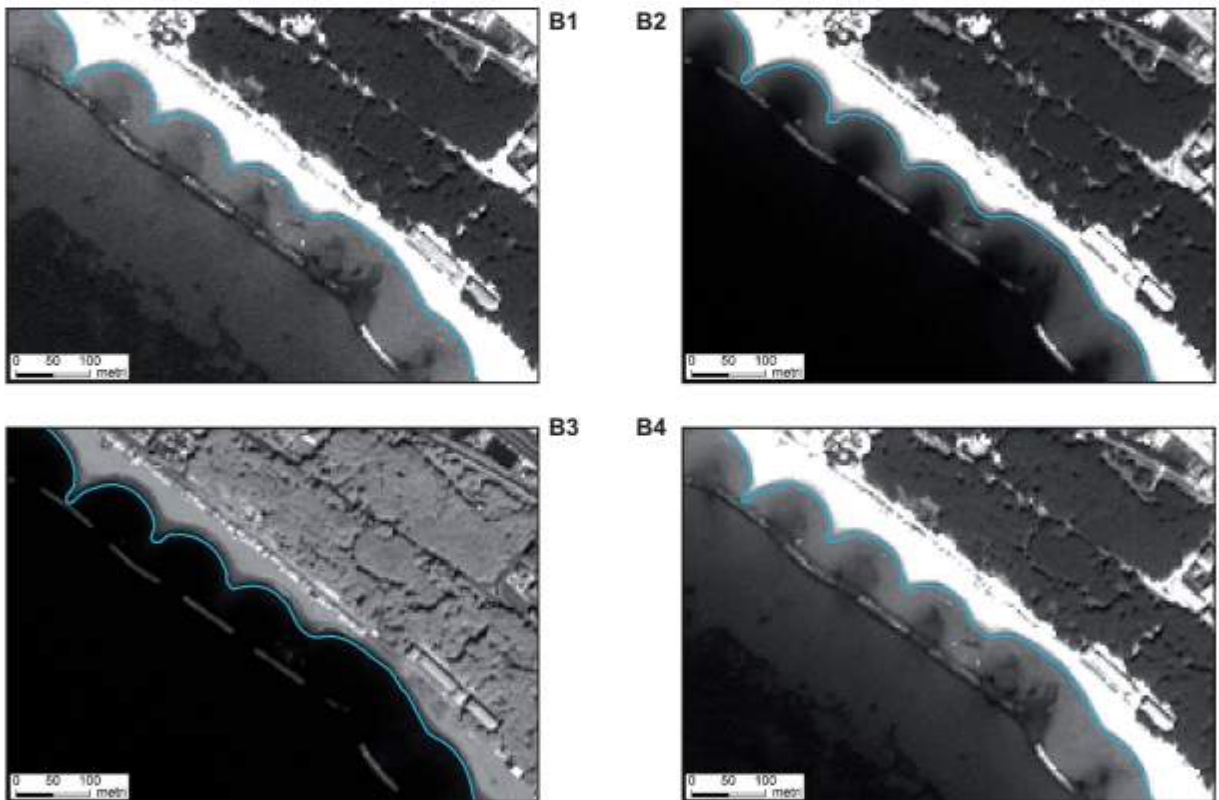


Figura 4 - Le 4 bande di Ikonos con sovrapposta la linea d'acqua GPS.

Infrarosso vicino

Fra le singole bande (Fig. 4) quella che consente la discriminazione migliore fra acqua, sabbia bagnata e sabbia asciutta è la Banda 4, come appare anche dalle firme spettrali di Figura 3. Nonostante ciò, nei 33 transeetti considerati lo scostamento medio della linea d'acqua estratta dopo aver effettuato uno *slicing* in due livelli e aver sottoposto l'immagine risultante ad un filtro *edge detection*, lo scostamento dalla linea DGPS è risultato pari a -8.40. Nel risultato influisce in modo determinante il valore del livello di grigio sul quale porre la separazione fra "acqua" e "non acqua", decisione estremamente soggettiva dato che le due mode non sono separate nettamente.

Rapporto fra bande

Il rapporto fra bande viene in genere usato per ridurre l'effetto rilievo dalle immagini (Crippen et al., 1988), cosa ovviamente non necessaria nel nostro caso; l'utilizzazione che qui ne viene fatta si basa sulla possibilità di separare superfici che hanno un diverso gradiente di riflettanza in un determinato intervallo spettrale.

Sebbene nel range 450 + 900 nm le curve rappresentative della firma spettrale delle diverse superfici di spiaggia siano circa parallele, si osserva che da 560 nm a 830 nm (B2 + B4) il gradiente è leggermente diverso fra la curva dell'acqua e quella della battigia. Infatti, fra tutti i rapporti fra bande possibili (Fig. 5) è proprio il rapporto B2/B4 quello che porta ad una migliore discriminazione fra le due superfici considerate, con uno scostamento medio della linea d'acqua di 2.27 m rispetto a quella GPS.

Il rapporto B3/B4 esplicita il gradiente fra 660 nm e 830 nm, che è leggermente diverso fra la firma della spiaggia umida e quella della spiaggia asciutta e consente quindi di delimitare in modo netto il limite superiore del *run-up* nelle ore precedenti l'acquisizione.

Fra i rapporti è l'unico che non consente di vedere le scogliere parallele, che assumono lo stesso livello di grigio del mare; queste sono costituite da massi molto scuri ed hanno una "cresta bassa" tale da renderle costantemente bagnate: non sorprende quindi che abbiano una risposta simile a quella della zona di *run-up* che, in questa elaborazione, viene associata al mare.

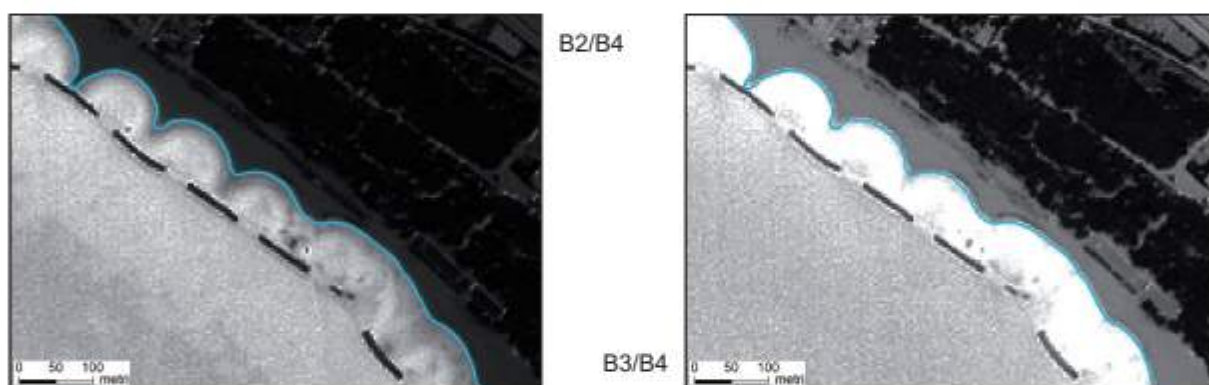


Figura 5 - Rapporti fra le bande del satellite Ikonos. In ciano è tracciata la linea d'acqua rilevata con GPS al momento del passaggio del satellite.

NDVI

Il *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) è un algoritmo semplice ma estremamente robusto per valutare la densità e lo stato della vegetazione e opera sul contrasto spettrale Rosso vs InfraRosso Vicino. È stato utilizzato in passato anche per mappare gli specchi d'acqua, in particolare in aree vegetate (Hirose et al., 2005). Nel nostro caso ha prodotto risultati interessanti, consentendo di posizionare la linea d'acqua ad una distanza media di soli 2.89 m da quella "vera".

NDWI

Il *Normalized Difference Water Index* (NDWI) (McFeeters, 1996) inverte i termini dell'NDVI ed usa la banda del Verde al posto di quella del Rosso: $(Green - NIR) / (Green + NIR)$. In questa elaborazione l'acqua assume valori positivi, mentre il suolo e la vegetazione valori negativi; la sabbia asciutta, con riflettività elevata sia nel Verde che nell'NIR viene ad avere valori positivi ma prossimi a zero.

Nell'area di test i risultati di questa elaborazione non sono stati soddisfacenti, con uno scostamento della linea d'acqua di ben 11.85 m dalla linea "vera"; inoltre è l'unica elaborazione che posiziona il contatto terra-acqua a mare rispetto alla linea DGPS. In effetti, come appare anche nella Figura 6b, l'errore è molto forte dietro alle scogliere parallele, dove la pendenza della spiaggia è minima e si hanno bassi fondali fino alle opere di difesa. Questo algoritmo, nel caso studiato, tende quindi a "non vedere" i piccoli spessori d'acqua che coprono la battigia e i fondali antistanti.

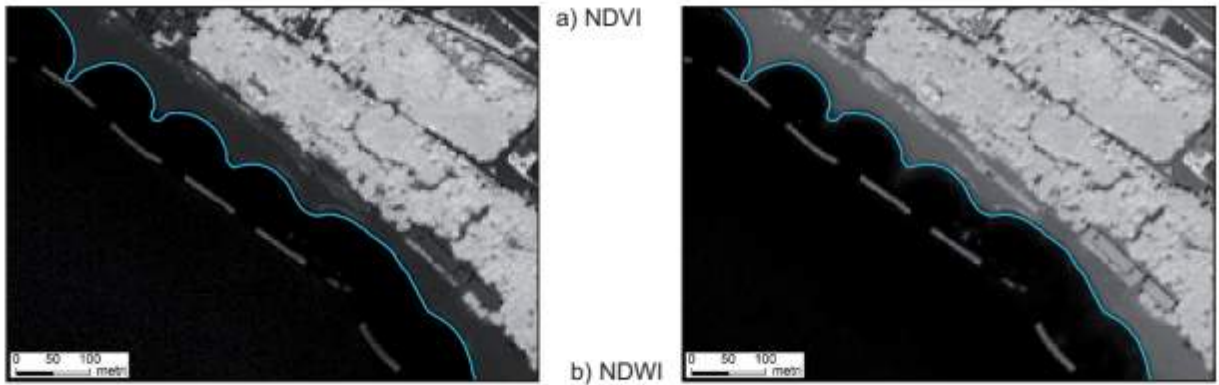


Figura 6 - Immagini NDVI e NDWI prodotte dalle bande del satellite Ikonos. In ciano è tracciata la linea d'acqua rilevata con GPS al momento del passaggio del satellite.

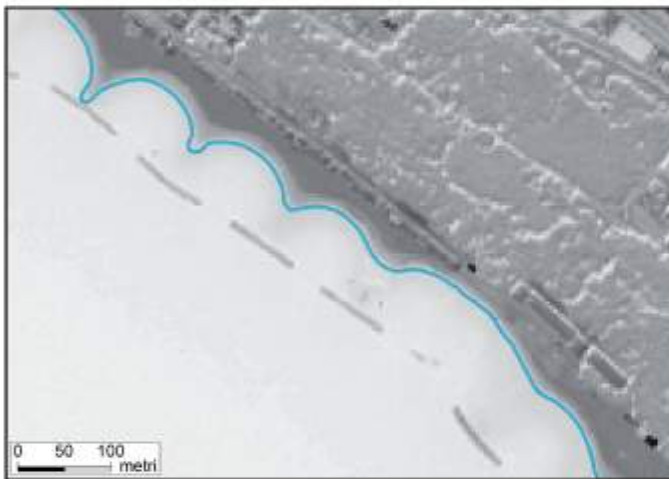


Figura 7 - Immagine della PC1 calcolata con le Bande 2 e 4 del satellite Ikonos. In ciano è tracciata la linea d'acqua rilevata con GPS al momento del passaggio del satellite.

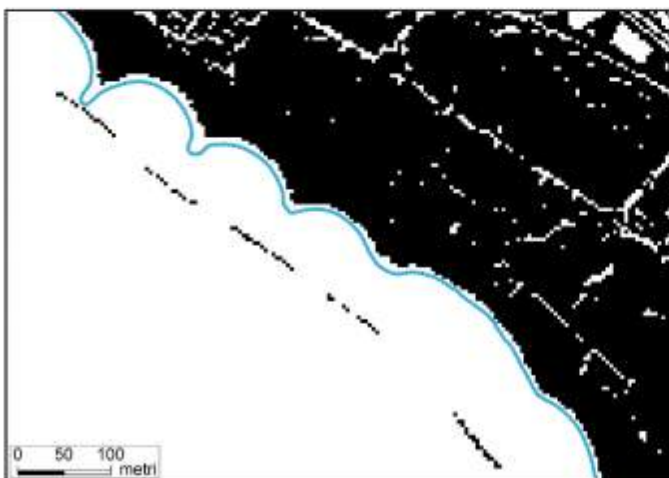


Figura 8 - Immagine della Relative Water Depth con *slicing* a 0 m. In ciano è tracciata la linea d'acqua rilevata con GPS al momento del passaggio del satellite.

Analisi delle Componenti Principali

L'Analisi delle Componenti Principali (PCA) è una elaborazione statistica utilizzata frequentemente in telerilevamento per generare, dalle bande originali fortemente correlate, nuove bande sintetiche non correlate.

Essa porta necessariamente a risultati dipendenti dalla statistica del *data set* e non consente interpretazioni codificate delle immagini prodotte. Già il taglio della scena influenza i risultati e quanto ottenuto per il nostro *subset* non è trasferibile ad altre aree dello stesso Golfo di Follonica. Fra le varie elaborazioni possibili, mostriamo qui l'immagine della Prima Componente Principale (PC1) estratta dal *data set* costituito solo dalle Bande 2 e 4, quelle che avevano prodotto il migliore rapporto. La linea d'acqua estratta da questa immagine ha uno scostamento medio di 4.75 m dalla linea "vera".

Ratio Transform Method

Il *Ratio Transform Method* (Stumpf e Holderied, 2003) è stato sviluppato per la determinazione della profondità relativa fra due o più zone sulla base dei valori di riflettanza nel Blu e nel Verde e contiene al suo interno le opportune correzioni radiometriche ed atmosferiche. L'uso che ne viene fatto in questo lavoro è quindi "atipico", in quanto la differenza di profondità cercata è quella fra le zone emerse e quelle sommerse. L'immagine prodotta, in effetti, presenta un istogramma con due mode ben separate, ma lo *slicing* in due livelli porta ad una discriminazione fra sabbia asciutta, da un lato, e battigia + acqua, dall'altro, ma non consente un accurato tracciamento della linea d'acqua (scostamento medio 7.61 m).

Valutazione dei risultati in funzione della pendenza della spiaggia

Per la linea d'acqua ottenuta con la migliore accuratezza, quella prodotta dal rapporto B2/B4, si è analizzato come si distribuisce l'errore in funzione della pendenza della battigia, essendo questo il parametro che determina lo spessore della lamina d'acqua ad una determinata distanza dalla linea d'acqua effettiva.

Il confronto fra pendenza ed errore (distanza fra linea GPS e linea derivata da Ikonos) mostra in modo chiaro questa correlazione: laddove la pendenza è maggiore l'accuratezza della linea derivata è assai migliore (Fig. 9).

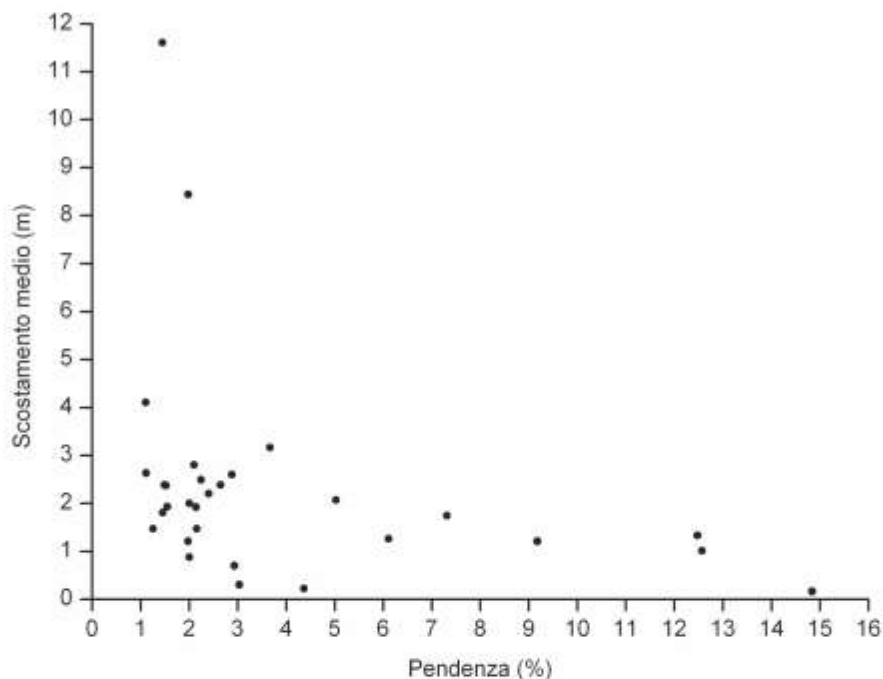


Figura 9 - Confronto fra pendenza della spiaggia e scostamento della linea di riva estratta dal rapporto B2/B4 dalla linea DGPS.

La dispersione dei punti è estremamente elevata a pendenze modeste, dove si hanno scostamenti sia piccoli che grandi, ma con pendenza superiore al 6% lo scostamento risulta sempre inferiore ai 2 m. I tratti di litorale in cui l'accuratezza è minore sono quelli più direttamente difesi dalle scogliere parallele, che formano

salienti con una pendenza del profilo di spiaggia estremamente modesta (Fig. 10).



Figura 10 - Linea di riva estratta dal rapporto B2/B4 (in rosso) linea d'acqua da DGPS (punti ciano). Si noti come la distanza fra le due linee sia

maggiore nel tratto più riparato dalla scogliera parallela, dove la pendenza della spiaggia è minore.

Conclusioni

I dati rilevati dal satellite Ikonos consentono di tracciare con buona approssimazione la linea d'acqua lungo i litorali sabbiosi, elemento di partenza per ottenere la posizione della linea di riva tramite la correzione per la marea astronomica e barica.

La linea d'acqua estratta dall'immagine rapporto B2/B4 mostra uno scostamento medio pari a 2.27 m rispetto alla linea acquisita *in situ* nel momento del passaggio del satellite. È ragionevole pensare che risultati analoghi, in rapporto delle dimensioni del pixel al suolo, siano raggiungibili con i dati prodotti dai satelliti che ospitano sensori che acquisiscono nelle stesse bande spettrali. In questo senso l'accuratezza raggiungibile con immagini Quickbird dovrebbe essere pari a circa 1.40 m.

I buoni risultati ottenuti nel nostro test sono certamente dovuti alla bassa riflettività della sabbia del Golfo di Follonica, che mostra un'albedo di 0.309 nel range di osservazione di Ikonos; non è detto che in spiagge costituite da sabbie più chiare si possa ottenere un'accuratezza simile.

D'altra parte, la spiaggia di Follonica ha una pendenza modesta anche nei tratti non difesi dalle scogliere e si ritiene che l'algoritmo proposto, ed anche gli altri qui meno efficaci, possa portare a risultati decisamente migliori in spiagge più ripide.

In conclusione, i dati prodotti dai sensori ad alta risoluzione consentono l'estrazione della linea di riva con un'accuratezza sufficiente a garantire un monitoraggio di medio e lungo termine dei processi erosivi dei litorali, mentre per l'analisi di breve periodo, dove sono attese variazioni di qualche metro, la risoluzione spaziale e spettrale dei sensori attualmente in orbita non consente ancora di operare in modo efficace.

In realtà è oggi operativo il satellite Geo-Eye-1, con una banda pancromatica con risoluzione di 0.41 m e 4 bande multispettrali a 1.64 m, ma il dato pancromatico è commercializzato dopo un ricampionamento che abbassa la risoluzione a 0.50 m, in osservanza delle restrizioni del governo americano. Le bande multispettrali potrebbero comunque consentire un'accuratezza di circa 1 m.

Più che di un incremento della risoluzione spaziale dei sensori, per i nostri scopi è auspicabile l'estensione dei rilievi all'infrarosso medio, ma la minore quantità di energia in arrivo dal Sole a queste lunghezze d'onda rende difficile la realizzazione di un sensore capace di attivarsi se non raccogliendo luce da una superficie maggiore. In questa direzione le attese sono poste in WorldView-II che, oltre alla banda pancromatica con risoluzione 0.41 m (degradata a 0.50 m), ospiterà un sensore con risoluzione di 1.84 m in multispettrale con una banda nell'intervallo $0.86 + 1.04$. Non siamo ancora nell'infrarosso medio, ma le misure che abbiamo effettuato indicano che in questo range l'acqua ha una risposta spettrale assai diversa da quella della spiaggia satura. Le possibilità di un monitoraggio dell'erosione costiera con dati rilevati da satellite si faranno assai più concrete.

Ringraziamenti

Ricerca effettuata nell'ambito dell'Operazione BEACHMED-e "La gestione strategica della difesa dei litorali per lo sviluppo sostenibile delle zone costiere del Mediterraneo".

Si ringrazia Roberto Salzano del CNR-IIA (Roma) per la collaborazione fornita nell'esecuzione delle misure di riflettività della spiaggia.

I rilievi topografici e batimetrici sono stati effettuati dalla GeoCoste (Firenze).

Bibliografia

- Allison M.A. (1998) - *Historical changes in the Gange-Brahmaputra delta front*. Journ. Coastal Research, 14: 480-490).
- Alphan H. (2005) - *Perceptions of coastline changes in river deltas: southeast Mediterranean coast of Turkey*. International Journal of Environment and Pollution, 23: 92-102.
- Aminti P., Cipriani L.E. e Pranzini E. (2002) - *Beach erosion control along the Golfo di Follonica (Suthern Tuscany): actual hard protections vs. potential soft solutions*. Littoral 2002, 6th Int. Symp., Porto, Portogallo. Pp. 355-363.
- Bartolini C., Pranzini E., Lupia Palmieri C. e Caputo C. (1977) - *Studi di geomorfologia costiera: IV - L'erosione del Golfo di Follonica*. Boll. Soc. Geol. It., 96: 87-116.
- BEACHMED (2004) - *Quaderno tecnico n. 3*. Roma, pp. 275.

- Caputo C., La Monica G.B., Lupia Palmieri E. e Pugliese F. (1986) - *Physiographic characteristics and dynamics of the shore of Rome*. International Geomorphology, John Wiley & Sons, Part 1, pp. 1185-1189.
- Cecini C. (1998) - *Physical processes and human activities in the evolution of the Po delta, Italy*. Journ. Coastal Research, 14: 774-793.
- Crippen R.E., Blom R.G. e Heyada J.R. (1988) - *Directed band ratioing for the retention of perceptually-independent topographic expression in chromaticity-enhanced imagery*. Int. J. Remote Sensing, 9: 794-765.
- Deronde B., Houthuys R., Henriët J.-P., Van Lancker V. (2007) - *Monitoring of the sediment dynamics along a sandy shoreline by means of airborne hyperspectral remote sensing and LIDAR: a case study in Belgium*. Earth Surface Processes and Landforms, Vol. 33, Issue 2, Pagg. 280-294.
- Folk R.L. e Ward W.C. (1957) - *Brazos river bar: a study in the significance of grain size parameters*. J. Sedim. Petrol., 27: 3-26.
- Frihy O.E., Dewider K.M. e El Banna M.M. (1998) - *Natural and human impact on the northeastern Nile delta coast of Egypt*. Journ. Coastal Research, 14: 1109-1118.
- Gandolfi G. e Paganelli L. (1975) - *Il litorale toscano fra Piombino e la foce dell'Ombrone (Area campione Alto Tirreno). Composizione, provenienza e dispersione delle sabbie*. Boll. Soc. Geol. It., 94: 1911-1832.
- GNRAC (2006) - *Lo stato dei litorali italiani*. Studi Costieri 10, pp. 176.
- Hirose K., Soyji M., Hang H.T.M., Anh N.H., Trier T. Nam V.N., e Tran T.B. (2005) - *Satellite data application for mangrove management*. 16th Workshop OMISAR, pp. 7.1-7.4.
- Innocenti L. e Pranzini E. (1993) - *Geomorphological evolution and sedimentology of the Ombrone River delta (Italy)*. Journ. Coastal Research, 9: 481-493.
- King S.D. e Green D.R. (2003) - *Matching issue to utility: an hierarchical store of remotely sensed imagery for coastal zone management*. In Green e King Ed., Coastal Systems and Continental Margin, Vol. 4, Coastal and Marine Geo-Information Systems. Kluwer Academic Publishers, pp. 473-486.
- Lillesand T.M., Kiefer R.W. e Chipman J.W. (2008) - *Remote sensing and image interpretation*. John Wiley & Sons, Inc. pp. 756.
- McFeeters S.K. (1996) - *The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features*. Int. J. Remote Sensing, 17: 1425-1432.
- Nayak, S.R. e Sahai, B. (1985) - *Coastal morphology: a case study in the Gulf of Khambhat*. International Journal of Remote Sensing, 6: 559-568.
- Pranzini E. (2001) - *Updrift river mouth migration on cusped deltas: two examples from the coast of Tuscany (Italy)*. Geomorphology, 1-2: 125-132.
- Pranzini E. (2004) - *La forma delle coste. Geomorfologia costiera, impatto antropico e difesa dei litorali*. Zanichelli, Bologna, pp. 246.
- Stumps R.P. e Holderied K. (2003) - *Determination of water depth with high-resolution satellite imagery over variable bottom types*. Limn. Oceanogr., 48: 547-556.
- Yates M.G., Jones A.R., McGroarty S e Gross-Custard J.D. (1993) - *The use of satellite imagery to determine the distribution of inter-tidal surface sediments of the Wash, England*. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 36: 333-344.

Manoscritto ricevuto il 13/11/2007, accettato il 18/02/2008.

Studio dell'evoluzione della linea di costa della piana del Sele (Campania) mediante l'uso della cartografia numerica

Giuseppe D'Acunzi¹, Tommaso De Pippo², Carlo Donadio², Francesco Peduto¹, Ugo Santoro³,
Francesco Sessa¹, Francesco Terlizzi² e Maria Donata Turturiello¹

¹ Provincia di Salerno

² Dipartimento di Scienze della Terra - Università degli Studi di Napoli Federico II

³ S.F.M. s.r.l. - Salerno

Riassunto

Al fine dell'analisi dell'evoluzione della linea di costa del tratto litoraneo compreso tra Salerno e Agropoli, è stata condotta una ricostruzione delle variazioni storiche avvenute, utilizzando prese aerofotogrammetriche, relative agli anni 1954-55, 1984, 1994 e 2001, con restituzione cartografica, in scala 1:5.000, della fascia costiera per almeno 300 m a partire dalla battigia.

Lo studio ha previsto, quale sua base di lavoro, la costruzione di una cartografia numerica vettoriale, con metodo aerofotogrammetrico e con l'utilizzo di stereorestitutori analitici, relativamente al tratto in esame. È stata così sviluppata un'analisi diacronica che ha consentito di fissare l'esatta posizione della linea di costa riferita agli anni delle aerofoto, di definire con esattezza l'andamento dei *trend* di arretramento o di avanzamento, di realizzare una carta tematica dedicata utilizzando una sintesi grafica con sovrapposizione della parte vettoriale (linee di costa) ad ortofoto digitali (ortoimmagini di anni diversi), evidenziando così in modo oggettivo le variazioni della linea di costa.

I principali *step* del processo di analisi diacronica sono stati dapprima il riconoscimento e la scansione dei fotogrammi relativi alle aree di studio, a cui è seguita la realizzazione di raffinato DEM (*Digital Elevation Model*) e conseguente ortogonalizzazione delle stesse. È stata quindi eseguita la sovrapposizione della cartografia e dei fotogrammi che ne ha consentito il riconoscimento e la definizione delle linee di riva relative agli anni 1954-55, 1984, 1994 e 2001.

I risultati ottenuti indicano una complessiva tendenza all'arretramento della linea di costa nel Golfo di Salerno, con differenti valori nelle diverse aree e con alcuni tratti in controtendenza.

I dati ad oggi disponibili e la relativa cartografia costituiscono la base per le attività di monitoraggio della linea di costa e particolarmente importanti per valutare e verificare, rispetto alle attuali tendenze evolutive, l'efficacia e/o gli effetti dei differenti interventi di difesa che saranno realizzati lungo la costa sul tratto di litorale interessato e su quelli adiacenti, sia a scala di Unità che di Sub-Unità fisiografica.

Negli ultimi 50 anni, il litorale indagato mostra una diffusa tendenza all'arretramento, a volte anche con l'erosione della cresta del cordone dunare recente. I fenomeni di erosione generalmente sono legati alla scarsità del trasporto fluviale solido a causa delle enormi quantità di sabbia e ghiaia prelevate dai fiumi, o a causa della sistemazione idraulico-forestale operata lungo i bacini fluviali, e per la presenza sui fiumi di barriere e dighe. La rimozione dei sedimenti dal crinale della duna e dalla spiaggia, così come la forte pressione di origine antropica lungo la costa, contribuisce localmente ad accelerare i processi di erosione. I fenomeni riconosciuti concorrono alla perdita di depositi di sabbia dal litorale, causando l'aumento della pendenza del profilo della spiaggia, l'accumulo di ciottoli sulla battigia, l'erosione della cresta della duna recente, determinando, infine, il generale degrado dell'ambiente costiero con conseguente perdita economica a causa della mancata valorizzazione del paesaggio costiero ai fini turistici.

Parole chiave: geomorfologia costiera, aerofotogrammetria, cartografia digitale, variazione della linea di riva, piane fluviali.

Abstract

The study of the coastline evolution of the littoral stretch between the towns of Salerno and Agropoli has been carried out with a detailed and corrected reconstruction of its variation in the last 50 years. The analysis of the coastal band, wide at least 300 m beginning from the shoreline, has been achieved through aerial stereo photos relative to 1954-1955, 1984, 1994, and finally 2001 years. This study, founded on the construction of a numerical cartography, in vector format, allowed us to develop a diachronic analysis with the aim to fix the coastline position and to define recession or advancing trends, as well as to realize thematic maps using a graphical summary with vectorial shape (coastlines) superimposed to digital orthophoto of several years highlighting the objective changes in coastline.

The main steps of the diachronic analysis process have been at first the acknowledgement and the scansion of photographs of the study areas, and the realization of refined DEM (Digital Elevation Model) and consequent orthogonalization of the same.

The data indicate a regression tendency of the coastline in the Gulf of Salerno, with different values in the various areas and with some sector in countertendency. The available data and the cartography represent the base for the monitoring of activities along the coast, both in order to estimate the efficiency and to control the effects of the different protection structures which will be built up along the seashore. In the last 50 years, the investigated shoreline shows a spread tendency to the recession, at times also with the erosion of the recent dune ridge. The erosion focuses generally are linked to the scarce fluvial solid transport due to the huge sand and gravel withdrawal from the riverbeds, or to the hydraulic sistemation along the river basins, and to the presence of river barriers and dams. The sediment removal from the dune ridge and the beach, as well as the strong anthropogenic pressure along the coast, locally contributes to accelerate the erosion processes. The recognized phenomena contribute to the loss of sand deposits from the shoreline, causing the slope increase of the beach profile, the accumulation of pebbles on the foreshore, the erosion of the recent dune ridge, and finally the general degradation of the coastal environment with consequent lack of economic receipts for tourist-recreational exploitation of the coastal landscape.

Keywords: coastal geomorphology, aerophotogrammetry, digital cartography, shoreline changes, river plain.

Inquadramento geologico e geomorfologico

Il Golfo di Salerno è una depressione tettonica estesa in direzione WSW-ENE lungo il margine continentale tirrenico, delimitata dai M. Lattari della Penisola Sorrentina (NW), dai M. Picentini (NE) e dal Promontorio del Cilento (SE) che individuano l'ampia Piana del Sele (Fig. 1). Le faglie dirette, che delimitano ai bordi la piana con un rigetto di circa 3000 m, probabilmente connesse a trascorrenze con movimento sinistro, mostrano un prevalente andamento anti-appenninico (Brancaccio et al., 1986; Cinque et al., 2000) individuando in mare un sistema a *Horst e Graben*.

L'individuazione della depressione del Golfo di Salerno-Piana del Sele è conseguente alle fasi di apertura del Mar Tirreno, un bacino di tipo interarco a margine passivo (Bartole et al., 1984).

Alcuni elementi morfostrutturali che caratterizzano il paesaggio di quest'area campana sono la Valle di Salerno, costituita da una profonda depressione sottomarina bordata a N dalle faglie dirette della Penisola Sorrentina e riempita da una sequenza di sedimenti spessa circa 3300 m, d'età compresa tra il Neogene superiore ed il Quaternario, e la Linea del Sele, che rappresenta invece l'estensione a mare del fronte alloc-tono delle unità del Gruppo del Cilento (Bartole et al., 1984).

Nell'area in esame sono state riconosciute quattro unità sismiche di cui la più recente, correlata a sedimenti d'età compresa tra il Pliocene inferiore ed il Quaternario, poggia in discordanza stratigrafica su quelle più antiche, attribuita alle fasi tettoniche del Pliocene inferiore (Budillon et al., 1994).

Il principale elemento morfostrutturale del Golfo di Salerno è però rappresentato dall'ampia depressione della piana costiera del F. Sele, il cui elemento morfologico dominante è rappresentato da estese superfici subpianeggianti, ben raccordabili fra loro in destra e sinistra idrografica delle incisioni dissecate dal Sele, dal Calore e da altri corsi d'acqua minori (Cinque et al., 1986).

La bassa valle fluviale, invece, posta ad ovest di Borgo San Cesareo tra la confluenza del F. Calore in sinistra idrografica del Sele e la foce, è caratterizzata dalla presenza di 4 ampi meandri fin oltre Ponte Barizzo ed infine da un segmento subrettilineo lungo circa 3 km fino alla località Foce del Sele, dove il fiume sbocca nel Mar Tirreno.

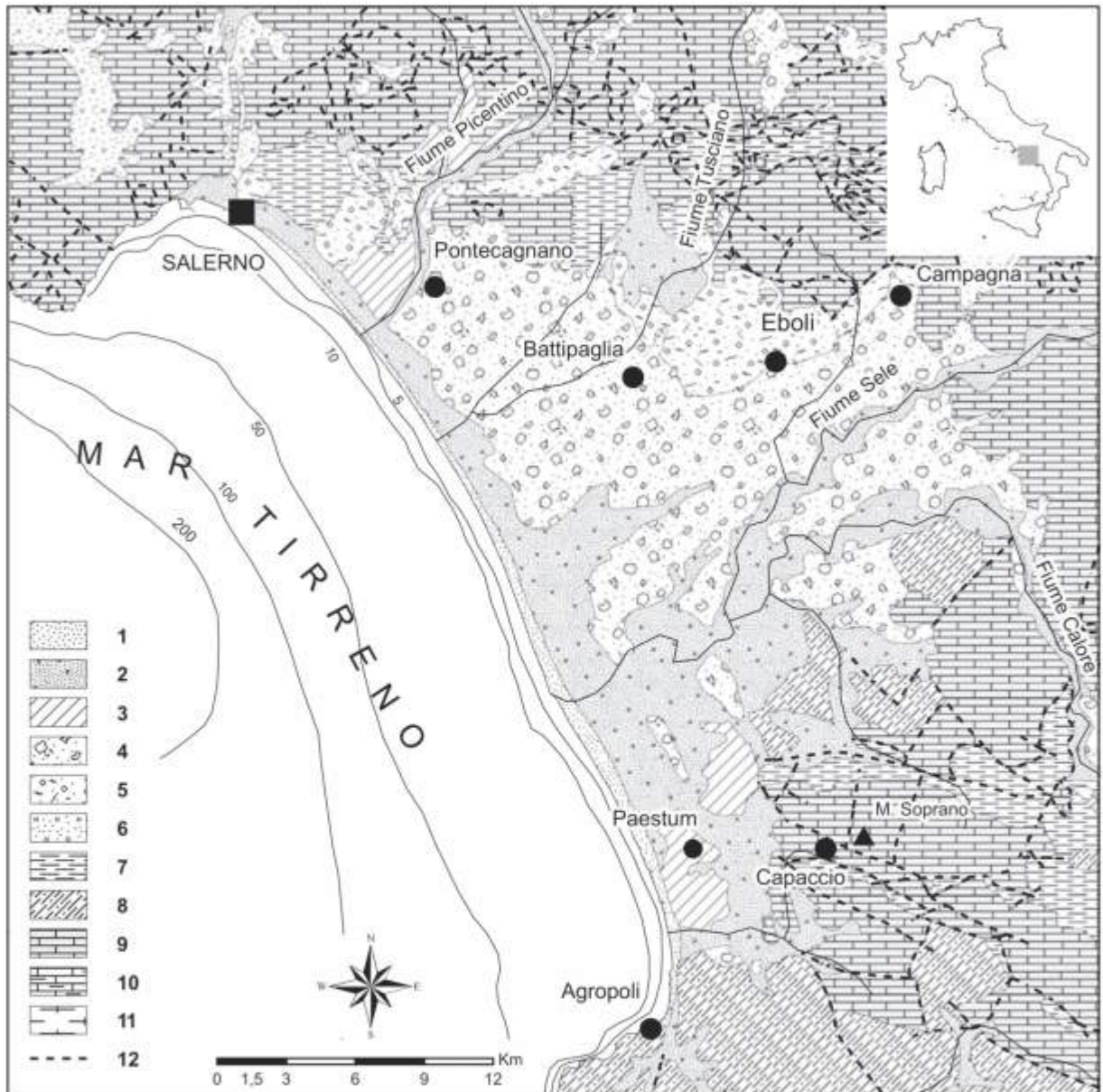


Figura 1 - Schema geologico semplificato della Piana del Fiume Sele (Golfo di Salerno): 1) spiagge e dune costiere; 2) alluvioni, sedimenti lacustri e lagunari; 3) travertini; 4) antichi depositi marini e alluvionali terrazzati, dune, spiagge; 5) conglomerati alluvionali dislocati; 6) depositi piroclastici e vulcano-sedimentari; 7) successioni terrigene mioceniche preorogene e sinorogene; 8) gruppo del cilento; 9) unità carbonatiche; 10) unità lagonegresi; 11) unità nord-calabrese; 12) faglie.

Il sistema di foce, nonostante gli intensi fenomeni d'erosione registrati negli ultimi 50 anni, conserva ancora ai margini alcuni elementi morfologici caratteristici di un delta tra i quali riconosciamo il lieve protendimento della linea di riva verso il largo, in corrispondenza delle ali un tempo quasi simmetriche ed attualmente erose e la debole flessione verso il largo degli assi di culminazione dei cordoni dunari, sia l'attuale

che il tardo-olocenico, più accentuata in prossimità di entrambe le sponde in destra e sinistra idrografica. In ogni caso, la morfografia del sistema di foce appare del tipo intermedio tra un delta ed un estuario, con una tendenza evolutiva verso quest'ultima forma.

In quest'area sono stati identificati depositi di spiaggia sormontati da cinque cordoni dunari subparalleli alla linea di riva attuale e di differenti età, decrescenti in direzione E-W ovvero dai più antichi (130 ka BP), posti nelle aree interne della piana, verso i più recenti (-2 ka BP), ubicati invece a breve distanza dalla battigia (Budillon et al., 1994).

Le quote medie delle culminazioni degli assi dei paleocordoni dunari sono comprese tra +25 e +1 m e diminuiscono dai più antichi ai più recenti. In particolare, sulla base di datazioni, tali depositi eolici sono stati attribuiti ad alti stazionamenti del livello marino d'età tirreniana ed olocenica (Brancaccio et al., 1986; Russo, 1990; Amato et al., 1991; Russo e Belluomini, 1992; Barra et al., 1998).

I cordoni dunari olocenici rivestono anche un rilevante significato geoarcheologico ed insieme a quelli d'età pleistocenica superiore rappresentano importanti elementi morfosedimentari utili per la ricostruzione paleoambientale della piana, nonché dell'evoluzione della linea di riva tra il Tirreniano e l'epoca greco-romana.

Secondo Budillon et al. (1994), in accordo con i precedenti Autori, l'attuale quota dei cordoni dunari e la presenza di depositi marini trasgressivi nel substrato a mare è indice di movimenti differenziati, con un generalizzato sollevamento tettonico a terra e con fenomeni di subsidenza a mare, di età sin- e post-Tirreniano, che nell'insieme hanno determinato il basculamento del sistema Golfo di Salerno-Piana del Sele con fulcro ubicato sulla zona costiera.

Metodologia

Lo studio dell'evoluzione della linea di costa del tratto litoraneo compreso tra Salerno ed Agropoli, avvenuto negli ultimi 50 anni, è stato condotto utilizzando riprese aeree storiche e metodologie proprie dell'aerofotogrammetria con elaborazione di cartografia numerica e immagini digitali ortorettificate utili alla ricostruzione delle variazioni della linea di costa nonché della geometria di tutte le entità geografiche restituite in forma cartografica convenzionale.

Il buon esito di tale applicazione metodologica passa attraverso l'accettazione di:

- omogeneizzazione della rete di appoggio alle prese aeree;
- validazione ed accettazione degli orientamenti assoluti e relativi;
- scelta degli appoggi topografici e successive validazioni di questi ultimi;
- corretta compensazione finale degli errori;
- accettazione degli errori che da essa conseguono e scelta della scala di restituzione cartografica.

La metodica fotogrammetrica consente di ottenere prodotti cartografici raffinati in cui tutte le entità restituite sono connotate da triplette x, y, z spazialmente e geograficamente orientate che rendono possibile la valutazione di ogni variazione ambientale e morfologica, sia di natura antropica che naturale.

Nello specifico sono state utilizzate prese aerofotografiche relative agli anni 1954-1955, 1984, 1994 e 2001 (Tab. 1).

Tabella 1 - La tabella indica la data dei voli, la scala delle foto utilizzate, il numero dei punti utilizzati per le triangolazioni, gli appoggi e i relativi residui di errore.

Data voli	Scala fotografica	Numero di punti utilizzati	Residui massimi sui punti
1954-1955	1: 36.000/37.000	151	n. 2 punti > 180 cm
1984	1: 28.000	181	< 70 cm
1994	1: 4.000	1066	< 50 cm
2001	1: 14.000	234	< 100 cm

La restituzione cartografica ha interessato una fascia costiera ampia circa 300 m a partire dalla battigia.

Le modalità tecniche per l'elaborazione della cartografia numerica impongono, prioritariamente, l'accertamento e la verifica dei punti di appoggio cartografici.

L'inquadrimento planimetrico ed altimetrico della cartografia è stato derivato dalla rete dei punti dell'IGMI, utilizzati per la formazione delle tavolette 1: 25.000 delle zone, oltre che da punti omogenei e comuni a tutte le diverse prese aerofotografiche di cui è stata, preventivamente, accertata l'idoneità (fabbricati di impianto, elementi inamovibili quotati ecc.); le coordinate di questi ultimi sono state acquisite dalla cartografia regionale realizzata, su prese aeree 1998, alla scala 1: 5.000.

Le uniche difficoltà da segnalare sono state quelle relative alle aerofoto 1954/55, realizzate dall'Istituto Geografico Militare Italiano, poiché alcune di esse si presentano alquanto danneggiate mentre alcune coppie stereometriche, mancanti delle marche per l'orientamento interno, sono state ricostruite successivamente dai tecnici dello stesso Ente. Ciò ha costretto ad utilizzare poco le triangolazioni di interesse strisciate di presa optando, spesso, per l'orientamento assoluto su coppie (modelli), al fine di ridurre gli errori ed affinare il più possibile i singoli modelli e le relative concatenazioni attigue.

A partire dalla rete geodetica esistente è stata determinata, quindi, una rete di punti di raffittimento planimetrici ed altimetrici atti a consentire la determinazione dei punti di appoggio delle aerofotografie. Per ogni coppia di fotogrammi sono stati determinati 6 punti di appoggio oltre ad un punto nella zona centrale utilizzando, come detto in precedenza, i punti trigonometrici dell'I.G.M.I. o punti riconoscibili, collimabili e coerenti per tutte le aerofoto storiche usate.

Tutti i punti osservati e monografati sono stati utilizzati per effettuare triangolazioni aeree complessive, o per modelli, compensate per l'intera estensione ed il metodo utilizzato è stato quello della triangolazione aerea per blocchi; le osservazioni sono state eseguite su stereorestitutore analitico mod. Digicart 40 della Galileo di Firenze, secondo il metodo dei modelli indipendenti.

Il calcolo di compensazione è stata eseguito utilizzando algoritmi di compensazione (Galetto e Inghilleri, 1967).

In Tabella 1 è indicata la data dei voli, la scala della foto, il numero dei punti utilizzati per le triangolazioni, gli appoggi e i relativi residui di errore.

La tabella evidenzia come i voli utilizzati presentino differenti anni di esecuzione, quote di presa e conseguente diversa scala fotografica; ciò renderebbe incongrua un'unica restituzione cartografica se non fosse per la congruità del grado di errore (residui) sui punti collimati.

La scelta della scala di rappresentazione ha tenuto conto dell'errore massimo ammissibile "q" nella posizione planimetrica dei punti ben individuati sulla carta e sul terreno, che è pari, graficamente, a 0.4 mm. Pertanto se con misure di elevata precisione effettuate sul terreno si mettono in evidenza gli errori dN e dE delle coordinate di un punto lette sulla carta, si dovrà sempre verificare che:

$$(dN^2 + dE^2)^{1/2} \leq t$$

dove: $t = 2.0$ m per la scala 1:5000 e l'errore massimo ammissibile "q" della quota di un punto ben localizzato e ben individuabile sul terreno, messo in evidenza con misure di elevata precisione sarà :

$q = 1.20$ m per la scala 1:5000.

La scelta della scala di rappresentazione 1: 5.000 risulta coerente con i criteri di accettazione che vedono gli errori riportati in Tabella 1, ad eccezione di due punti, tutti compatibili ed inferiori alle tolleranze di scala sopracitate.

La cartografia è stata rappresentata nella proiezione di Gauss, il rilevamento ed il relativo reticolato cartesiano è stato riferito al sistema nazionale Gauss-Boaga.

Nella cartografia sono stati riportati tutti i particolari naturali ed artificiali del terreno con una densità che non pregiudica la chiarezza di lettura della sintesi grafica così realizzata, mentre l'altimetria è stata rappresentata da punti quotati isolati e/o da curve di livello con equidistanza di 5.0 m.

La formazione di cartografia numerica con metodo aerofotogrammetrico consente di discretizzare le entità territoriali, spazialmente orientate e riferite, osservate in acquisizione strutturandole in livelli (*layers*), differenziando le entità restituite per codici e colori convenzionali, ciò rende possibile aggiungere la 4^a dimensione, quella storica che completa in modo soddisfacente il quadro conoscitivo complessivo.

La documentazione cartografica prodotta ha fornito indispensabili dati metrici e tridimensionali, non ottenibili con altre metodiche, consentendo analisi sugli aspetti geomorfologici e morfogenetici nonché sull'evoluzione temporale degli stessi.

Le osservazioni sono state estese ad alcuni tratti di aste fluviali e sistemi di foce (Sele e Tusciano) acquisendo dati, aspetti territoriali ed ambientali di dettaglio. È stata così sviluppata un'analisi diacronica (Figg. 2 e 3), delle aree monitorate, che ha permesso di fissare l'esatta posizione della linea di costa riferita agli anni delle aerofoto e di definire con esattezza le tendenze evolutive in termini di arretramento o avanzamento della riva.



Figura 2 - Variazione della linea di riva, e ambienti di transizione collegati, alla foce del Fiume Sele risultante dall'analisi diacronica basata su aerofoto del 2001 e sulla cartografia I.G.M.I. del 1954.



Figura 3 - Variazione della linea di riva, e ambienti di transizione collegati, alla foce del Fiume Tusciano risultante dall'analisi diacronica basata su aerofoto del 2001 e sulla cartografia I.G.M.I. del 1954.

È stato, altresì, realizzato un elaborato cartografico digitale (ortofotocarta), in cui al tratto grafico convenzionale è sostituito l'elemento immagine elementare (*pixel*) ortocorretto, che permette una fruibilità dei tematismi estremamente univoca.

Metodologicamente si è operato creando il modello di dati spaziali georiferito in modo volumetrico e planoaltimetrico realizzando, in modo prototipale, un DEM (*Digital Elevation Model*) con costituzione di matrice TIN (*Triangulated Irregular Network*) e costruzione di un modello solido con utilizzo di *breakline* (strade, aste fluviali, edificato) e *contour* (laghi e mare) al fine di ortogonalizzare le riprese aeree; tale processo riporta il *pixel* di acquisizione in posizione ortogonale corretta rispetto alla posizione geografica.

Sulle stesse immagini di cartografia digitale, così costituite e relative al 2001, è stato successivamente sovrimposto il modello vettoriale dell'anno di ripresa 1954-55 (Figg. 2 e 3) ottenendo così una immediata fruizione di tutte le variazioni tematiche avvenute (linea di costa, uso del suolo agricolo, urbano, aspetto morfo-evolutivo) tutte valutabili in modo plano-altimetrico.

Quest'ultima elaborazione dà modo di effettuare ulteriori analisi e modellistiche solide (carta delle acclività, delle altezze) predittive sull'impatto di opere antropiche realizzate e/o da eseguire.

Le procedure utilizzate si caratterizzano per l'alta precisione e l'elevata versatilità del prodotto finale, archiviabile in *database*, gestibile ed aggiornabile in *editing off line* e costituente la base dati per Sistemi Informativi Geografici (GIS).

Ciò schiude nuovi scenari prefigurando applicazioni ed analisi (monitoraggio *ex ante*) con raccolta di dati metrici e tematici estremamente raffinati. È evidente come l'utilizzo corretto di prese aeree storiche offra possibilità di studi a scala territoriale anche molto vasta con precisioni certamente ineguagliate da altre metodologie ad eccezione di quelle topografiche che difficilmente hanno il vantaggio diacronico storico e di ampiezza territoriale.

Analisi dei dati e discussione

Il litorale della Piana del Sele, in prevalenza sabbioso e a tratti sabbioso-ciottoloso, è stato interessato da variazioni della linea di riva la cui ricostruzione è basata sull'allineamento delle torri costiere a pianta circolare risalenti al XIII e XIV secolo. Dalla loro posizione si evince che la riva era posta a circa 200-250 m più al largo dell'attuale e che essa ha subito negli ultimi secoli consistenti fenomeni di arretramento intervallati da brevi periodi durante cui la costa è avanzata (De Pippo et al., 1989).

In particolare, l'analisi cartografica storica ed aerofotogrammetrica ha messo in evidenza che l'evoluzione recente ed attuale del litorale di Paestum a partire dal 1800 è stata caratterizzata da fenomeni alquanto differenziati nelle diverse zone a N o a S della foce fluviale del Sele. La velocità di avanzamento risulta inferiore rispetto a quella registrata in epoche precedenti e talora in qualche zona si rilevano arretramenti del litorale per fenomeni d'erosione (Cocco e De Pippo, 1988).

Infatti, procedendo verso Sud i fenomeni di avanzamento si riducono gradualmente fino a raggiungere una sostanziale stabilità nelle aree più meridionali. Nelle zone a Nord della foce, invece, si osserva l'alternanza di settori in avanzamento ed arretramento.

In particolare, tra il 1809 ed il 1908 (De Pippo et al., 1989) si registra un lieve arretramento della linea di riva nella zona più settentrionale (Mercatello - foce del Tusciano), seguito da una fase di avanzamento protrattasi fino al 1954, mentre nelle altre zone si osserva una generale progradazione fino a metà degli anni '50 (Cocco e De Magistris, 1988; Cocco e De Pippo, 1988; De Pippo et al., 1989).

I dati relativi agli ultimi 50 anni, invece, indicano una complessiva tendenza all'arretramento della linea di costa nel Golfo di Salerno (Tab. 2), con differenti valori nelle diverse aree e con alcuni tratti in controtendenza. In particolare, al fine di meglio evidenziare le tendenze evolutive nei diversi tratti costieri, l'intero litorale è stato suddiviso in quattro macroaree, di cui la prima si estende dalla città di Salerno fino alla foce fluviale del Picentino, la seconda tra le foci del Picentino e del Tusciano, la terza tra le foci del Tusciano e del Sele e l'ultima da questa località fino ad Agropoli. La Figura 4 mostra l'andamento delle variazioni della linea di riva nei periodi 1954-1984 e 1984-2001 per il litorale in esame suddiviso in 4 differenti settori costieri; in particolare il primo di essi si sviluppa tra la città di Salerno e la foce del Fiume Picentino, il secondo si estende dal Fiume Picentino al Fiume Tusciano, il terzo dal Fiume Tusciano al Fiume Sele e l'ultimo da quest'ultima località fino all'abitato di Agropoli.

Tabella 2 - Entità delle variazioni della linea di riva registrate lungo il litorale del Sele negli ultimi 50 anni (1954-1984, 1984-2001 e 1954-2001), relative ai quattro settori costieri in cui è stato suddiviso il litorale in esame.

	st.	variazione linea di riva (m)		
		1954-84	1984-01	tot
a) Salerno - foce Picentino	1	32	-14	18
	2	22	-9	13
	3	7	-15	-8
	4	8	-6	2
	5	7	-9	-2
	6	1	-8	-7
	7	2	-6	-4
	8	4	-7	-3
	9	5	-5	0
	10	6	-5	1
	11	0	-4	-4
	12	-10	-7	-17
	13	-15	-8	-23
	14	-2	-19	-21
	15	-15	-4	-19
	16	-20	0	-20
	17	-31	-4	-35
	18	-40	-3	-43
	19	-22	-7	-29
	20	-26	-1	-27
	21	-34	-4	-38
	22	-45	-2	-47
	23	-40	0	-40
b) foce Picentino - foce Tusciano	1	-39	-7	-46
	2	-35	-8	-43
	3	-37	-2	-39
	4	-35	-5	-40
	5	-37	-4	-41
	6	-42	-1	-41
	7	-32	-5	-37
	8	-43	-7	-50
	9	-41	16	-57
	10	-44	-10	-54
	11	-57	-6	-63
	12	-40	-8	-48
	13	-45	-3	-48
	14	-56	-3	-59
	15	-58	5	-53
	16	-70	6	-64
	17	-61	10	-51
	18	-52	8	-44
c) foce Tusciano - foce Sele	1	-30	10	-20
	2	-21	12	-9
	3	2	6	8
	4	-10	9	-1
	5	0	-3	-3
	6	4	-8	-4
	7	-9	7	-2
	8	12	-14	-2
	9	-12	12	0
	10	12	-10	2
	11	7	-2	5
	12	-9	15	6
	13	-19	11	-8
	14	-4	28	24
	15	-2	6	4
	16	-3	22	19
	17	21	-9	12
	18	10	11	21
	19	-2	-26	-28
	20	-3	-32	-35
	21	-20	-20	-40
	22	-26	-18	-44
	23	-25	-37	-62
	24	-50	-22	-72
	25	-61	-23	-84
	26	-73	-24	-97
	27	-101	-21	-122
	28	-192	-23	-215

	st.	variazione linea di riva (m)		
		1954-84	1984-01	tot
c) foce Tusciano - foce Sele	1	-30	10	-20
	2	-21	12	-9
	3	2	6	8
	4	-10	9	-1
	5	0	-3	-3
	6	4	-8	-4
	7	-9	7	-2
	8	12	-14	-2
	9	-12	12	0
	10	12	-10	2
	11	7	-2	5
	12	-9	15	6
	13	-19	11	-8
	14	-4	28	24
	15	-2	6	4
	16	-3	22	19
	17	21	-9	12
	18	10	11	21
	19	-2	-26	-28
	20	-3	-32	-35
	21	-20	-20	-40
	22	-26	-18	-44
	23	-25	-37	-62
	24	-50	-22	-72
	25	-61	-23	-84
	26	-73	-24	-97
	27	-101	-21	-122
	28	-192	-23	-215

	st.	variazione linea di riva (m)		
		1954-84	1984-01	tot
c) foce Tusciano - foce Sele	1	-30	10	-20
	2	-21	12	-9
	3	2	6	8
	4	-10	9	-1
	5	0	-3	-3
	6	4	-8	-4
	7	-9	7	-2
	8	12	-14	-2
	9	-12	12	0
	10	12	-10	2
	11	7	-2	5
	12	-9	15	6
	13	-19	11	-8
	14	-4	28	24
	15	-2	6	4
	16	-3	22	19
	17	21	-9	12
	18	10	11	21
	19	-2	-26	-28
	20	-3	-32	-35
	21	-20	-20	-40
	22	-26	-18	-44
	23	-25	-37	-62
	24	-50	-22	-72
	25	-61	-23	-84
	26	-73	-24	-97
	27	-101	-21	-122
	28	-192	-23	-215

		→	←	↔
		Avanzamento	Arretramento	Equilibrio

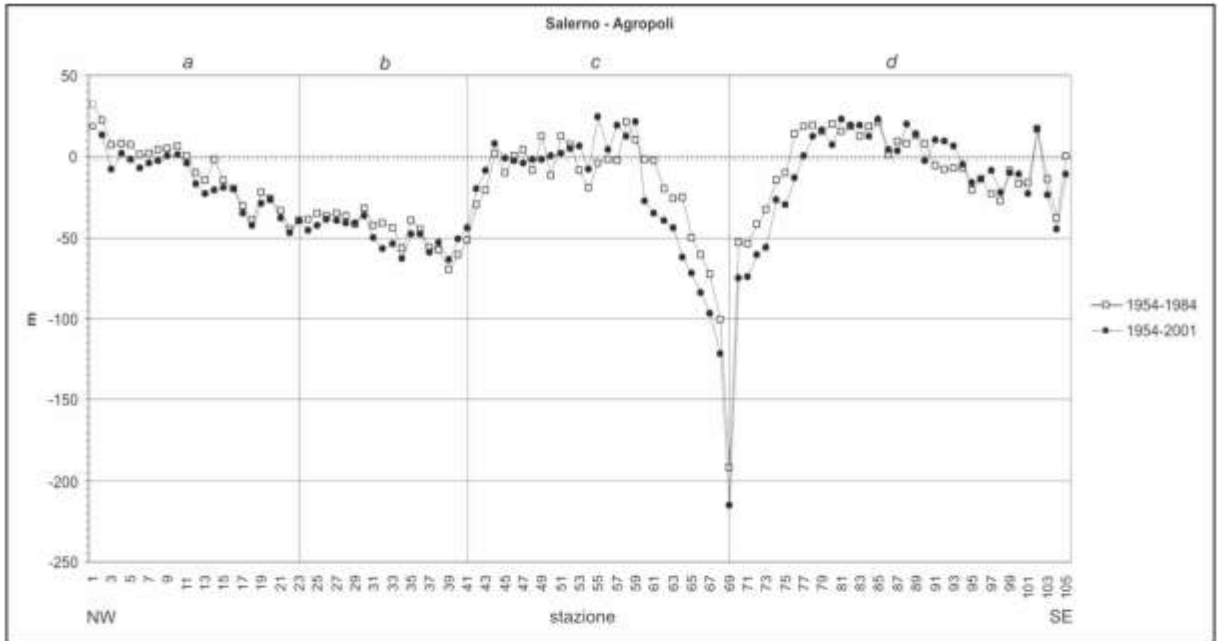
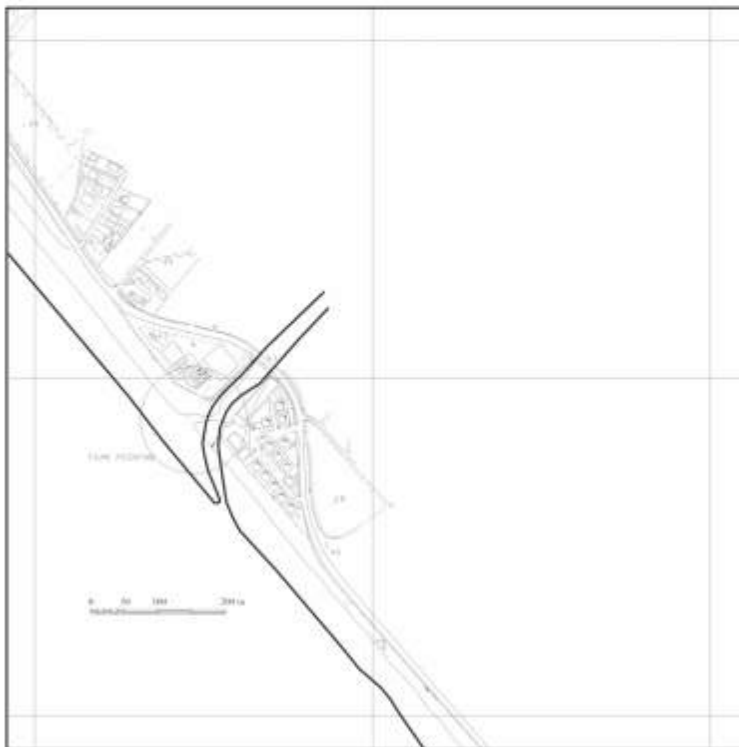


Figura 4 - Diagramma della variazione della linea di riva nei periodi 1954-1984 e 1984-2001 nelle 4 macroaree analizzate: a) Salerno - foce F. Picentino; b) foce F. Picentino - foce E. Tusciano; c) foce E. Tusciano - foce E. Sele; d) foce E. Sele - Agropoli.



a) Salerno - Foce Picentino

In questo tratto (Fig. 5) si osserva un generale arretramento che mostra i suoi massimi valori in prossimità dello Stadio Arechi (- 43 m) e della foce del F. Picentino (- 47 m). In particolare, nella parte più meridionale del settore litoraneo si registra un arretramento più marcato durante il trentennio 1954-1984, mentre nell'ultimo decennio 1984-2001 la tendenza all'arretramento è generale ma meno accentuata, con punte massime nei pressi della città di Salerno (-13 m a Foce Irno e -11 m sul litorale di Via Leucosia).

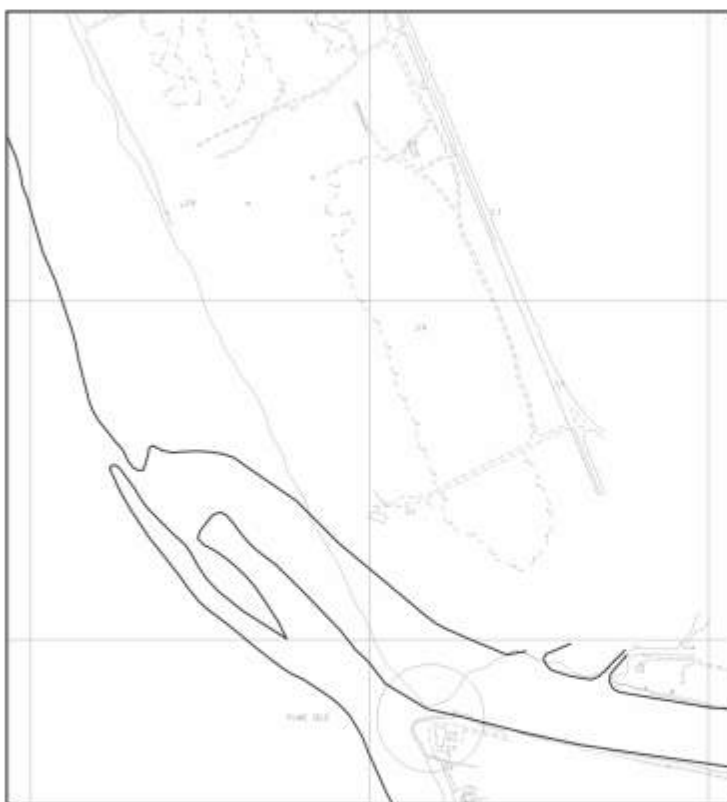
Figura 5 - Stralcio cartografico della foce del Fiume Picentino. La linea a tratto grosso si riferisce al 1954, quella fine al 2001.

I fenomeni d'erosione riscontrati lungo questa fascia di litorale, oltre che alla progressiva diminuzione nell'apporto di sedimenti fluviali alla costa da parte dei principali corsi d'acqua (T. Mariconda e F. Picentino), sono connessi soprattutto all'intensa urbanizzazione, spinta fino alla linea di riva.

Questa ha comportato nel tempo la progressiva scomparsa del cordone dunare recente, la consistente riduzione della profondità dell'antistante spiaggia ed il relativo aumento della pendenza media. Inoltre, la presenza della struttura portuale commerciale e turistica di Salerno e di numerose barriere artificiali emerse parallele alla riva, sia radenti sia distaccate, ha interferito con la dinamica litoranea, amplificando localmente i fenomeni erosivi delle spiagge. A testimonianza di ciò la particolare morfologia della costa che ha mostrato chiari segni di erosione, a sud delle opere di difesa, appena dopo la costruzione di esse.

b) Foce Picentino - foce Tusciano

La tendenza all'arretramento in questo tratto costiero (Fig. 6) è ancora più evidente e generalizzata, con oscillazioni comprese tra -37 m e -64 m, e anche in questo caso gli arretramenti maggiori si registrano nel primo trentennio, con una punta pari a -70 m in corrispondenza della zona ove sfociava il F. Tusciano nel 1954; attualmente la stessa foce risulta spostata verso SE di circa 1 km. Si sottolinea la completa antropizzazione dell'area di foce del F. Tusciano,

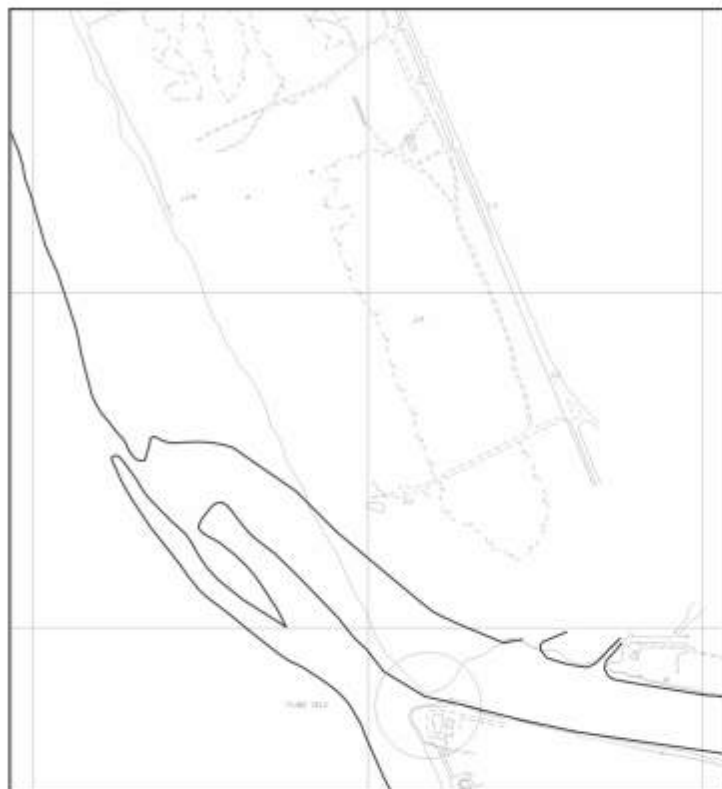


con spostamento indotto dell'alveo e la completa scomparsa della naturale cassa di espansione del fiume (alveo di magra) per diverse centinaia di metri verso l'entroterra. Inoltre, si registra una divagazione della foce del T. Asa da SE a NW tra il 1954 ed il 1984 di circa 300 m, e successivamente da NW a SE tra il 1984 ed il 2001, di circa 250 m. In questo tratto di litorale sono assenti opere di difesa.

Figura 6 - Stralcio cartografico della foce del Fiume Tusciano. La linea a tratto grosso si riferisce al 1954, quella fine al 2001. Per la scala vedi Figura 5.

c) Foce Tusciano - Foce Sele

In questo settore (Fig. 7) l'evoluzione della linea di riva risulta più articolata, sia nel tempo sia nello spazio. Pur evidenziandosi una complessiva tendenza all'arretramento, tuttavia si registra un'alternanza di arretramenti ed avanzamenti nel primo tratto (F. Tusciano - Campolongo) ed una decisa tendenza all'arretramento in quello successivo, con un massimo di -215 m in corrispondenza della foce del F. Sele. In quest'ultimo tratto il maggiore arretramento si registra anche in tal caso nel primo trentennio (-192 m in corrispondenza della foce del fiume Sele), mentre nell'ultimo trentennio gli arretramenti, seppur generalizzati, non sono mai risultati superiori a -40 m. Nell'ultimo decennio, inoltre, si evidenzia una decisa tendenza alla progradazione della linea di riva in un tratto esteso per circa 3 km, tra Lido Lago e località Campolongo, con punte di +24 m laddove in precedenza si osservava un'alternanza di fasi di arretramento ed avanzamento. Inoltre, si registra una progressiva divagazione della Foce Idrovora da NW verso SE tra il 1954 ed il 2001, dell'ordine di circa 250 m. Nell'intero tratto di litorale il grado di antropizzazione risulta molto più basso dei precedenti e spesso consiste nella sola presenza di strutture turistico-ricreative, stabilimenti balneari e



strade di accesso agli stessi. Inoltre, è presente il cordone dunare recente, in genere esteso e ben conservato, anche se a luoghi mostra fenomeni d'erosione connessi proprio alla presenza delle strutture dei lidi e di scalzamento al piede a seguito di intense mareggiate, laddove la spiaggia risulta meno profonda. Infine, sono assenti opere di difesa costiera.

d) Foce Sele - Agropoli

In questo tratto più meridionale del litorale si registra un generale arretramento soprattutto nei primi 3 km, con valori fino ad oltre 70 m in prossimità del sistema di foce del Sele. Tale arretramento tende gradualmente a diminuire, fino ad annullarsi, procedendo verso SE.

Figura 7 - Stralcio cartografico della foce del Fiume Sele. La linea a tratto grosso si riferisce al 1954, quella fine al 2001. Per la scala vedi Figura 5.

Nel successivo tratto costiero, fino alla foce del F. Capodifiume, si osserva invece una complessiva tendenza all'avanzamento della riva, soprattutto durante il primo trentennio, con valori massimi di +23 m tra Laura e Torre di Paestum. Al contrario, nel tratto successivo, tra la foce del F. Capodifiume ed Agropoli, si registra di nuovo una complessiva tendenza all'erosione, anch'essa manifestatasi specialmente nel primo trentennio, con un massimo di -23 m presso la foce del F. Solofrone. In ambedue i tratti, tuttavia, nell'ultimo decennio non si evidenzia una netta tendenza evolutiva, registrandosi limitati arretramenti o avanzamenti della linea di riva nelle singole stazioni di misura. Inoltre, anche la foce fluviale del Sele è stata interessata da una graduale migrazione da NW verso SE tra il 1954 ed il 2001, pari complessivamente a circa 800 m, a differenza della Foce Fiumarello che tra il 1954 ed il 1984 si è spostata da SE verso NW e successivamente, tra il 1984 ed il 2001, da NW verso SE. L'ampio cordone dunare recente appare in discreto stato di conservazione, scarsamente urbanizzato e colonizzato da un'estesa pineta. Infine, questo tratto di litorale non presenta opere di difesa costiera, ad eccezione di un breve segmento di foce in destra idrografica del F. Sele.

Conclusioni

Alla luce di quanto si evince dall'analisi cartografica della fascia costiera del Sele relativa agli ultimi 50 anni, il litorale in studio mostra una generale e localmente diffusa tendenza all'arretramento, talora con fenomeni d'erosione estesi fino al piede della duna recente.

I focus erosivi rilevati sono connessi per lo più allo scarso apporto solido fluviale dovuto sia al prelievo d'inerti lungo gli alvei, sia alle sistemazioni idraulico-forestali dei bacini e agli sbarramenti artificiali, nonché all'asporto diretto di sedimenti dalle aree dunari e di spiaggia ed a luoghi all'intensa antropizzazione della fascia costiera (De Pippo et al., 1989).

L'analisi cartografica della linea di riva ha inoltre messo in evidenza che in gran parte dei quattro settori esaminati la velocità media di arretramento del litorale risulta pari a 1.07 m/anno nel trentennio 1954-1984 e 0.62 m/anno nell'arco dei 17 anni del più breve intervallo 1984-2001; pertanto, la velocità media di recessione della riva nell'intero periodo di 47 anni risulta pari a 0.91 m/anno. Invece, la velocità media di avan-

zamento del litorale, limitata comunque a settori estesi meno di 1 km, risulta di 0.39 m/anno nel periodo 1954-1984 e di 0.55 m/anno nel periodo 1984-2001; pertanto, la velocità di progradazione della riva nell'intero intervallo di 47 anni risulta in totale pari a 0.44 m/anno.

In sintesi, pur considerando le locali situazioni di avanzamento della riva, il bilancio nel complesso risulta ugualmente in deficit, con valori della velocità di arretramento compresi tra 0.06 e 0.68 m/anno rispettivamente nei periodi 1954-1984 e 1984-2001, ovvero pari a 0.28 m/anno tra il 1954 ed il 2001. Questo dato è il risultato della mutua interazione tra vari processi in atto soprattutto negli ultimi 50 anni a scala locale, regionale e globale. Tra essi, in ordine di importanza riconosciamo la scarsa e spesso assente compensazione delle perdite per apporto di nuovi sedimenti fluviali, verosimilmente dovuta alla diminuzione delle piogge nelle ultime decadi, alla presenza di sbarramenti artificiali lungo i corsi fluviali (es. Traversa di Persano) ed alla coltivazione di cave in alveo. Segue poi l'irrigidimento artificiale della linea di riva a seguito della costruzione di numerose barriere artificiali emerse, sia distaccate sia aderenti, che interferiscono sulla naturale deriva litoranea dei sedimenti e la spinta antropizzazione costiera per la presenza di strutture ed infrastrutture, sia sul cordone dunare recente sia sulla spiaggia, e la conseguente accelerazione della subsidenza indotta a causa dell'aumento dei carichi delle strutture antropiche su terreni in cui sono presenti livelli organici e pertanto compressibili. Si ha infine l'amplificazione locale dell'innalzamento del livello marino globale, sia per cause tettono-eustatiche sia per le variazioni del clima meteomarinario (diminuzione delle calme di vento, aumento delle eventi estremi) connesse verosimilmente all'alternanza di brevi crisi climatiche caldo-aride e freddo-umide della durata di 20-50 anni (Brückner, 1890; Tomasino e Dalla Valle, 2000; Luongo e Mazzarella, 2004), probabilmente anche al riscaldamento globale ($-+0.6^{\circ}\text{C}$; IPCC, 2001) nonché all'isola di calore urbana di Salerno ($-+1.8^{\circ}\text{C}$; Palumbo e Mazzarella, 1981).

Inoltre, la deriva litoranea dei sedimenti, con verso prevalente da NW a SE (De Pippo et al., 1989), ha determinato nel corso dell'ultimo cinquantennio una maggiore erosione nei settori settentrionali prossimi all'abitato di Salerno, che sono tra l'altro quelli più antropizzati, ed una generale progradazione in quelli meridionali, contigui al promontorio di Agropoli. L'effetto risultante, già noto in altre fasce costiere campane (Garigliano-Volturno, Sarno), e verosimilmente in gran parte di quelle tirreniche sottese a piane alluvionali, anche sulla base dell'orientamento degli assi di culminazione dei cordoni dunari pleisto-olocenici (De Pippo et al., 2007(a) e (b)), è una graduale rotazione in senso orario della linea di riva, con fulcro ubicato nei pressi della foce fluviale del Sele.

Nell'insieme tali fenomeni sono dovuti e nello stesso tempo contribuiscono nel breve periodo alla perdita di consistenti volumi di sedimenti sabbiosi del litorale, causando lo smantellamento della duna recente che assume un aspetto mammellonare, nonché il generale degrado dell'ambiente costiero oltre che ingenti danni in termini di mancati introiti economici per il settore turistico-ricreativo. Infine, i dati ad oggi disponibili e la relativa cartografia elaborata in ambiente GIS impongono di avviare a breve una verifica ed un'attività di monitoraggio continuo della linea di costa, particolarmente importante per valutare e verificare se l'evoluzione morfologica del litorale, sia a scala di unità che di sub-unità fisiografica costiera, procede secondo le tendenze riconosciute fino al 2001.

Bibliografia

- Amato A., Ascione A., Cinque A. e Lama A. (1991) - *Morfoevoluzione, sedimentazione e tettonica recente dell'Alta Piana del Sele e delle sue valli tributarie (Campania)*. Geogr. Fis. Dinam. Quat., 14: 5-16.
- Barra D., Calderoni G., Cinque A., De Vita P., Roskopf C. e Russo Ermolli E. (1998) - *New data on the evolution of the Sele River coastal plain (southern Italy) during the Holocene*. Il Quaternario. 11: 287-299.
- Bartole R., Savelli D., Tramontana M. e Wezel E.C. (1984) - *Structural and sedimentary features in the Tyrrhenian margin off Campania, southern Italy*. Mar. Geol., 55: 163-180.
- Branaccio L., Cinque A., Belluomini G., Branca M. e Delitala L. (1986) - *Isoleucine epimerization dating and tectonic significance of upper Pleistocene sea-level features of the Sele Plain (Southern Italy)*. Zeit. Geomorph. N. F., Suppl. Bd., 62: 159-166.
- Brückner E. (1890) - *Klimaschwankungen seit 1700 nebenst Bemerkungen über die Klimaschwankungen der Diluvialzeit (Climatic fluctuations since 1700 in comparison to the Diluvial era, in German)*. Geographische Abhandlungen, Vienna, Austria, IV(2): 153-184.

- Budillon F., Pescatore T. e Senatore M.R. (1994) - *Cicli deposizionali del Pleistocene superiore-Olocene sulla piattaforma continentale del Golfo di Salerno (Tirreno Meridionale)*. Boll. Soc. Geol. It., 113: 303-316.
- Capaldi G., Cinque A., Romano P. (1988) - *Ricostruzione di sequenze morfoevolutive nei Picentini Meridionali (Campania, Appennino meridionale)*. Suppl. Geogr. Fis. Dinam. Quat., 1: 207-222.
- Cestari G. (1971) - *Note illustrative della Carta Geologica d'Italia alla scala di 1:100.000. Foglio 198 Eboli*. Serv. Geol. D'Italia, Roma.
- Cinque A., Ascione A. e Caiazzo C. (2000) - *Distribuzione spazio-temporale e caratterizzazione della fagliazione quaternaria in Appennino meridionale*. In: Galadini F., Meletti C. e Vittori E. (eds.), *Stato delle conoscenze sulle faglie attive in Italia: elementi geologici di superficie. Risultati del progetto 5.1.2 "Inventario delle faglie attive e dei terremoti ad esse associabili". Le ricerche del GNDT nel campo della pericolosità sismica 1996-1999*, CNR-GNDT, Roma, pp. 203-218.
- Cinque A., Brancaccio L., Sgrosso I., Iaccarino G. e Russo F. (1986) - *Guida alle escursioni geomorfologiche (Penisola Sorrentina, Capri, Piana del Sele, Monti Picentini)*. Gruppo Nazionale di Geografia Fisica e Geomorfologia, Riunione annuale, Amalfi (SA), 9-12 giugno 1986, Dipartimento di Scienze della Terra, Università degli Studi di Napoli Federico II, Pubbl. n. 33: 60 pp.
- Cinque A., Guida F., Russo F. e Santangelo N. (1988) - *Dati cronologici e stratigrafici su alcuni depositi continentali della Piana del Sele (Campania): i "Conglomerati di Eboli"*. Geogr. Fis. Dinam. Quatern., 11: 39-44.
- Cocco E. e De Magistris M.A. (1988) - *Evoluzione storica e recente del litorale di Paestum (Golfo di Salerno)*. Atti 74° Congr. Soc. Geol. It., Sorrento, vol. A: 165-171.
- Cocco E. e De Pippo T. (1988) - *Tendenze evolutive delle spiagge della Campania e della Lucania*. Mem. Soc. Geol. It., 41: 195-204.
- De Pippo T., Cocco E., De Magistris M.A., Efaicchio M.T., Giulivo I., Tarallo F. e Valente A. (1989) - *Evoluzione e dinamica litoranea delle spiagge della Piana del Sele (Campania, Italia)*. *Pact.*, 25, 15: 271-277.
- De Pippo T., Donadio C., Pennetta M. e Petrosino C., (2007a)- *Land Units of Sarno River basin, southern Italy*. *Geogr. Fis. Dinam. Quat.*, 10 pp. (in corso di pubblicazione).
- De Pippo T., Donadio C., Pennetta M., Terlizzi F. e Valente A. (2007b) - *Genesis and morphological evolution of Fusaro lagoon (Campania, southern Italy) in the Holocene*. *Boll. Soc. Geol. It.*, 126: 89-100.
- Galletto R. e Inghilleri G. (1967) - *Further developments of the method of aerotriangulation by independent models*. *Photogrammetria*.
- IPCC (2001) - *Third Assessment Report (TAR) - Climate Change 2001*. Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press.
- Luongo G. e Mazzarella A. (2004) - *La tropicalizzazione della pioggia nel bacino del Mediterraneo*. Accademia dei Lincei, Giornata mondiale dell'acqua - La siccità in Italia (Roma 21 marzo 2003), Atti dei Convegni Lincei, 204: 119-124.
- Ortolani F., Torre M., Russo B. e Di Nocera S. (1979) - *Depositi altomiocenici del bordo settentrionale della Piana del Sele (Campania)*. *Boll. Soc. Geol. It.*, 98: 3-14.
- Palumbo A. e Mazzarella A. (1981) - *The heat-island over Naples*. *Weather*, 36: 28-29.
- Russo F. (1990) - *I sedimenti quaternari della Piana del Sele. Studio geologico e geomorfologico (con allegata una Carta Geologica a scala 1:50.000)*. Tesi di Dottorato di Ricerca, Pubbl. Dipartimento di Scienze della Terra, Università degli Studi di Napoli Federico II: 168 pp.
- Russo F. e Belluomini G. (1992) - *Affioramenti di depositi marini tirreniani sulla piana in destra del Fiume Sele (Campania)*. *Boll. Soc. Geol. It.*, 111: 25-31.
- Tomasino M. e Dalla Valle F. (2000) - *Natural climatic changes and solar cycles: an analysis of hydrological time series*. *Hydrological Sciences Journal*, 45: 477-489.
- Zuppetta A. e Sava A. (1992) - *Pleistocene brittle deformation in the Eboli Conglomerates (Sele Plain - Campanian Apennines)*. *Boll. Soc. Geol. It.*, 111: 273-281

Ricevuto il 15/10/2007, accettato il 28/01/2008.

Stima dell'affidabilità di opere marittime: un caso esemplificativo

Piero Ruol ¹, Luca Martinelli ² e Alberto Lamberti ²

¹ Dipartimento di Ingegneria Idraulica, Marittima, Ambientale, Geotecnica (IMAGE)
Università di Padova, Via Ognissanti 39 - 35129 Padova, Tel.: +39 049 8277905, Fax: +39 049 8277988
E-mail: piero.ruol@unipd.it

² Dipartimento di Ingegneria delle Strutture, dei Trasporti, delle Acque, del Rilevamento, del Territorio (DISTART)
Università di Bologna, Viale Risorgimento 2 - 40136 Bologna, Tel.: +39 051 2093745, Fax: +39 051 6448346
Email: luca.martinelli@mail.ing.unibo.it, alberto.lamberti@unibo.it

Sommario

Scopo della presente nota è quella di promuovere l'utilizzo delle tecniche di analisi di affidabilità in campo marittimo. Sono presentati brevemente i principali metodi di analisi, evidenziandone le caratteristiche e approfondendo in particolare il metodo di Livello II al primo ordine di approssimazione.

A titolo esemplificativo è stata valutata la stabilità del molo a parete verticale di Genova Voltri, concentrando l'attenzione su due soli meccanismi, lo scorrimento e l'eccesso di tracimazione. Per il secondo meccanismo, particolarmente semplice, è presentata la sequenza delle operazioni passo-passo. Infine è stata calcolata con metodo di livello III la sicurezza al transito pedonale sulla sovrastruttura del molo.

Parole chiave: affidabilità, molo a parete verticale, rischio, scorrimento, tracimazione, vulnerabilità.

Abstract

This paper aims at disseminating reliability analysis methods in the field of maritime engineering. The main methods are briefly presented with the description of their characteristics, and then the Level II method, at first order of approximation (FORM), is covered in greater detail.

The method is applied in order to assess the reliability of a vertical breakwater, Genoa Voltri main dike: for brevity only two mechanisms were considered, sliding and excess of overtopping. For the second mechanism, particularly simple, the detail of the procedure is presented step by step. Finally, the degree of security of the pedestrian traffic over the breakwater superstructure is established using a level III approach.

Keywords: reliability, risk, overtopping, sliding, vertical breakwater, vulnerability.

Introduzione

Nel campo delle opere marittime, non è infrequente ritenersi soddisfatti di opere con probabilità di collasso molto elevate, dell'ordine del 10% nell'arco di vita tecnica. Ciò perché spesso il collasso non provoca danni ingenti in confronto al costo da sostenere per rendere l'opera più sicura. Il dover convivere con la possibilità di avere un danno fornisce la motivazione per affrontare i calcoli con un approccio probabilistico.

L'accertamento della stabilità e dell'efficacia di un'opera viene tradizionalmente affidato all'uso di opportuni coefficienti moltiplicativi di natura sperimentale, che non esprimono esplicitamente il grado di affidabilità della verifica.

Nella pratica progettuale “tradizionale” in campo marittimo, il carico (ad esempio l'altezza d'onda) è definito su base probabilistica. La probabilità di superamento P_s dell'evento al tempo di vita utile dell'opera T_v , ed al tempo di ritorno dell'evento T_r sono legati tramite la relazione (Borgman et al., 2008; Consiglio Superiore LL.PP. e CNR, 1996):

$$P_s = 1 - \left(1 - \frac{1}{T_r}\right)^{T_v} \quad (1)$$

Se si rappresenta graficamente tale relazione per un assegnato T_v si ottiene il diagramma in Figura 1 (il grafico è stato ricavato per $T_v=50$ anni). Dall'esame di tale figura si può notare che pur assumendo un T_r molto elevato (ad esempio 1000 anni), si ottengono probabilità di superamento dell'evento di progetto ancora apprezzabili (del 5%) nell'arco di vita dell'opera. In alcuni ambiti dell'ingegneria (per esempio edilizio) è possibile riferirsi anche a situazioni estreme ma in ambito marittimo ciò è economicamente impensabile.

Gli schemi di calcolo che si assumono per la verifica o il dimensionamento dell'opera si appoggiano anche a coefficienti di sicurezza, generalmente desunti dall'esperienza maturata in campo, che rendono conto dell'incertezza della resistenza dell'opera.

Questo metodo, tuttavia, non considera l'effetto dello schema di calcolo assunto, né delle incertezze delle varie variabili che, combinandosi, formano il carico e la resistenza.

L'approccio probabilistico, invece, consente di esplicitare le diverse prestazioni richieste ad un'opera e, tramite un approccio metodologico uniforme, di valutare il grado di certezza che caratterizza il raggiungimento di tali prestazioni. L'approccio probabilistico si sta diffondendo a tutti i campi dell'ingegneria e, in Italia, ha fatto il suo ingresso nel settore marittimo nell'ultimo ventennio (Franco et al., 1986; Tomasicchio, 1998).

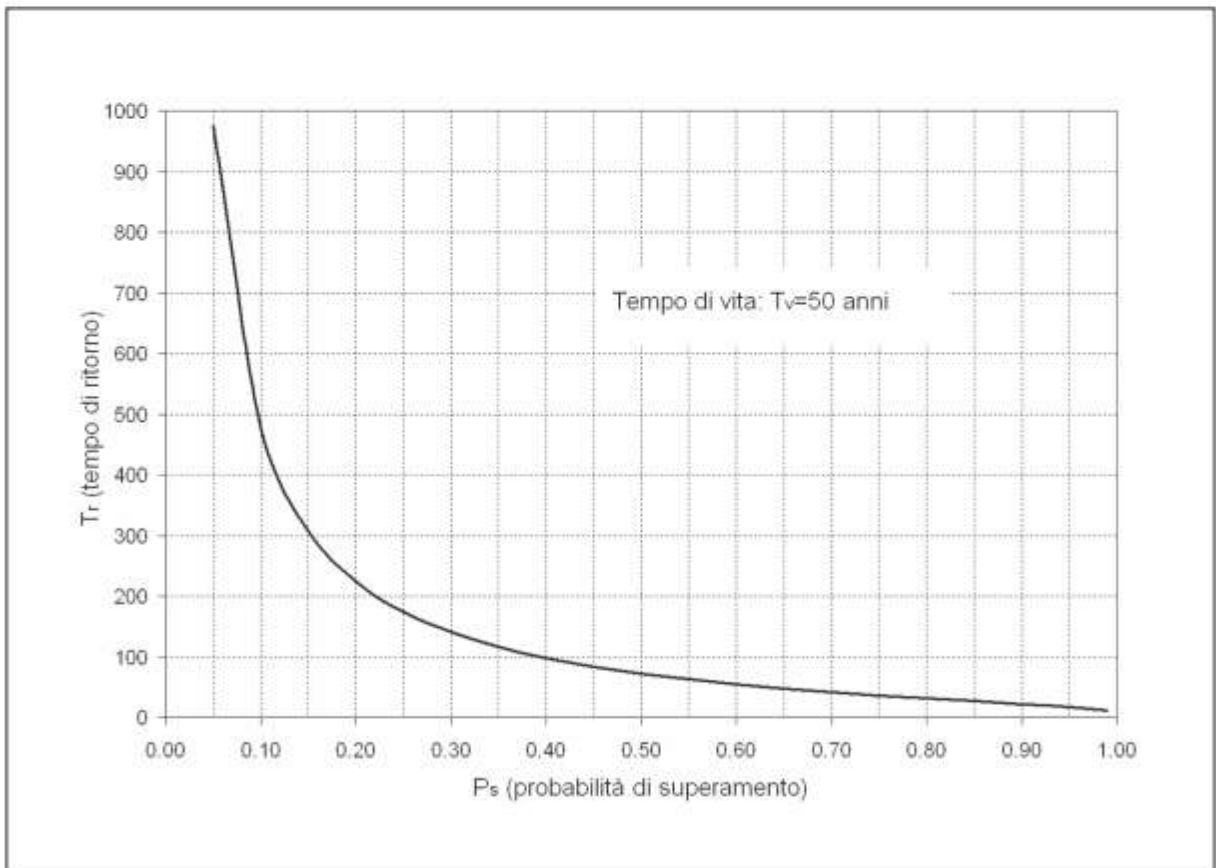


Figura 1 - Relazione tra T_r e P_s per un tempo di vita $T_v=50$ anni.

L'analisi di affidabilità (RA, Reliability Analysis) è lo strumento che consente la stima congiunta delle probabilità di non soddisfacimento di ciascuno dei requisiti funzionali richiesti. La RA non stima il rischio, ovvero non evidenzia le conseguenze del non soddisfacimento.

Questa nota si pone l'obiettivo di fornire gli elementi di base necessari per stimare l'affidabilità di un'opera marittima senza scendere nel merito del problema della gestione del rischio complessivo.

Essa è una revisione del contributo ad invito (Ruol e Martinelli, 2007) presentato a Civitavecchia, alle Giornate Italiane di Ingegneria Costiere del 2005.

Lo scopo della memoria è di incoraggiare l'utilizzo di metodi probabilistici, che risultano particolarmente utili al fine di ottimizzare la progettazione preliminare, nonché di promuovere le analisi di affidabilità di opere nuove ed esistenti.

L'applicazione delle tecniche di RA richiede le seguenti operazioni:

- la precisazione degli obiettivi prestazionali che debbono essere raggiunti unitamente al diverso margine di incertezza tollerata. Questa fase è molto delicata in quanto necessita di informazioni territoriali, riguardanti tanto i caratteri geologico-ambientali quanto quelli socio-economici dell'area in esame, e pertanto deve essere regolata da istruzioni tecniche o normative;
- una descrizione in termini adeguati del/dei meccanismo/i di collasso, ovvero una riformulazione dei procedimenti di verifica disponibili in modo che siano compatibili con i metodi dell'analisi probabilistica;
- l'applicazione dei metodi statistici per la valutazione dei parametri caratteristici di carico e resistenza (la caratterizzazione statistica delle variabili in gioco costituisce a tutt'oggi un approccio non ancora completamente entrato nella usuale pratica progettuale, che spesso si limita ad approfondire esclusivamente l'incertezza dei carichi).

Gli strumenti probabilistici evidenziano l'utilità di avere a disposizione monitoraggi accurati e la necessità di valutare le incertezze delle variabili e dei modelli (=formule). Il risultato delle analisi di affidabilità è infatti messo in relazione all'accuratezza di ogni aspetto del calcolo.

Gli strumenti probabilistici consentono, nel caso si debba valutare il miglior progetto fra diverse alternative, di indicare anche il modello di calcolo più opportuno per l'analisi, ovvero il più semplice che abbia la effettiva possibilità di discernere gli effetti delle alternative (Vreugdenhil, 2006).

Esistono numerosi software commerciali che eseguono le analisi di affidabilità su base ingegneristica. Fra questi: CALREL (Liu e Kiureghian, 1991), NESSUS (Millwater et al., 1990), PROBAN (Madsen, 1988), STRUREL (Gollwitzer et al., 1994), PERMAS-RA e RELACS.

La presente nota chiarifica l'importanza dell'utilizzo delle tecniche di analisi di affidabilità attraverso una applicazione. Dopo una presentazione dei vari metodi di analisi, è verificata la stabilità di un molo a parete verticale, concentrandosi su due meccanismi: lo scorrimento del cassone sull'imbasamento e la eccessiva trascinamento. L'esempio è volutamente semplificato per chiarezza espositiva. Per il secondo meccanismo è indicato il calcolo in estremo dettaglio. Infine è calcolato con il metodo di livello III il grado di sicurezza del transito pedonale sulla sovrastruttura del molo. A tal fine sono sfruttate le indicazioni di letteratura sul carico agente (Franco e Franco, 1999, in cui le informazioni sono fornite nel linguaggio specifico dell'analisi probabilistica) e sulla resistenza (Franco et al., 1994).

Possono essere facilmente reperiti in letteratura altri e più rigorosi esempi di applicazione dell'analisi probabilistica ad opere marittime. Si vedano ad esempio Lamberti (1992), Vrijling e Meyer (1992), Burcharth (1992), Reeve e Fleming (1997), Christiani (1997), Tomasicchio (1998), De Girolamo et al. (2000), Oumeraci et al. (2001), Leira et al. (2005).

Concetti chiave dell'analisi di affidabilità

Testi di riferimento per i problemi di analisi probabilistica sono, ad esempio, il Madsen et al. (1986) e il Kottogoda e Rosso (1997), che ha anche applicazioni in ambito marittimo.

La progettazione di tipo deterministico si basa sul confronto fra due valori caratteristici del carico e della resistenza. Nella pratica progettuale più comune, a ciascuna verifica viene applicato un fattore unico che assicura un ampio margine di sicurezza che, seppure indefinito, è calibrato sull'esperienza maturata su strutture già realizzate. In questo caso si parla di metodo deterministico, o livello probabilistico di tipo 0 (il meno avanzato).

L'approccio di livello I, detto metodo semiprobabilistico, si differenzia dal precedente per la definizione su base probabilistica del valore caratteristico della resistenza e del carico, e per la definizione di valori di progetto tramite l'applicazione di fattori di sicurezza parziali (*partial safety factors*).

Come anticipato, in ambito marittimo, è pratica comune definire il carico su base probabilistica (per esempio quello con probabilità di superamento 10% nell'arco della vita dell'opera) pur senza evidenziare l'incertezza del dato stimato; il valore caratteristico della resistenza è in qualche caso il valore atteso (il miglior adattamento ai dati sperimentali) relativo a diversi livelli di danneggiamento, in altri casi ci si riferisce più correttamente ad un frattile inferiore.

Il margine di sicurezza complessivo è solo orientativamente il prodotto fra i margini di sicurezza assunti per il carico e per la resistenza, in relazione alla vita utile dell'opera. Di fatto, una valutazione rigorosa evidenzia che l'affidabilità complessiva differisce da tale stima grossolana.

Anche il metodo di livello I non consente una reale stima dell'affidabilità (o, viceversa, della probabilità di collasso) di un'opera e non permette il suo dimensionamento ottimale.

Tali possibilità sono invece offerte da tecniche più raffinate, che valutano la distribuzione di tutte le variabili del carico e della resistenza interessate al soddisfacimento di ciascun requisito prestazionale. Diviene così possibile ottimizzare il progetto, ovvero definire i parametri geometrici che consentono di raggiungere il grado di affidabilità desiderato.

I metodi che consentono di valutare direttamente qualsiasi distribuzione delle variabili sono detti di Livello III, o completamente probabilistici.

I metodi di livello II sono approssimati, ma più interessanti in quanto consentono la valutazione della sensitività di ciascuna variabile. L'importanza di quest'ultimo aspetto è presentata nel seguito e chiarita dalle applicazioni.

Metodi Time Invariant (TI)

Seppure la maggior parte dei problemi reali di stabilità sia strettamente legato a processi casuali (dipendenti dal tempo), le funzioni matematiche che ne esprimono il collasso possono essere semplificate al fine di considerare solo variabili casuali (indipendenti da questo): la trasformazione di processi in variabili avviene tipicamente usando distribuzioni ai valori estremi, oppure facendo ipotesi di stazionarietà.

In questo paragrafo sono descritti i metodi adatti alle funzioni di collasso che non dipendono dal tempo (TI, Time Invariant); per completezza sarà brevemente delineato nel paragrafo successivo, anche il caso generale (TV, Time Variant), formalmente più complicato.

Si assume che le variabili in gioco siano espresse da un vettore X a n -dimensioni, che abbiano una distribuzione congiunta continua $f_X(X)$ nota (il grassetto ne indica la natura vettoriale).

Ogni requisito funzionale deve necessariamente essere espresso da una relazione $g_i(X)$, detta funzione di collasso, che associ un valore negativo se lo stato individuato dalle variare comporta il collasso, uno positivo alla integrità ed un valore pari a zero alla condizione limite. Vi saranno tante relazioni $g_i(x)$ quanti sono i requisiti funzionali ed una funzione $g(X)$ globale, generalmente esprimibile come somme di prodotti delle $g_i(x)$, che è soddisfatta se lo sono tutti i requisiti.

La probabilità di collasso è pari alla probabilità che le variabili si trovino nel dominio di collasso, ovvero è data dall'integrale di $f_X(X)dX$, esteso al dominio in cui $g(X)<0$:

$$P_f = \text{Prob}\{g(X)<0\} = \int_{g(X)<0} \text{pdf}(x)dx \quad (2)$$

e si definisce affidabilità il complemento ad 1 della stessa, ovvero $1-P_f$.

La Figura 2a illustra schematicamente la funzione densità di probabilità (pdf) delle variabili; per semplicità, le variabili in gioco sono state raggruppate in modo da evidenziare la sollecitazione S e la resistenza R , per le quali è ben definita una generica funzione di collasso $g(X)=R(X)-S(X)$ e il dominio di collasso, ove $g<0$. Sulla base della definizione della resistenza e del carico limite, potrebbe definirsi zona di collasso la $g\leq 0$, anziché $g<0$; le due formulazioni non comportano reali differenze nei risultati (infatti, la $\text{Prob}\{g=0\}$ è nulla).

La Figura 2b, che è la proiezione sul piano SR della funzione pdf, evidenzia le curve ad ugual densità di probabilità, ed individua il dominio di collasso: la curva $g=0$ risulta infatti definita come la semplice bisettrice degli assi. Dalla figura appare intuitivo il significato della eq. 2: la probabilità di collasso è l'integrale della funzione densità di probabilità congiunta nell'area tratteggiata.

Nella figura è identificato anche il punto di progetto, ovvero lo stato che ha maggior probabilità di collasso. Se la pdf è regolare, il collasso avverrà con ogni probabilità nell'intorno di tale zona. Di fatto, se la pdf è regolare, l'identificazione di tale punto fornisce molte utili informazioni (come precisato nel seguito).

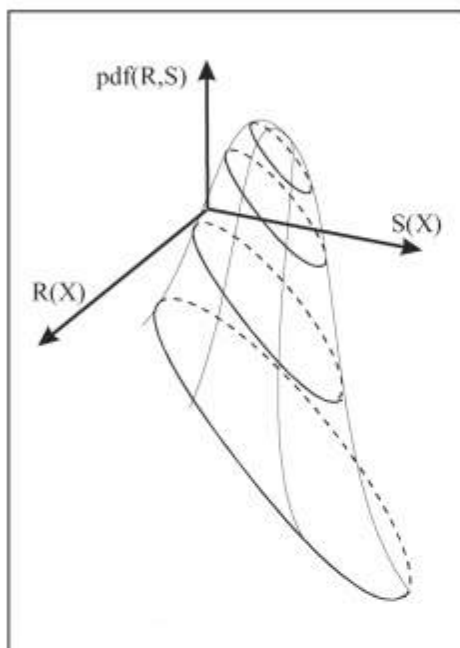


Figura 2a - Esempio di pdf (funzione densità di probabilità).

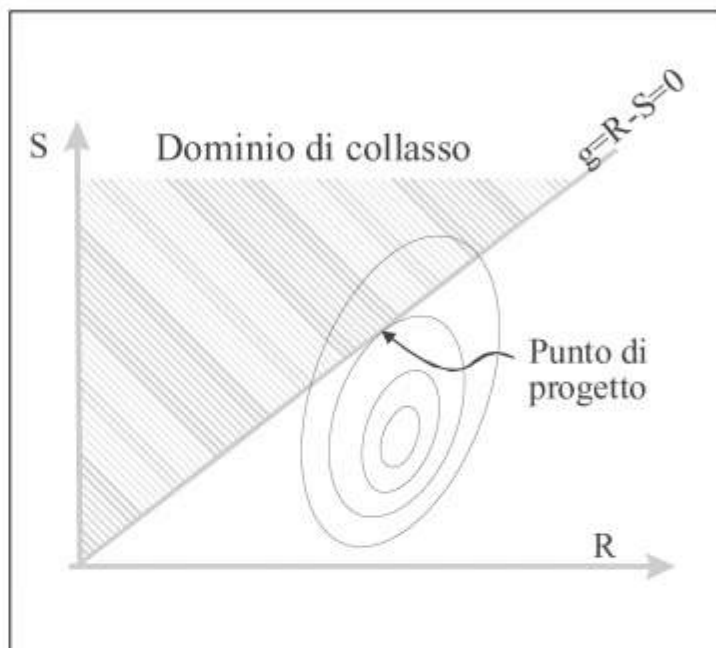


Figura 2b - Vista in pianta della pdf indicata a lato. La probabilità di collasso è l'integrale della pdf nel dominio di collasso.

Metodi approssimati di livello II del 1° ordine (FORM)

I procedimenti approssimati di livello II sono preferibili, anche rispetto a quelli esatti, perché consentono l'ottimizzazione del progetto, fornendo un valore sufficientemente approssimato della probabilità di collasso.

Essi sono caratterizzati da due aspetti: 1) la trasformazione delle variabili di base $\{X\}$ in gaussiane normalizzate e scorrelate $\{Z\}$; 2) l'approssimazione, tipicamente attorno al punto di progetto (Z'), delle funzioni di collasso attraverso funzioni lineari o quadratiche, quali:

$$g'(Z) = g(Z) + A \cdot (Z - Z') + B \cdot (Z - Z')^2 \quad (3)$$

Sono stati proposti molti metodi per trasformare le variabili $\{X\}$ nelle $\{Z\}$. Hanno trovato largo impiego la trasformazione di Rosenblatt, Nataf ed Hermite (Hohenbichler e Rackwitz, 1981) che partendo dalla distribuzione multidimensionale, intesa come prodotto di distribuzioni condizionate, opera la trasformazione di una variabile per volta, mantenendo approssimativamente inalterata la matrice delle correlazioni. Un metodo più semplice, quello dei momenti (Ditlevsen, 1979), si applica quando le informazioni sulle variabili di base sono poche, limitate ai momenti principali, e le reali distribuzioni sono incognite.

Senza entrare nel merito dei vari metodi, si può ben immaginare che l'approssimazione migliore deve avvenire in prossimità del punto di progetto, al fine di ridurre gli errori. Poiché il punto di progetto non è noto a priori, è spesso necessario ricorrere a procedure iterative.

Nello spazio delle variabili trasformate $\{Z\}$, la $g(Z)=0$ non è la semplice bisettrice degli assi (cfr. Fig. 2b). A fronte di una complicazione nella definizione della $g(Z)$, si ha una importante semplificazione nella pdf, che risulta una distribuzione Gaussiana multidimensionale con varianza uguale su tutte le direzioni (le curve ad ugual probabilità sono dei cerchi).

L'analisi di livello II più semplice è quella che approssima la funzione di collasso al primo ordine (FORM, First Order Reliability Method) ovvero ponendo nella eq. 3 $\mathbf{A}=\nabla g|_{Z^*}$ e $\mathbf{B}=0$.

La Figura 3 rappresenta una distribuzione congiunta normale $\phi(Z)$ della variabile (a 2 dimensioni) $Z=[Z_1, Z_2]$. Il caso ad n dimensioni è analogo, seppure complicato da rappresentare graficamente. Il metodo FORM di Hasofer e Lind (1974) prevede che la funzione di collasso $g(Z)=0$ (una curva) venga approssimata da una funzione al primo ordine, ovvero da una retta (asse $\eta=0$ nella Figura 3).

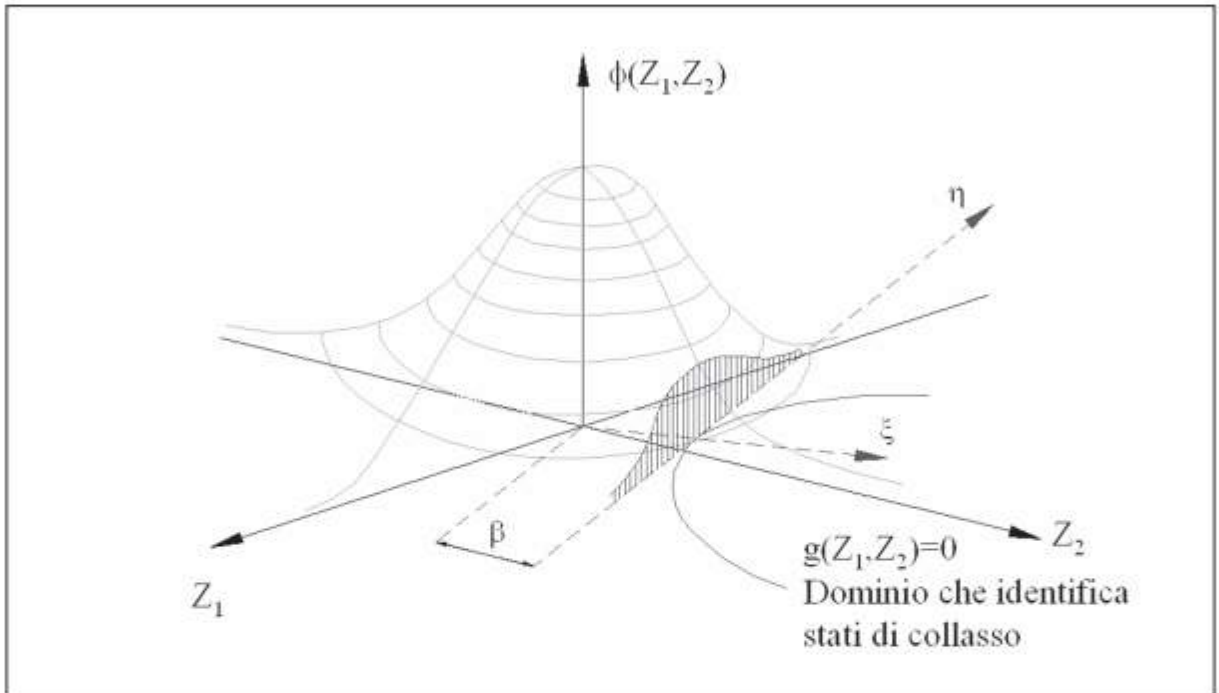


Figura 3 - Rappresentazione grafica del metodo FORM.

Curva reale ed approssimata devono coincidere nel punto di progetto, che dista β dall'asse.

La Figura 4 presenta la proiezione dello stesso grafico tridimensionale di Figura 3. La vista in pianta evidenzia che, quando la funzione $g=0$ è una retta, esiste un metodo molto semplice per stimare la probabilità di collasso (eq. 2). Definiti come in figura gli assi ξ ed η , la pdf considerata nella eq. 2 può essere integrata lungo η in modo da ottenere una distribuzione marginale, funzione della sola ξ . Poiché la pdf(η, ξ) da integrare è un prodotto di distribuzioni normali e scorrelate, anche la distribuzione marginale pdf(ξ) sarà una normale. È quindi possibile portare a termine l'integrazione della eq. 2, ottenendo esplicitamente la probabilità di collasso:

$$P_f = \int_{-\infty}^{-\beta} \varphi(\xi) d\xi = \Phi(-\beta) \quad (4)$$

dove la funzione Φ è la distribuzione Normale cumulata.

A questo punto è chiaro che per determinare P_f è sufficiente localizzare il punto di progetto, identificato dalla distanza β .

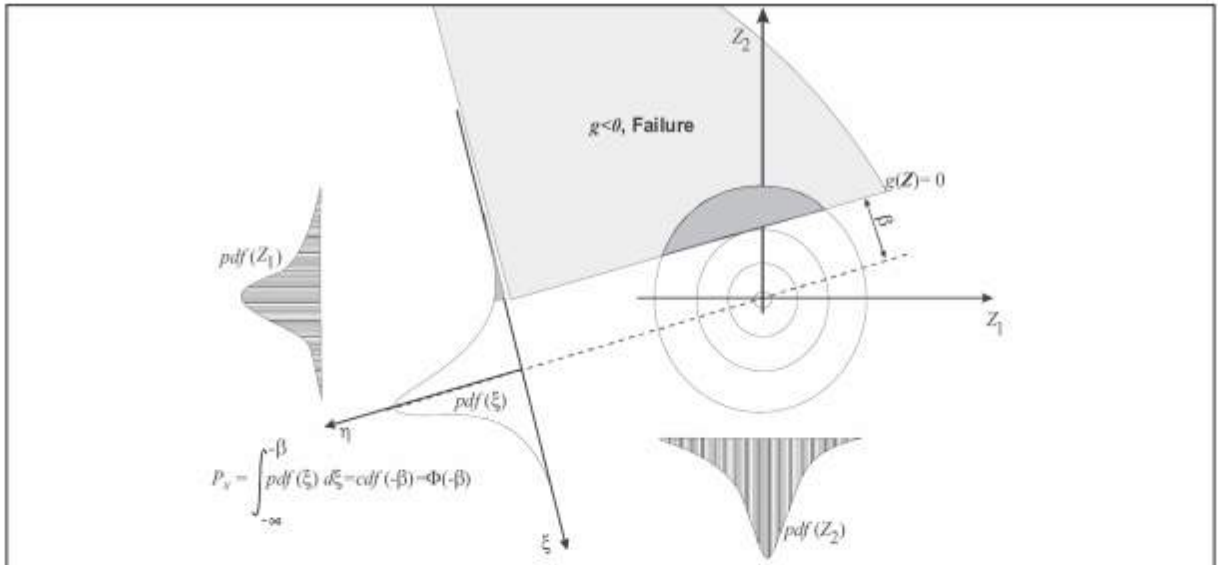


Figura 4 - Vista in pianta di una pdf data dal prodotto di due distribuzioni Gaussianhe normalizzate e scorrelate. L'eq. 2 si deve intendere un integrale doppio, che può essere calcolato integrando prima lungo la direzione η , e poi lungo la ξ ; si ricava che la probabilità di collasso vale $\Phi(-b)$.

La Figura 5 evidenzia due proprietà, ossia che (1) se la curva $g(Z)=0$ è sufficientemente regolare, grazie alla trasformazione nello spazio delle Z il punto di progetto è anche il punto più vicino all'origine e (2) la direzione normale alla curva, calcolata nel punto di progetto, deve passare per l'origine stessa.

Pertanto il punto di progetto Z può essere determinato intersecando la curva $g(Z)=0$ con la retta che ha direzione $\text{grad}(g(Z))$ e che passa per l'origine.

Tale retta ha come coseni direttori $\alpha_i = -(\partial g/\partial Z_i)/K$, dove $K=[\sum(\partial g/\partial Z_i)^2]^{0.5}$ e quindi Z è esprimibile come un vettore di lunghezza unitaria moltiplicata per β : $Z = \beta \sum \alpha_i$.

Per determinare β basta imporre che il punto di progetto appartenga alla curva, ovvero $g(\beta \sum \alpha_i)=0$.

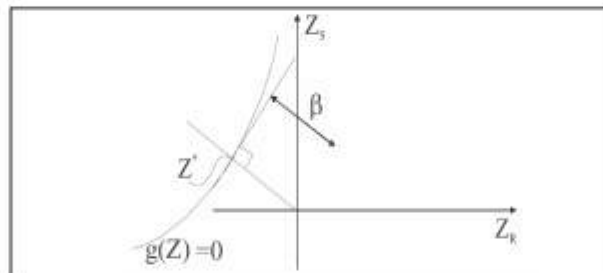


Figura 5 - Il punto Z è dato dall'intersezione fra la curva $g(Z)=0$ e la retta che parte dall'origine degli assi ed ha coseni direttori pari a $\nabla g|_{Z^*}$.

La localizzazione del punto di progetto è una prerogativa del metodo di livello II, che offre interessanti possibilità di analisi. Se si considera che il vettore di lunghezza β è diretto come ξ , si può facilmente valutare quale sia il contributo di ciascuna delle componenti X_i alla probabilità di collasso complessiva. I coseni direttori rappresentano così la *sensibilità* a quella variabile. Poiché la somma dei quadrati dei coseni direttori è pari ad 1, il quadrato della sensibilità α_j^2 assume un significato fisico ben preciso: il peso dell'incertezza (varianza) della variabile X_j in rapporto alla incertezza complessiva. Se la variabile X_j contribuisce poco, non si fa un grosso errore sostituendo questa con un parametro; il risultato della sostituzione è facile da prevedere: il vettore definito dal punto Z risulterà più corto (ovvero β sarà minore) per il mancato contributo della componente j -esima e la relativa probabilità di collasso $\Phi(-\beta)$ potrà essere immediatamente ricalcolata.

Riassumendo, le operazioni da eseguire per l'analisi di livello II di un meccanismo descritto dalla funzione $g(\mathbf{X}) < 0$, sono:

- 1 - definire le variabili X_i : tipo distribuzione, caratteristiche della distribuzione;
- 2 - trasformare le variabili in gaussiane normalizzate Z_i ;
- 3 - calcolare $(\partial g / \partial Z_i)$;
- 4 - calcolare $\alpha_i = - (\partial g / \partial Z_i) / K$, dove $K = [\sum (\partial g / \partial Z_i)^2]^{0.5}$;
- 5 - calcolare β risolvendo $g(\sum \beta \alpha_i) = 0$;
- 6 - calcolare $P_f = \Phi(-\beta) = \Phi(-\mu_g / \sigma_g)$.

Metodi approssimati di livello II del 2° ordine (SORM)

Una naturale estensione del metodo FORM è il tentativo di espandere la superficie di collasso al secondo ordine (operazione utile ammesso che tale approssimazione sia migliore di quella al primo ordine!).

Il metodo al second'ordine (SORM, Second Order Reliability Method) descrive la superficie di collasso attraverso la eq. 3. L'integrale definito dalla eq. 2 viene risolto avvalendosi di una soluzione approssimata (asintoticamente vera per β tendente all'infinito) dell'integrale, che ovviamente dipende dalle curvature k_i della funzione di collasso nel punto di progetto:

$$P_f = \Phi(-\beta) \prod \{\sqrt{1 - \beta k_i}\} \quad (5)$$

Il secondo fattore al secondo membro è evidentemente la correzione al secondo ordine del termine trovato con l'analisi al primo ordine (eq. 4). I valori di curvatura k_i necessari al calcolo sono in numero pari al numero delle variabili, e sono ottenuti dalla matrice Hessiana della funzione di collasso valutata in β . Vi possono essere alcuni problemi di soluzione della eq. 5, che per esempio è singolare quando $k_i = 1/\beta$: Rackwitz (2001) ad esempio presenta e giustifica approssimazioni diverse.

Non vi sono attualmente soluzioni asintotiche per metodi al terzo ordine.

Metodi (esatti) di livello III

Per risolvere tale integrale in modo esatto si può procedere con i metodi di livello III: analiticamente nei casi più semplici, per via numerica o, più comunemente, tramite il metodo Monte Carlo.

I metodi completamente analitici possono essere sviluppati solo per i casi più semplici.

I metodi di integrazione numerica derivano dalla esplicitazione numerica della eq. 2 ed hanno delle limitazioni nel numero n di variabili che si possono considerare per non rendere il problema troppo oneroso ($n < 10$).

Un caso particolarmente semplice è quello in cui sia nota la distribuzione della sollecitazione e della resistenza (pdf_S e pdf_R , rispettivamente).

Si ha:

$$P_f = \iint_{\rho < \sigma} \text{pdf}_R(\rho) \text{pdf}_S(\sigma) d\rho d\sigma \quad (6)$$

dove $\rho < \sigma$ rappresenta il dominio in cui la resistenza è minore della sollecitazione.

L'integrazione della eq. 6 è semplice: per ogni valore di resistenza ρ , si ha collasso quando la variabile sollecitazione è maggiore di ρ , evento la cui frequenza di superamento è data da: $[1 - \text{cdf}_S(\rho)]$.

Di conseguenza:

$$P_f = \int_{-\infty}^{\infty} \text{pdf}_R(\rho) [1 - \text{cdf}_S(\rho)] d\rho \quad (7)$$

ovvero

$$P_f = 1 - \int_{-\infty}^{\infty} \text{pdf}_R(\rho) \text{cdf}_S(\rho) d\rho \quad (8)$$

Il metodo Monte Carlo, che risale ad una idea di E. Fermi e deve il nome al celebre casinò, implica la generazione casuale di molte variate X_i secondo la reale distribuzione della X , sicché la P_f risulta stimata semplicemente dalla frequenza con cui $g(X_i) < 0$.

L'implementazione più semplice, detta Crude Monte Carlo, risulta molto onerosa computazionalmente poiché, per avere una stima sufficientemente accurata del risultato ($1+10\%$), il numero degli eventi da generare è dell'ordine di 10^4+10^5 volte l'inverso della probabilità di collasso. Normalmente si utilizzano alcune tecniche tese a ridurre il numero di eventi generati (Hohenbichler e Rackwitz, 1988): è detta Importance Sampling quella che opera una trasformazione della funzione densità di probabilità in modo da ampliare la regione prossima alla zona di collasso; Adaptive Sampling quella che opera questa trasformazione in modo dinamico, man mano che evolve il calcolo.

Nel metodo Monte Carlo il punto di progetto non viene calcolato. La sua individuazione sarebbe macchinosa, in quanto, in assenza di una trasformazione delle variabili in una serie di Gaussiane normalizzate scorrelate, il punto di progetto non gode più della proprietà di avere la minor distanza dall'origine degli assi (valor medio). Ecco perché il metodo non risulta adatto ai problemi di ottimizzazione.

Metodi Time Variant (TV)

L'analisi di affidabilità dipendente dal tempo (TV, Time Variant), calcola la probabilità di collasso attraverso la distribuzione che caratterizza l'istante in cui il sistema cessa di soddisfare i requisiti funzionali.

Tipicamente i carichi sono processi stazionari mentre le resistenze decadono lentamente nel tempo. La funzione di collasso deve essere espressa nella forma $g(S(t),t)=0$, dove con $S(t)$ si sono indicati tutti i processi coinvolti. In campo marittimo, il carico principale è generalmente dovuto alle onde.

La elevazione di superficie (pelo libero) è descritta da un processo casuale gaussiano e stazionario.

Fra gli approcci esistenti, quello generalmente seguito nel campo marittimo è legato alla definizione della frequenza di attraversamento dello stato di collasso: essa è pari alla probabilità che ci sia un collasso purché si parta da una situazione di soddisfacimento dei requisiti. Tale frequenza viene espressa da:

$$v^*(t) = P\{g(S(t),t)>0\} \cap P\{g(S(t+\Delta t),t+\Delta t)<0\} \quad (9)$$

La v^* non è di facile determinazione. Il numero di attraversamenti N^* della superficie $g(S(t),t)=0$ nell'intervallo fra t_1 e t_2 si ottiene dall'integrale della funzione $v^*(t)$ fra tali istanti. Il valore atteso del primo attraversamento risulta dato da espressioni alquanto complesse dei processi coinvolti.

Per semplificare il fenomeno si suole suddividere tali processi in tre gruppi: quelli definibili attraverso variabili indipendenti dal tempo, R , quelli lentamente variabili nel tempo $Q(t)$, detti anche sequenze casuali, ed i rimanenti processi $S(t)$, descritti per intero, che sono rapidamente variabili. La nuova funzione di collasso risulta quindi del tipo $g(S(t), Q(t), R)=0$. La suddivisione indicata consente di calcolare la frequenza di attraversamento dello stato di collasso $v^*(t)$ a Q ed R fissati (per esempio sfruttando la formula di Rice, già nota nel settore marittimo), e derivare la probabilità di avere un collasso entro un tempo definito grazie ad integrazioni sulle altre variabili.

Fortunatamente, per svolgere l'analisi di tipo TV non è sempre necessario entrare nei dettagli delle operazioni statistiche perché l'espressione finale può essere ricondotta a espressioni più semplici, dipendenti dal punto di progetto β , oltre che da altre caratteristiche dei processi delle $S(t)$ (per es. la frequenza di picco) e, nel caso di tecniche al second'ordine di approssimazione (SORM), della curvatura della funzione di collasso.

È comunque difficile operare le giuste approssimazioni e l'analisi invariante nel tempo rimane la più comune.

Affidabilità di un sistema

Sin ora è stata descritta l'analisi di affidabilità di un singolo meccanismo, o componente, ovvero il collasso è stato descritto da una singola funzione. Non sempre è possibile né opportuno riunire in una sola funzione tutti i requisiti prestazionali. Per esempio, se il dominio di non soddisfacimento di due prestazioni è totalmente disgiunto, queste possono essere analizzate separatamente con notevole risparmio nell'elaborazione.

La probabilità di collasso del sistema nel suo complesso P_{SYS} risulta dall'unione o dall'intersezione di più

meccanismi, caratterizzati ciascuno dalla propria P_f .

Si distinguono due modalità elementari per formare un sistema, sulla base della struttura logica:

-sono detti sistemi *in serie* quelli in cui il collasso avviene se almeno uno dei meccanismi individuati non è soddisfatto (Fig. 6), e la P_{SYS} è ottenuta dall'unione delle P_f (la P_{SYS} minima si ha nel caso di correlazione completa, ed è pari alla maggiore fra le P_f ; la P_{SYS} massima si ha per domini di collasso disgiunti ed è pari alla somma delle singole P_f);

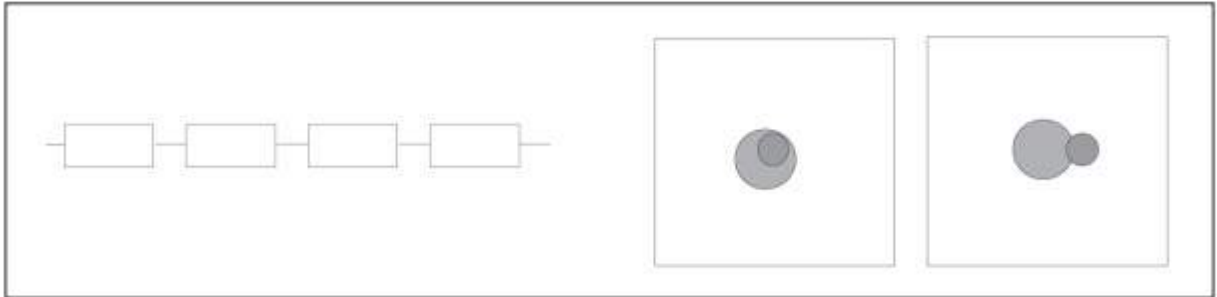


Figura 6 - Sistemi in serie.

-sono detti sistemi *in parallelo* quelli in cui il collasso avviene se tutti i meccanismi individuati non sono soddisfatti (Fig. 7), e la P_{SYS} è ottenuta dall'intersezione delle probabilità di collasso delle diverse componenti (la P_{SYS} può essere nulla se i domini sono totalmente disgiunti; per domini di collasso scorralati, la P_{SYS} è pari al prodotto delle P_f ; la P_{SYS} massima si ha nel caso di correlazione completa ed è pari alla minore fra le P_f).

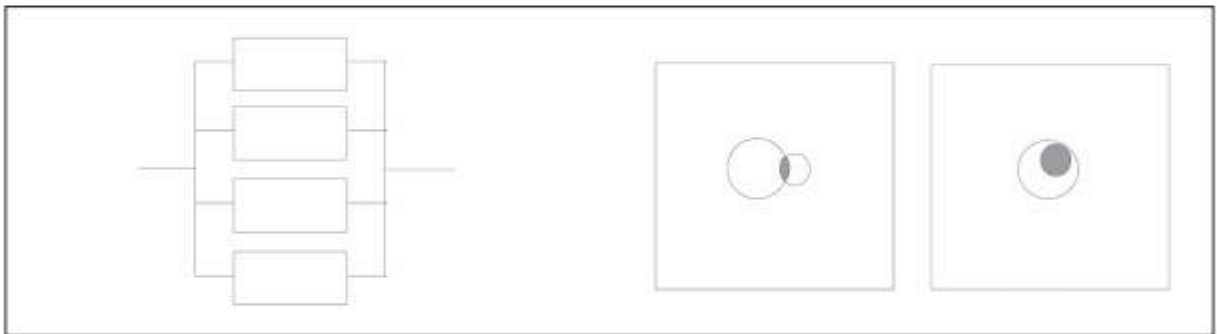


Figura 7 - Sistemi in parallelo.

Nel caso di due sole funzioni di collasso è possibile ottenere facilmente la P_f del sistema complessivo, somma o intersezione delle P_f dei singoli meccanismi, quando sia nota la correlazione fra le variabili e i punti di progetto. Nel caso di molti meccanismi il procedimento è invece macchinoso. La P_f del sistema complessivo può essere però stimata sulla base del confronto delle coppie di meccanismi: seguendo questo approccio, Didevsen (1979a) propone due limiti, uno massimo ed uno minimo, entro i quali deve essere compresa la probabilità di collasso complessiva.

L'affidabilità di un sistema sarà formata da un insieme articolato di componenti, suddiviso in sottosistemi che operano in serie o in parallelo. Un interessante esempio di sistema articolato è fornito da Colamussi (1992) in merito al progetto di difesa di Venezia.

Applicazione

L'analisi di affidabilità di un'opera marittima richiede uno studio approfondito, non idoneo agli obiettivi del presente lavoro, che si propone semplicemente di illustrare con un esempio i procedimenti di calcolo introdotti. Si è scelto di riallacciarsi ad alcune analisi di un lavoro già svolto (Martinelli, 1998), teso alla stima della

probabilità di collasso del molo foraneo di Genova Voltri e di estendere il procedimento a diversi meccanismi di collasso. Ciò facilita anche il processo di caratterizzazione delle variabili usate. Il procedimento di analisi di RA scelto è il livello II, Time Invariant.

L'analisi completa viene eseguita con un software di analisi probabilistica commerciale. Il controllo del risultato ottenuto è eseguito dettagliando il calcolo passo passo, per il caso più semplice fra i meccanismi di collasso individuati.

Il molo considerato è rappresentativo di un tipico progetto Italiano (Franco, 1994). La pianta è presentata in Figura 8 e la sezione trasversale in Figura 9.



Figura 8 - Il Porto di Genova Voltri (D'Appolonia S.p.A.).

Ogni cassone ha lunghezza di 30 m e massa pari a 30.000 t. L'imbasamento, costituito da pietrame mescolato a clinker e residuo d'altoforno, è alto circa 10 m, esteso di 14 metri lato esterno e 7 m lato interno; la posa ha determinato un'apprezzabile compattazione del terreno. Il coronamento, inizialmente a quota +7.5 m, è stato rialzato di 1.1 m in una fase successiva.

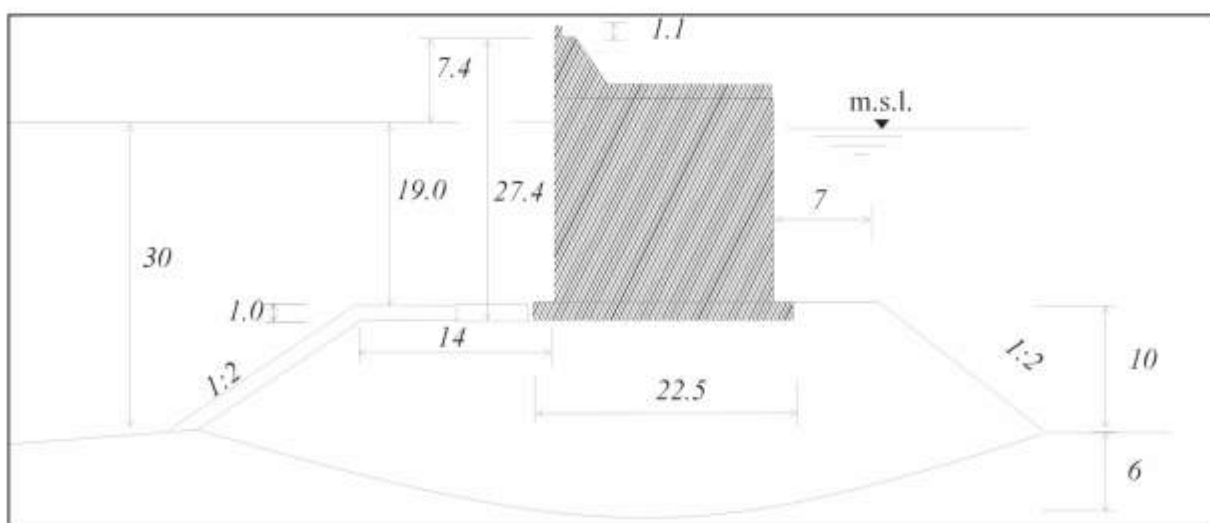


Figura 9 - Molo foraneo di Genova Voltri: sezione trasversale.

Posizione del problema

L'analisi di rischio deve essere basata su svariati meccanismi di collasso, indicati in Figura 10. La Figura 11 evidenzia il modo più probabile di collasso, che secondo il lavoro citato è dato dalla rottura dell'imbasamento, con scorrimento e rotazione del cassone.

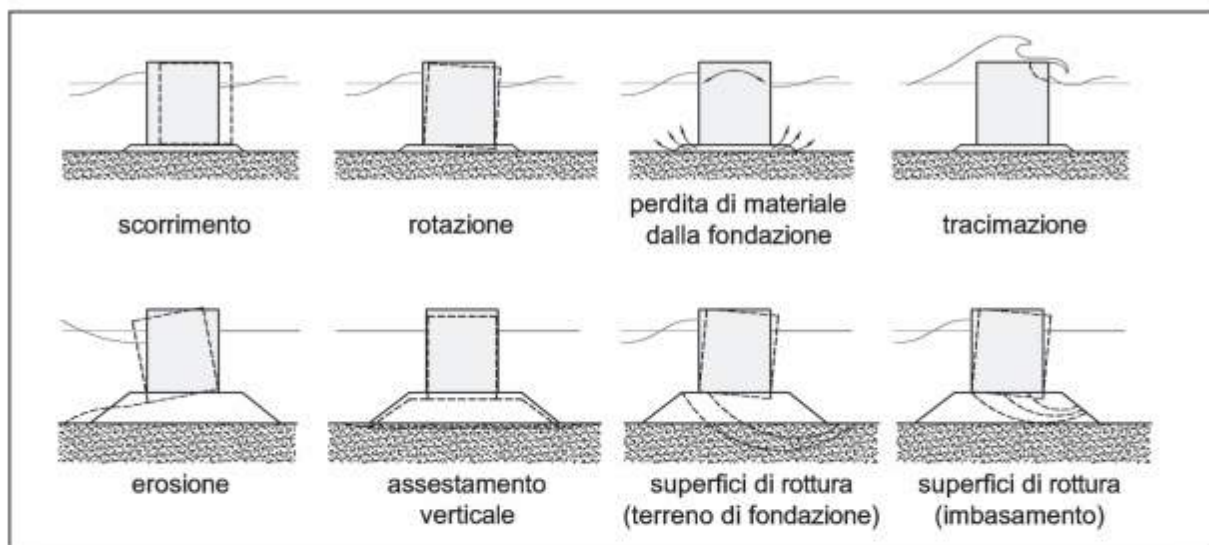


Figura 10 - Alcuni possibili meccanismi di collasso.

Il meccanismo indicato in Figura 11 appare quindi come il più critico. Esso però non è adatto ad essere descritto in questa sede, poiché la sua formulazione è complessa e non facilita la comprensione dell'analisi di affidabilità. Un rinforzo dell'imbasamento lato interno, ad esempio con estensione di 7 m, ridurrebbe significativamente il pericolo che si inneschi questo meccanismo, sino a renderlo equivalente al caso di un semplice scorrimento (con probabilità di collasso dell'ordine del 2%).

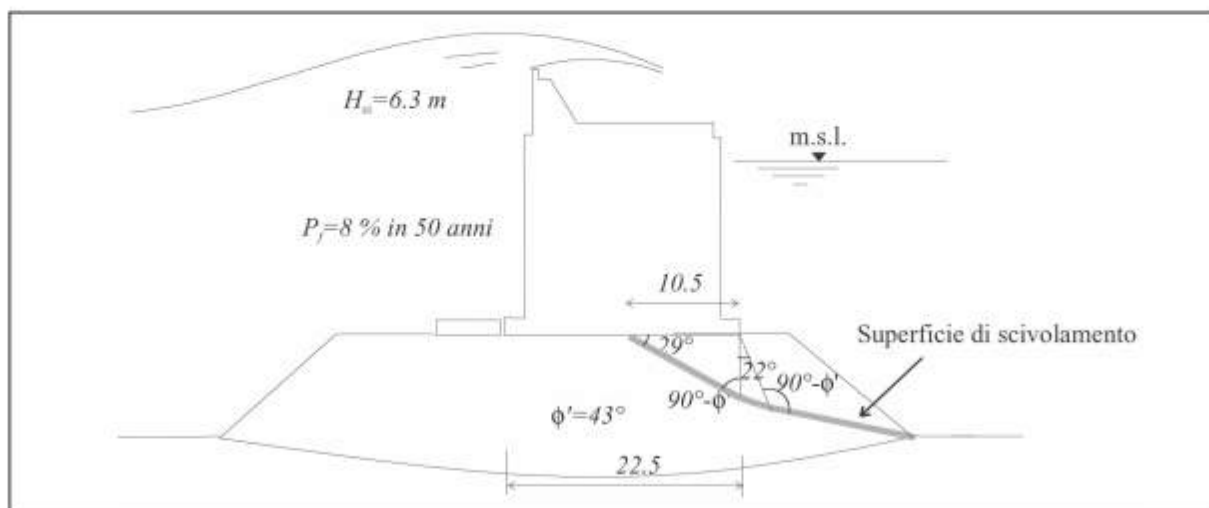


Figura 11 Punto di progetto per il meccanismo di collasso più probabile (da Martinelli, 1998).

A titolo esemplificativo, questa analisi si concentra su due meccanismi, esprimibili con modelli semplici: un modo classico, lo scorrimento e un modo poco analizzato, l'eccesso di tracimazione, caratterizzato da due stati limite: la negata accessibilità al molo ed il vero e proprio danno strutturale.

Al fine di evidenziare le potenzialità del calcolo, si cercherà di dare risposta a diverse domande:

- 1) Quale è la stima della P_f (probabilità di collasso) dovuta ad uno o entrambi i meccanismi indicati nel paragrafo precedente, nonché la sensitività della P_f alle variabili in gioco?
- 2) I meccanismi individuati sono descrivibili da facili funzioni e pertanto risultano idonei ad illustrare le possibilità dei metodi statistici nei confronti dell'ottimizzazione progettuale. In particolare l'altezza del coronamento è una caratteristica geometrica che risulta a sfavore di stabilità per il primo meccanismo (scorrimento) ed a favore per il secondo (tracimazione). Sfruttando tale peculiarità, si può affrontare il problema seguente. Ipotizzando la volontà di riprogettare il rialzo del coronamento, quale è l'altezza ottimale da prevedere?
- 3) In caso di mareggiata, l'eccesso di tracimazione può comportare una riduzione della funzionalità, per esempio limitando la possibilità di camminare sul coronamento. Ci si può chiedere: qual'è la probabilità di cadere se si accede al molo quando vi sia in corso uno stato di mare assegnato?

Definizione matematica dei meccanismi di collasso

La funzione di collasso legata allo scorrimento è espressa da:

$$g_1 = \mu (W - F_v) - F_h \quad (10)$$

dove F_h e F_v sono date dal prodotto della forza orizzontale e verticale stimata moltiplicate per la corrispondente incertezza del modello assunto per il calcolo U_{th} e U_{tv} , W è la forza peso, μ è il coefficiente di attrito fra il cassone e l'imbasamento. Lo scorrimento avviene quando la funzione di collasso è negativa.

La funzione di collasso legata all'eccesso di tracimazione è descritta da:

$$g_2 = q - q_{lim} \quad (11)$$

dove il carico, ovvero la tracimazione, per onde perpendicolari e parete piana risulta (Franco e Franco, 1999):

$$q = \sqrt{(gH_w^3) 0.082 \exp(-(B R_c / H_w))} \quad (12)$$

ove R_c è il bordo libero, pari a R_{c0} (bordo libero per marea nulla) - h_w (marea), B è l'incertezza di modello e la resistenza è espressa attraverso una tracimazione limite q_{lim} che dipende dallo stato limite di interesse (mancanza di funzionalità o distruzione totale).

Un esempio degli effetti della tracimazione, oggetto di discussione, è illustrato in Figura 12.



Figura 12 - Porto di Cirò Marina (KR): mareggiata del Novembre 1998.

Per non complicare inutilmente il problema, non sono state considerate le variabili che esprimono l'incertezza di modellazione del meccanismo. Si tratterebbe di definire le due variabili casuali che moltiplicano il secondo membro delle eq. 10 ed eq. 11. Nella pratica è corretto definirle, perché generalmente i modelli usati non interpretano perfettamente tutti i fenomeni in gioco. Perfino il meccanismo dello scorrimento,

che certamente è fra i più affidabili di quelli indicati in Figura 10, non valuta tutti gli aspetti e viene solitamente applicata trascurando per esempio la forza orizzontale.

Caratterizzazione delle variabili

Le funzioni indicate coinvolgono processi dipendenti nel tempo e necessiterebbero di una analisi di tipo Time Variant (TV).

Nella logica dell'analisi invariante da questo (TI), si considera, invece, l'evento più gravoso nell'arco di vita utile: in particolare le azioni ondose sono relative alla mareggiata massima in 50 anni, mentre i processi legati alla resistenza sono assunti stazionari.

La statistica delle variabili è riassunta in Tabella 1.

L'incertezza dell'azione ondosa è data da due fattori: l'incertezza legata alla mareggiata critica nell'arco di vita utile dell'opera e l'incertezza legata alla stima della forza associata a tale mareggiata.

La prima di queste incertezze esprime la variabilità del clima ondoso estremo. Normalmente le mareggiate sono studiate come processi casuali e caratterizzati solo attraverso il loro stato energetico, tipicamente l'altezza significativa (eventualmente posta in relazione alla durata dell'evento).

Nel caso di Genova Voltri, la statistica degli eventi non è ben chiara. In Martinelli (1998) sono confrontate indicazioni di letteratura, osservazioni operate da navi in transito (dati KNMI 1961-1980 relativi all'alto Tirreno di fronte a Genova, nella direzione che ha fetch per Voltri) e previsioni a tre ore dello stato del mare (MetOffice, 1988-97, settore posto immediatamente di fronte a Genova Voltri). La statistica suggerita per H_{OS}^{50} (=altezza significativa massima in 50 anni), è descritta da una distribuzione di Gumbel con valor medio 6.2 m e deviazione standard 0.8 m. La varianza indicata vuole esprimere la variabilità intrinseca del fenomeno e non ingloba l'effetto dovuto alla discordanza fra la serie di dati. La statistica è stata ritenuta ragionevole dagli operatori locali e dall'Autorità portuale ed è compatibile con le più recenti indicazioni della RON (in termini di altezza massima sin ora osservata).

La seconda sorgente di incertezza sul carico ondoso è legata alla relazione, fornita ad esempio dalle consolidate formule di Goda, tra la forza massima orizzontale e verticale agente sul cassone e lo stato di mare; l'incertezza statistica della formula è stata stimata da Van der Meer et al. (1994) e modificata da Oumeraci et al. (2001) per considerare anche l'incertezza sulla identificazione dell'onda massima.

Le altre variabili "tipo carico" sono caratterizzate da:

- h_w (marea massima attesa contemporaneamente all'evento critico), stimata essere una gaussiana con $\mu_h=0.3$ m e $\sigma_h=0.2$ m;
- B (errore di modello per la formula di tracimazione), caratterizzata in Franco and Franco (1999) per moli a parete verticale.

Le variabili "tipo resistenza" sono caratterizzate da:

- W (forza peso), considerata nota (ovvero è assegnata in forma di parametro);
- μ (coefficiente di attrito fra cassone e imbascamento), definita secondo le indicazioni di Chen and Liu (1990);
- q_{lim} (limite ammissibile di tracimazione), stimata, come si vedrà in seguito, in modo euristico; la sua caratterizzazione pone infatti alcuni problemi.

La tracimazione ammessa q_{lim} dipende sostanzialmente dall'uso che si fa del molo. A Genova Voltri non vi sono servizi sulla banchina e il molo è accostabile sul lato interno, ovvero vi sono delle bitte, ma non è consentito l'attracco durante una mareggiata (il tiro sulle bitte potrebbe causarne il collasso).

La pratica progettuale non è consolidata; in alcuni casi si pone come limite di tracimazione il valore di 200 l/s/m, richiamando le direttive valide per rivestimenti spondali pavimentati, per le quali il danno si manifesta per una tracimazione variabile fra 200 e 1000 l/s/m. Il valore limite 200 l/s/m per un coronamento di diga a parete verticale è suggerito anche da Castillo et al. (2006), sulla base di una approfondita ricerca di letteratura.

Sembra d'altro canto che non siano stati fatti studi specifici sui moli a parete verticale. Calcolando con la eq. 12 la portata di progetto per un tipico porto giapponese, Noshiro Port (Takahashi, 1996), il valore è di $q = 350$ l/s/m. Secondo la normativa giapponese, quindi, tale portata media per unità di larghezza non è temuta; nella normativa non è prescritto alcun limite (per lo meno in assenza di servizi in banchina) come se l'eccesso di tracimazione non dovesse essere una causa di instabilità strutturale. La Figura 12, che pre-

senta un esempio di abbondante tracimazione di un molo verticale, tende invece ad evidenziare l'esistenza un certo rischio.

Per caratterizzare la tracimazione ammissibile è necessaria un'analisi approfondita del processo, che evidenzi il valore massimo di tracimazione ed i suoi effetti. Ciò esula dagli scopi della presente nota, il cui contributo in merito si limita a sollevare il problema di una carenza di indicazioni progettuali precise, in modo da poter evidenziare attraverso l'analisi probabilistica di livello II quale è il beneficio di una analisi più approfondita.

La variabile resistenza è caratterizzata nel seguito da una Log-Normale che rimane sostanzialmente compresa fra 200 e 1000 l/s/m. Si noti che l'intervallo proposto, piuttosto ampio, esprime la incertezza sul fenomeno che è dovuta a mancanza di conoscenza, piuttosto che ad una variabilità intrinseca delle caratteristiche del materiale.

Tabella 1 - Statistica delle variabili considerate.

X_i	Variabile	Distribuzione	μ X_i	X_i
H_s	Altezza d'onda significativa alla -30. Distribuzione di H_{max} massimo in 50 anni	Gumbel	5.90 m	0.80 m
S_{0m}	Ripidità dell'onda al largo H_{0s} / L_{om}	Gaussiana	0.035	10%
h_w	Marea massima attesa (variazione rispetto alla superficie libera)	Gaussiana	0.30 m	0.20 m
μ	Coefficiente attrito	LogNormale	0.64	10%
q_{lim}	Portata di tracimazione ammissibile	LogNormale	540 l/s/m	272 l/s/m
U_{fh}	Incetezza sul modello di forza orizzontale	Gaussiana	0.90	0.20
U_{fu}	Incetezza sul modello di forza verticale	Gaussiana	0.77	0.20
B	Incetezza sul modello di tracimazione	Gaussiana	3.0	0.26

Stima dell'affidabilità del sistema

Per l'analisi statistica del sistema è stato utilizzato un software commerciale (Strurel). La Tabella 2 presenta la probabilità di collasso dei due meccanismi separatamente, e le sensitività a ciascuna variabile.

Tabella 2 - Fattori di sensitività per i vari meccanismi.

Fattori di sensitività	Scorrimento	Tracimazione	Altri meccanismi
$\alpha 1(H_s)$	0.85	0.78	...
$\alpha 2(h_w)$	0.01	0.25	...
$\alpha 3(s_{op})$	-0.16	-0.01	
$\alpha 4(U_{fh})$	+0.43		
$\alpha 5(U_{fu})$	+0.08		
$\alpha 6(\mu)$	-0.23		
$\alpha 7(B)$		-0.26	
$\alpha 8(q_{lim})$		-0.50	
β FORM \rightarrow P_f	2.22 \rightarrow 1.3%	2.08 \rightarrow 1.9%	
β SORM \rightarrow P_f	2.28 \rightarrow 1.1%	2.05 \rightarrow 2.0%	

L'affidabilità del sistema è stata calcolata sulla base di una serie di parametri geometrici, indicati nella Figura 9, assumendo nulla l'altezza del muro posto sul coronamento (l'effetto del muro è discusso nel paragrafo seguente). La probabilità di collasso relativa al meccanismo dello scorrimento risulta, con i metodi FORM e SORM, pari a 1.3% e 1.1% rispettivamente (β pari a 2.22 e 2.28) nell'arco di vita dell'opera (50 anni). Tale valore è quantitativamente credibile, in accordo con altre analisi di letteratura ed in linea con l'obiettivo che ci si propone di raggiungere in sede progettuale. La probabilità di collasso relativa al meccanismo della tracimazione è un po' maggiore, 1.9% e 2.0%, risultato meno accurato a causa di quanto esposto in precedenza sull'incertezza relativa alla variabile resistenza.

La probabilità di collasso del sistema complessivo, definito come combinazione dei due meccanismi in serie, è risultata (quasi) pari alla somma delle singole probabilità, ossia 3.0%, ad indicare che i meccanismi sono sostanzialmente scorrelati.

La Figura 13 presenta la distribuzione delle variabili in forma grafica. In essa è rappresentato il contributo di ciascuna variabile alla varianza complessiva, evidenziando in grigio le variabili legate agli errori di modello. Appare qui evidente l'effetto di ciascun tipo di incertezza sulla probabilità di collasso, ovvero sulla distanza del punto di progetto dall'origine. In particolare la Figura 13 evidenzia che per lo scorrimento la probabilità di collasso stimata si basa su modelli sufficientemente dettagliati e che il contrario accade per la tracimazione: in questo caso il risultato è influenzato eccessivamente dalla incertezza causata dalla attuale scarsa conoscenza del fenomeno.

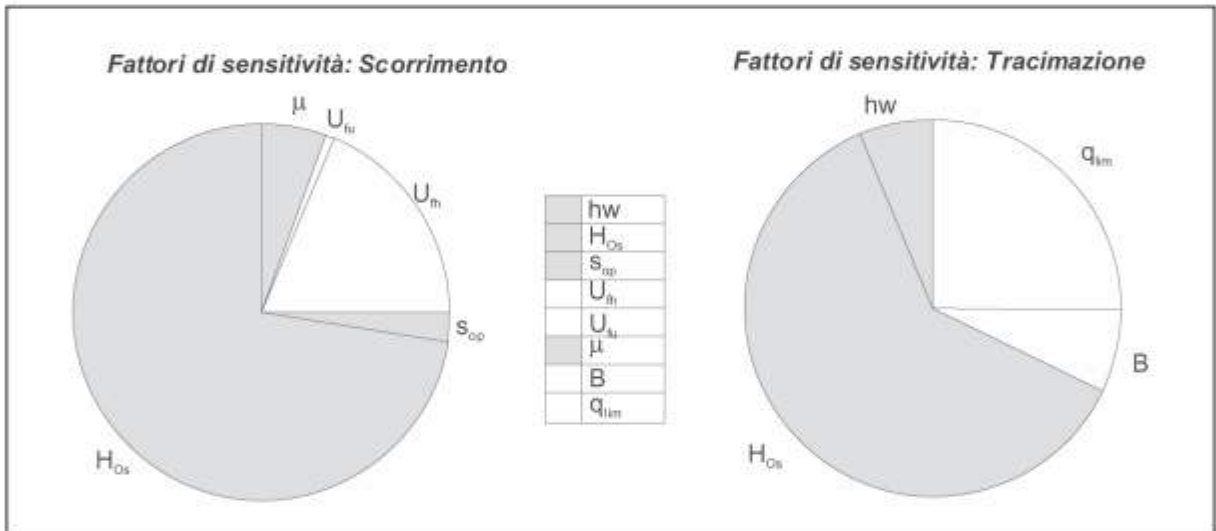


Figura 13 - Distribuzione della varianza complessiva in funzione delle variabili. Gli α^2 relativi alle variabili fisiche sono in grigio, mentre quelli legati alle variabili che esprimono l'incertezza della formula sono in bianco.

L'incertezza sullo stato di mare è un aspetto intrinseco del processo e non può essere ridotto oltre certi limiti. L'incertezza sulle formule può invece essere ridotta ed è bene farlo qualora tale incertezza appaia predominante. Nel caso del secondo meccanismo di collasso, si vede che la variabile q_{lim} (portata ammissibile di tracimazione) incide in modo ingiustificato sul risultato finale. Si deve concludere che per questo meccanismo è necessario uno studio più approfondito del fenomeno.

Immaginiamo che uno studio stabilisca con precisione il valor medio della resistenza; la varianza della variabile sarebbe pari a quella propria del materiale (che ragionevolmente sarà molto inferiore a quella indicata in Tabella 1). La sensitività relativa alla variabile q_{lim} sarebbe inferiore e la probabilità di collasso stimata sarebbe più precisa: si noti che, qualora lo studio confermasse il valor medio assunto $E[q_{lim}] = 540 \text{ l/s/m}$, la probabilità di collasso stimata risulterebbe inferiore (il coseno direttore della variabile q_{lim} sarebbe nullo e la lunghezza del vettore β può essere direttamente ricalcolata).

Analisi parametrica

Sempre a titolo di esempio, si è svolta un'indagine sull'effetto di un innalzamento del coronamento dell'opera. Il rialzo del coronamento, tramite il muretto alto 1.1 m, comporta logicamente una riduzione della tracimazione, ma contemporaneamente un aumento della forza orizzontale esercitata sull'opera. La stima della probabilità di collasso è stata ripetuta al variare dell'altezza di tale muretto. La Figura 14 evidenzia che i due meccanismi considerati hanno una risposta opposta al variare dell'altezza raggiunta. La probabilità di collasso congiunta presenta un minimo per un'altezza di circa 1.7 m, quindi la conseguenza delle ipotesi fatte definisce con chiarezza un'altezza "ideale" del coronamento.

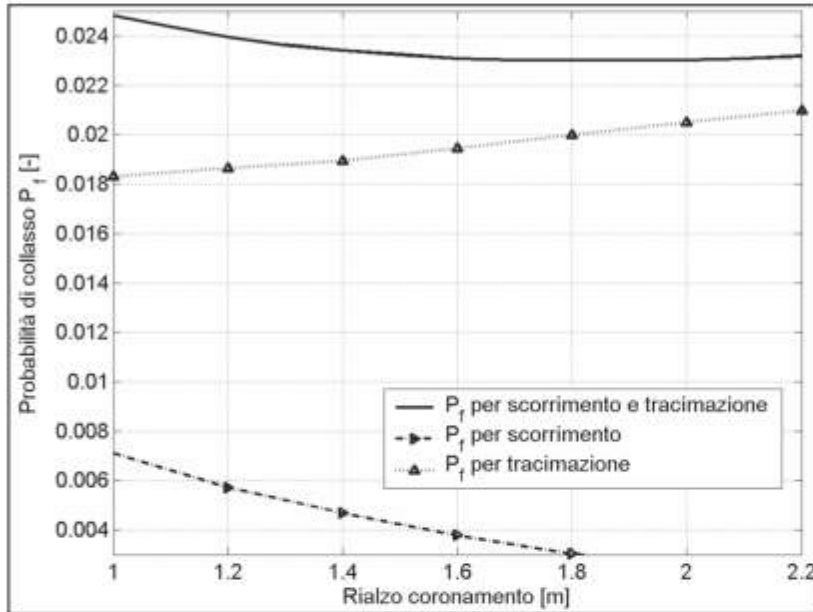


Figura 14 - Effetto del muro posto sul coronamento nei riguardi della probabilità di collasso.

Il calcolo presentato ha un mero scopo esemplificativo, che non si accorda con la necessità di analizzare varianti progettuali realistiche. Ciò non significa che l'analisi non possa essere condotta con accuratezza. Per esempio l'analisi del meccanismo indicato in Fig. 11 suggerisce una utilissima modifica progettuale finalizzata ad un aumento della stabilità complessiva, consistente in un rinforzo dell'imbasamento lato interno di 7 m.

Approfondimento: analisi di affidabilità passo passo con metodo di livello II (FORM)

Obiettivo di questo paragrafo è esemplificare la procedura di calcolo con il metodo di livello II di Hasofer e Lind, nella approssimazione FORM, già delineata concettualmente in precedenza.

Nello specifico si vuole valutare la probabilità di collasso strutturale per la diga foranea di Genova Voltri, dovuto al meccanismo di eccesso di tracimazione.

Combinando le eq. 10 e 11 si ha:

$$g_2 = q_{lim} - \sqrt{(gH_{si}^3) 0.082 \exp(-(B R_c/H_{si}))} \quad (13)$$

Le operazioni da eseguire sono:

1 - definire le variabili: tipo distribuzione, caratteristiche della distribuzione;

per semplicità si assume costante e noto $B=3.0$ e si assume $R_c=8.0$ m - h_w .

Le variabili sono H_{si} , h_w , q_{lim} la cui statistica è data in Tabella 1. Per semplicità si è supposto che H_{si} fosse uguale a H_{s0} , trascurando le differenze dovute alla trasformazione dell'onda e quindi anche l'effetto della variabile s_{op} .

2 - trasformare H_{si} , q_{lim} , h_w in variabili normali Z_1 , Z_2 , Z_3 in prossimità del punto di progetto, che inizialmente può essere per esempio il valor medio atteso.

Poichè abbiamo assunto le variabili scorrelate, la trasformazione è semplice e può essere fatta separatamente per le diverse variabili.

Si cerca la variabile Z che ha le stesse pdf e cdf della X nel punto di progetto.

Consideriamo la distribuzione di H_{si} data in Tabella 1: essa è una variabile di Gumbel con

$\mu_H = 5.9$; $\sigma_H = 0.8$ m, ovvero:

$F(H) = \exp(\exp(-(H-a)/b))$; con $b = \sigma_H/1.28$, $a = \mu_H - 0.577b$; $f(H) = F'(H)$

La trasformazione di una qualsiasi distribuzione può essere fatta calcolando le:

$\sigma_{X1} = \phi(\Phi^{-1}(F(H, \mu_H, \sigma_H))) / f(H, \mu_H, \sigma_H)$

$\mu_{X1} = H - \sigma_{X1} \Phi^{-1}(F(H, \mu_H, \sigma_H))$

e ponendo:

$Z_1 = (H_{si} - \mu_{X1}) / \sigma_{X1}$

Per $H = \mu_H = 5.9$ m si ricava $\sigma_{X1} = 0.77$; $\mu_{X1} = 5.76$ m; si noti che $\mu_H \neq \mu_{X1}$ perché la Gumbel non è simmetrica.

La trasformazione della variabile q_{lim} è analoga. Nel caso di h_w , gaussiana, è necessario operare solo la normalizzazione: $Z_3 = (h_w - \mu_{hw}) / \sigma_{hw}$

3 - calcolare $(\partial g / \partial Z_i)$ nel punto di progetto.

Sostituendo le variabili, la funzione di collasso diventa:

$g = (\sigma_{X1} Z_1 + \mu_{X1}) - \sqrt{(g(\sigma_{X2} Z_2 + \mu_{X2}))^3} \cdot 0.082 \exp(-(3(7.2 - (\sigma_{X3} Z_3 + \mu_{X3})) / (\sigma_{X2} Z_2 + \mu_{X2})))$

Le $(\partial g / \partial Z_i)$ possono essere facilmente calcolate analiticamente e consentono la stima del gradiente della funzione di collasso;

4 - calcolare $\alpha_i = -(\partial g / \partial Z_i) / K$, dove $K = [\sum (\partial g / \partial Z_i)^2]^{0.5}$

Le sensitività α_i sono i coseni direttori del punto di progetto, di lunghezza β e direzione α_i

5 - calcolare β risolvendo $g(\sum \beta \alpha_i) = 0$

Questa condizione impone che il punto di progetto appartenga alla curva limite $g=0$

6 - calcolare $P_f = \Phi(-\beta) = \Phi(-\mu_g / \sigma_g)$

I passi 2-6 vanno ripetuti sino a che il punto di progetto converge, in modo da trovare uno dei minimi della funzione distanza dall'origine. Si parte poi da altri punti iniziali se si teme che la funzione possa avere più minimi.

La Tabella 3 riassume il risultato delle operazioni delineate nei precedenti passi 1+6 in modo da consentire il controllo dei calcoli svolti. Il risultato finale differisce leggermente da quanto trovato nella sezione precedente a causa delle ulteriori approssimazioni fatte.

Tabella 3 - Risultato del calcolo (affidabilità meccanismo di trascinamento) eseguito con le operazioni 1+6, dove X_1 è la variabile altezza d'onda, trasformata in gaussiana, X_2 è la portata, X_3 è la marea (già gaussiana).

Quantità	V. atteso	1ª Iterazione	2ª Iterazione	...	6ª Iterazione	7ª
$\sigma_{X1} = \phi(\Phi^{-1}(F(x'))) / f(x')$		0.77 m	0.81 m		1.40 m	=
$\mu_{X1} = x' - \sigma_{X1} \Phi^{-1}(F(x'))$		5.76 m	5.75 m		5.09 m	=
$\sigma_{X2} = \phi(\Phi^{-1}(F(x'))) / f(x')$		225 l/s/m	41 l/s/m		131 l/s/m	=
$\mu_{X2} = x' - \sigma_{X2} \Phi^{-1}(F(x'))$		450 l/s/m	222 l/s/m		404 l/s/m	=
$\alpha_i = -(\partial g / \partial Z_i) / K$		[.21; -.98; .03]	[.81; -.56; .11]		[.85; -.51; .08]	=
$g(\beta \alpha_i) = 0$ fornisce $\beta =$		1.66	1.89		2.11	=
$P_f = \Phi(-\beta)$		4.8%	3.0%		1.7%	=
$Z_i = \beta \alpha_i$	[0;0;0]	[.34; -1.6; .06]	[1.5; -1.1; .21]		[1.8; -1.1; .17]	=
$H_d(\text{inc}) = \sigma_{X1} Z_1 + \mu_{X1}$	5.90 m	6.03 m	7.00 m		7.610 m	=
$Q_d = \sigma_{X2} Z_2 + \mu_{X2}$	540 l/s/m	84 l/s/m	179 l/s/m		261 l/s/m	=
$h_w = \sigma_{X3} Z_3 + \mu_{X3}$	0.30 m	0.31 m	0.34 m		0.33 m	=

Esempio di analisi di livello III

Obiettivo di questo paragrafo è illustrare un esempio di integrazione esatta della eq. 2, ovvero illustrare un esempio di analisi di Livello III di tipo analitico.

Si riesamina il meccanismo di tracimazione del un molo a parete verticale per stimare la vulnerabilità del molo nei confronti della percorribilità sul coronamento in sicurezza. Nello specifico si vuole valutare la probabilità che, assegnato un qualsiasi stato di mare, una persona presente sul coronamento della diga foranea di Genova Voltri possa cadere per effetto della tracimazione ondosa. Quando il carico nei riguardi del quale ci si vuole cautelare è assegnato, la affidabilità prende il nome di vulnerabilità. La vulnerabilità di una struttura è qui intesa come la sua probabilità di collasso per un particolare scenario di carico.

In Franco et al. (1994) sono presentati i risultati di prove sperimentali eseguite (anche) su un molo a parete verticale, tese a quantificare la probabilità che una persona sia scaraventata a terra a causa di un'onda tracimata di volume noto. In Figura 15 i dati sperimentali sono stati adattati ad una curva tratteggiata, che esprime la funzione $1-cdf_C(V)$, dove per $cdf_C(V)$ si intende la probabilità di cadere per un'onda di volume minore od uguale a V .

In Franco e Franco (1999), è proposta una funzione che valuta la probabilità che, durante uno stato di mare, sia superato un determinato volume. In Figura 15, linea continua, è riportata la curva $pdf_T(V|H_{s0})$, dove per $pdf_T(V|H_{s0})$ si intende la funzione densità di probabilità che si manifesti un'onda di volume pari a V , assegnati uno stato di mare (nel caso specifico $H_{s0}=3\text{m}$, $s_{op}=3.5\%$) e l'altezza del coronamento del molo a parete verticale rispetto al medio mare ($R_c=8.5\text{m}$).

Questi elementi sono sufficienti alla valutazione esatta della probabilità di camminare in banchina in sicurezza. A questo punto è immediato calcolare la probabilità di caduta attraverso una semplice integrazione numerica della eq. 8 sulla base delle suddette funzioni $cdf_C(V)$ e $pdf_T(V|H_{s0})$, ottenendo una probabilità di collasso $P_{\bar{f}}=2\%$.

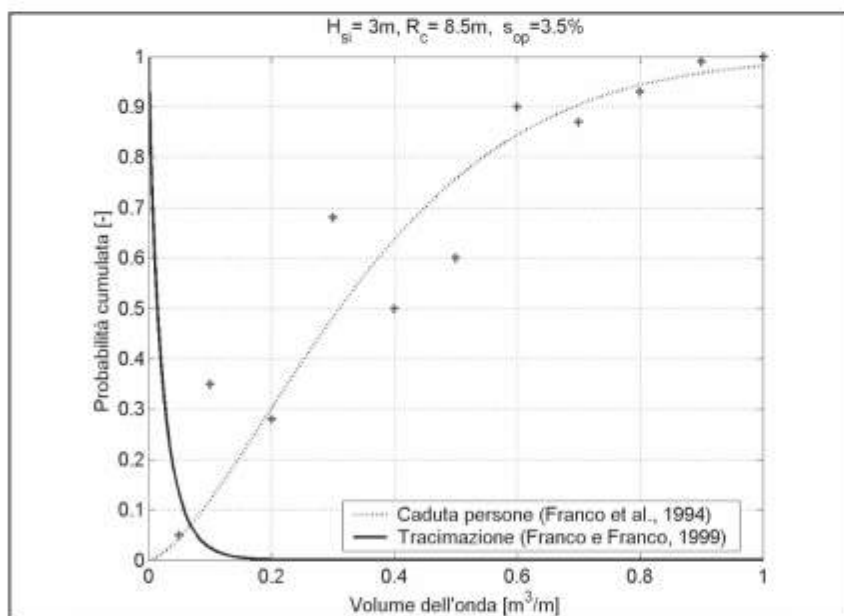


Figura 15 - Curve $cdf_C(V)$ (ottenuta adattando i dati di letteratura presentati con il segno '+') e $pdf_T(V|H_{s0})$. Sulla base dell'eq. 8 è possibile calcolare la vulnerabilità alla caduta.

Conclusioni

La nota ha delineato brevemente i principali metodi di analisi di affidabilità, al fine di evidenziarne le caratteristiche e promuoverne l'utilizzo. L'approccio probabilistico, rispetto all'approccio deterministico, consente di stimare l'effetto delle incertezze di variabili, formule e modelli assunti.

È stato sviluppato un esempio applicativo relativo alla stabilità del molo a parete verticale di Genova Voltri attraverso un'analisi di livello II. Il calcolo si basa sulle derivate della funzione di collasso rispetto alle variabili in gioco.

I metodi probabilistici consentono una ottimizzazione dei parametri di progetto mirata alla probabilità di collasso ammessa nel tempo di vita: è stato fornito un esempio di quale sia l'effetto di un innalzamento del coronamento di una diga a cassoni in termini di probabilità di collasso.

I metodi probabilistici di livello II evidenziano la vulnerabilità dell'opera nei confronti delle diverse variabili: è stato visto l'opposto ruolo giocato dalle variabili marea e ripidità dell'onda in relazione a tracimazione e scorrimento.

Infine è stato approfondito un aspetto legato alla sicurezza del transito pedonale sulla sovrastruttura del molo attraverso un'analisi di livello III. L'applicazione presentata ha evidenziato oggettivamente una carenza nella possibilità di valutare in termini probabilistici il collasso per tracimazione: sarebbe auspicabile riuscire a definire una curva di danno alla struttura per tale fenomeno, analogamente a quanto ricavato da Franco et al. (1994) sulla incolumità delle persone.

Bibliografia

- Borgman L.E., J. Niedzwecki N.W., Scheffner J.W. Kern e Petrakos M. (2007) - *Statistical analysis of ocean waves and other environmental data*. Advanced Series in Ocean Eng., World Scientific, 450 (ca), in press.
- Burcharth H.F. (1992) - *Reliability evaluation of a structure at sea*. Short Course on Design and Reliability of Coastal Structures 23rd ICCE '92, 1-3 Ottobre 1992, Venezia, pp. 597-644.
- Castillo C., Mínguez R., Castillo E. e Losada M.A. (2006) - *An optimal engineering design method with failure rate constraints and sensitivity analysis. Application to composite breakwaters*. Coastal Engineering, 53: 1-25.
- Chen W.F. e Liu X.L. (1990) - *Limit state analysis in soil mechanics*. Vol. 52. Elsevier Science Publishers
- Christiani E. (1997) - *Application of Reliability in Breakwater Design*. Ph. D. thesis, Hydraulic and Coastal Engineering Laboratory, Department of Civil Engineering, Aalborg University, Series Paper n.14.
- Colamussi A. (1992) - *Venice high water barrier problems analysis and design approach*. Short Course on Design and Reliability of Coastal Structures 23rd ICCE '92, 1-3 ottobre 1992, Venezia, pp. 645-667.
- Consiglio Superiore LL.PP. e CNR (1996) - *Istruzioni tecniche per la progettazione delle dighe marittime*. Pubblicazione CNR-GNDICI.
- De Girolamo P., Noli A., Contini P., Mondini F., Beltrami G.M. e L. Franco (2000) - *Risk analysis in coastal-systems planning and management*, Excerpta, CUEN Ed., ristampa 2004: 257-271.
- Ditlevsen O. (1979) - *Generalized second-moment reliability index*. J. Struct. Mech., 7: 435-451.
- Ditlevsen O. (1979a) - *Narrow Reliability Bounds for Structural Systems*. Journ. of Struct. Mech., Vol. 7, No. 4.
- Franco C. e Franco L. (1999) - *Overtopping formulas for caisson breakwaters with nonbreaking 3D waves*. J. Wtrwy, Port, Coast., and Oc. Engng., ASCE, 125: 98-107.
- Franco L. (1994) - *Vertical breakwaters: the Italian experience*, Coastal Engineering, 22: 31-55.
- Franco L., Lamberti A., Noli A. e Tomasicchio U. (1986) - *Evaluation of Risk applied to the designed breakwater of Punta Riso at Brindisi, Italy*. Coastal Engineering, 10: 169-191.
- Gollwitzer S., Zverev A., Cuntze R. e Grimmelt M. (1994) - *Structural reliability applications in aerospace engineering*. Proc. ICOSSAR'93, August 9-13, 1993, Innsbruck, Austria, A.A. Balkema, Rotterdam, pp. 1265-1272.
- Hasofer A. M. e Lind N.C. (1974) - *Exact and invariant second-moment code format*. J. Eng. Mech. Div., ASCE, 100, 1: 111-121.
- Hohenbichler M. e Rackwitz R. (1981) - *Non-Normal Dependent Vectors in Structural Safety*, J. Eng. Mech. Div., ASCE, 1981, 107: 1227-1249.
- Hohenbichler M. e Rackwitz R. (1988) - *Improvement of second order reliability estimates by Importance Sampling*, J. Eng. Mech. Div., ASCE, 114, 12: 2195-2199.
- Kottogoda N.T. e Rosso R. (1997) - *Statistics, Probability and Reliability Methods for Civil and Environmental Engineers*. Mc Graw Hill.
- Lamberti A. (1992) - *Example application of reliability assessment of coastal structures*. Short Course on Design and Reliability of Coastal Structures 23rd ICCE '92, 1-3 ottobre 1992, Venezia, pp. 669-698.
- Leira B.J., Holmås T. e Herfjord K. (2005) - *Application of response surfaces for reliability analysis of marine structures*. Reliability Engineering & System Safety, Volume 90, Issues 2-3, November-December 2005, pp. 131-139.

- Liu P.-L. e Der Kiureghian A. (1991) - *Optimization algorithms for structural reliability*. Structural Safety, 9(3): 161-178.
- Madsen H.O. (1988) - *PROBAN: Theoretical Manual for External Release*. Technical Report No 88-2005, AS Veritas, Oslo, Norway.
- Madsen H.O., Krenk S. e Lind N.C. (1986) - *Methods of Structural Safety*. Englewood Cliffs, N.J., USA. Prentice Hall.
- Martinelli L. (1998) - *Risk Analysis of a Vertical Breakwater Subjected to Breaking Waves: the Case of Genoa Voltri*. Ph.D. thesis, DISTART, Ingegneria Idraulica, Università di Bologna, 31 October 1998.
- Millwater H.R., Wu Y.-T., Dias J.B., McClung R.C., Raveendra S.T., Thacker B.H. (1990) - *The NESSUS Software System for Probabilistic Structural Analysis*, A.H-S. Ang et al. (eds.): Structural Safety and Reliability, ASCE, New York, N.Y., Vol III, pp. 2283 - 2290.
- Oumeraci H., Kortenhuis A., Allsop N.W.H., De Groot M., Crouch R., Vrijling J.K. e Voortman H.G. (2001) - *Probabilistic design tools for Vertical breakwaters*. Balkema, Rotterdam.
- Passoni G., Rigoni A. e Franco L. (1997) - *Risk Analysis of the Vertical Offshore Breakwater at Gela, Italy*. Proc. ISOPE, IV, pp. 153-159, Honolulu, Hawaii.
- Rackwitz R. (2001) - *Reliability analysis - a review and some perspectives*. Structural Safety, 23: 365 - 395.
- Ruol P. e Martinelli L. (2007) - *Stima dell'affidabilità di opere marittime: un caso esemplificativo*, Giornate Italiane di Ingegneria Costiera. Civitavecchia, 23-25 Nov. 2005, pubblicato su CD, Maggio 2007.
- Takahashi S. (1996) - *Design of vertical breakwaters*. Short course attached to 25th ICCE, Orlando, Florida.
- Tomasicchio U. (1998) - *Manuale di Ingegneria Portuale e Costiera*. Ed. BIOS - Cosenza.
- Van der Meer J.W., D'Angremond K. e Juhl J. (1994) - *Uncertainty on Goda Formula*. Proc. 24th ICCE, Kobe.
- Vreugdenhil C.B. (2006) - *Appropriate models and uncertainties*. Coastal Engineering, 53: 303-310.

Ricevuto il 31/05/2007, accettato il 15/11/2007.

Espressione analitica della formula di Hsu ed Evans per baie in equilibrio statico

Mario Mita

via Giuseppe Allievo, 63 - 00135 Roma
Tel./Fax 063241419, Email: mario_mita@fastwebnet.it

Riassunto

Nella presente memoria viene proposta una modifica dell'espressione analitica fornita da Hsu ed Evans per baie in equilibrio statico. L'espressione proposta rispetta la "condizione di intaccatura" della baia ricavata sperimentalmente da Hsu et al. (1989a, 1989b) e risulta quindi corretta dal punto di vista teorico.

Parole chiave: baia in equilibrio, angolo critico, rapporto di intaccatura.

Abstract

This paper presents a modification of Hsu and Evans equation of bayed beaches in static equilibrium. The proposed equation accounts for the bayed beach "indentation ratio", which has been determined from both model tests and prototype bays by Hsu et al. (1989a, 1989b), and so it results theoretically correct.

Keywords: bayed beach in equilibrium, critical angle, indentation ratio.

Premessa

La conformazione a spirale assunta da una baia dipende essenzialmente dalla posizione dei capi rocciosi (o delle opere marittime) che la delimitano, dall'apporto di materiale solido sedimentario e dal moto ondoso incidente.

A partire dalla descrizione della forma delle baie effettuata da Krumbein (1947), Silvester (1970) ha osservato che le baie in equilibrio statico (spiagge con trasporto solido netto nullo) o dinamico (spiagge con trasporto solido netto uniforme) assumono una forma caratteristica che dipende unicamente dalla posizione dei capi che la delimitano e dalla direzione delle onde incidenti predominanti.

Numerose esperienze di campo e su modello fisico sono state eseguite considerando diverse altezze e lunghezze d'onda e diversa natura e dimensione del sedimento costituente la spiaggia, senza individuare alcuna influenza sulla forma assunta dalla baia in equilibrio.

Non è stata ancora individuata una relazione che fissi l'esatta posizione del centro della spirale sebbene tale punto sia localizzato in prossimità dell'estremità del capo roccioso.

Per individuare la conformazione di equilibrio assunta da una baia, Silvester ha introdotto un parametro adimensionale denominato "rapporto di intaccatura" (*indentation ratio*), che deve assumere determinati valori in funzione della direzione delle onde incidenti predominanti e della posizione dei capi che delimitano la baia.

In sostituzione all'espressione della spirale logaritmica proposta da Silvester (1970), Hsu ed Evans (1989) hanno presentato un'equazione polinomiale del secondo ordine, basata su tre parametri sperimentali determinati da misure di campo e modelli fisici sperimentali.

Tan e Chew (1994) hanno osservato che l'equazione della spirale proposta da Hsu ed Evans non rispetta alcune condizioni teoriche dell'espressione originaria di Hsu e Silvester (1987) e hanno suggerito un'equazione polinomiale del secondo ordine basata su un solo parametro sperimentale.

L'equazione proposta in questo articolo esprime il parametro sperimentale di Tan e Chew, mediante l'espressione del rapporto di intaccatura della baia in equilibrio ricavata sperimentalmente da Hsu et al. (1989a, 1989b).

Formulazioni precedenti dell'espressione della forma di una baia in equilibrio statico

Con riferimento alla Figura 1 si indica con:

- F il punto di diffrazione, centro della spirale;
- P_0 il punto della linea di costa il cui orientamento è parallelo alla direzione delle creste d'onda;
- β l'angolo formato dalle creste delle onde persistenti sul litorale con la retta che congiunge il punto di diffrazione F con il punto P_0 ;
- R_0 la distanza fra il punto F e il punto P_0 ;
- P il punto generico sulla linea di riva;
- θ l'angolo formato dalla direzione delle creste d'onda con il segmento FP;
- R la distanza tra il generico punto P e il punto di diffrazione F;
- P_c il punto critico in cui la retta tangente alla baia in equilibrio è parallela al segmento FP_0 ;
- a la distanza fra la retta passante per F e P_0 e la retta passante per P_c parallela al segmento FP_0 stesso;
- θ_c l'angolo formato dalla direzione delle creste d'onda con il segmento FP_c ;
- R_c la distanza tra il punto P_c e il punto di diffrazione F;
- $(\theta_c - \beta)$ l'angolo critico;
- a/R_0 rapporto di intaccatura di una spiaggia in equilibrio.

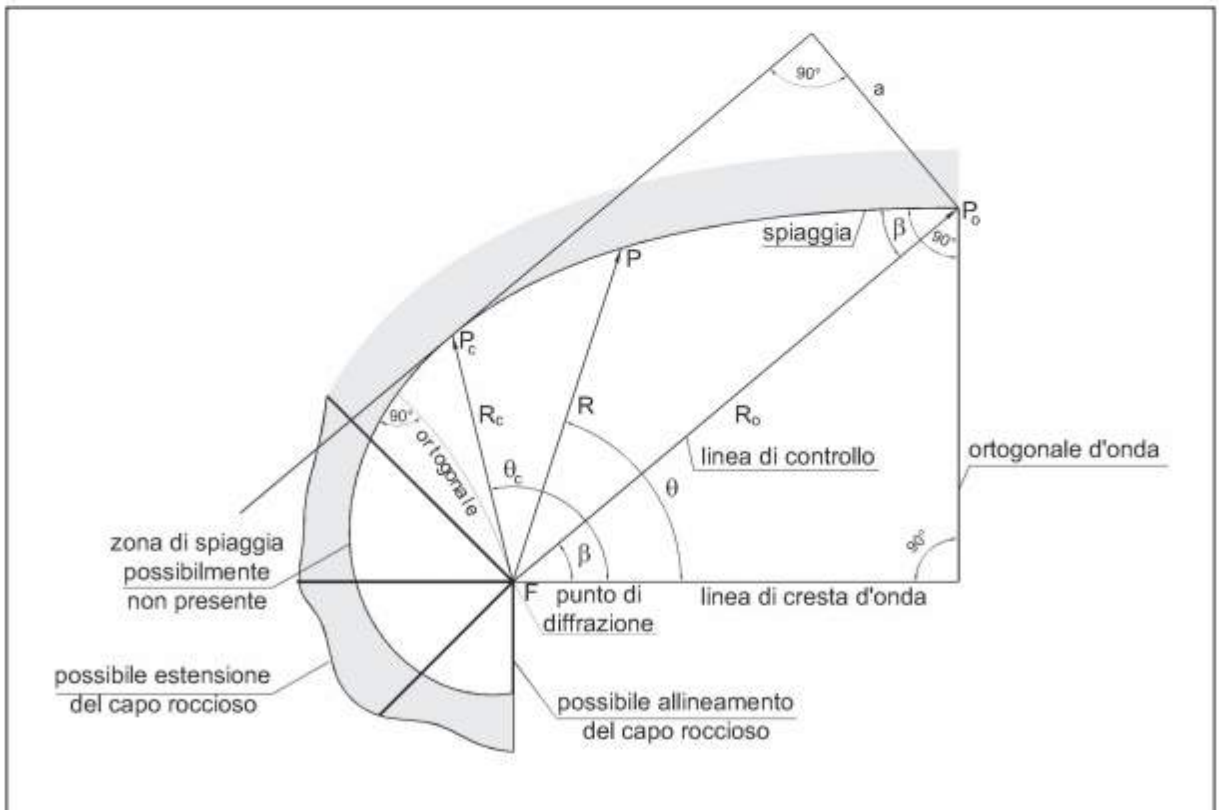


Figura 1 - Forma della spiaggia in equilibrio secondo Silvester.

L'approccio suggerito Hsu e Silvester (1987) si basa sull'osservazione che la forma delle baie in equilibrio statico o dinamico delimitate da un capo roccioso o da un'opera marittima dipende unicamente dall'angolo β e dalla distanza R_o .

Inoltre Hsu e Silvester hanno osservato che il rapporto di intaccatura di una spiaggia e l'angolo critico sono funzioni unicamente dell'angolo β . In particolare hanno ricavato che l'angolo θ_c è funzione lineare di β secondo l'espressione:

$$\theta_c = \theta_{co} + m \beta = 63^\circ + 1.04\beta \quad 1)$$

con θ_{co} il valore dell'angolo θ_c per $\beta = 0$ e m coefficiente angolare.

Hsu ed Evans (1989), esaminando una serie di baie in equilibrio sulle coste giapponesi ed australiane ed esaminando i risultati ottenuti in vasca su modello fisico da Ho (1971), nell'ipotesi di esprimere in coordinate polari la forma della linea di riva delle baie in equilibrio con una relazione parabolica, hanno ricavato l'espressione:

$$R/R_o = f(\beta/\theta) = C_0 + C_1(\beta/\theta) + C_2(\beta/\theta)^2 \quad 2)$$

in cui C_0 , C_1 e C_2 sono tre coefficienti funzioni anch'essi dell'angolo β .

In base ai dati di misura disponibili Hsu, Silvester e Xia (1989b) hanno determinato il valore dei coefficienti $C_0=C_0(\beta)$, $C_1=C_1(\beta)$ e $C_2=C_2(\beta)$ come riportato in forma grafica in Figura 2.

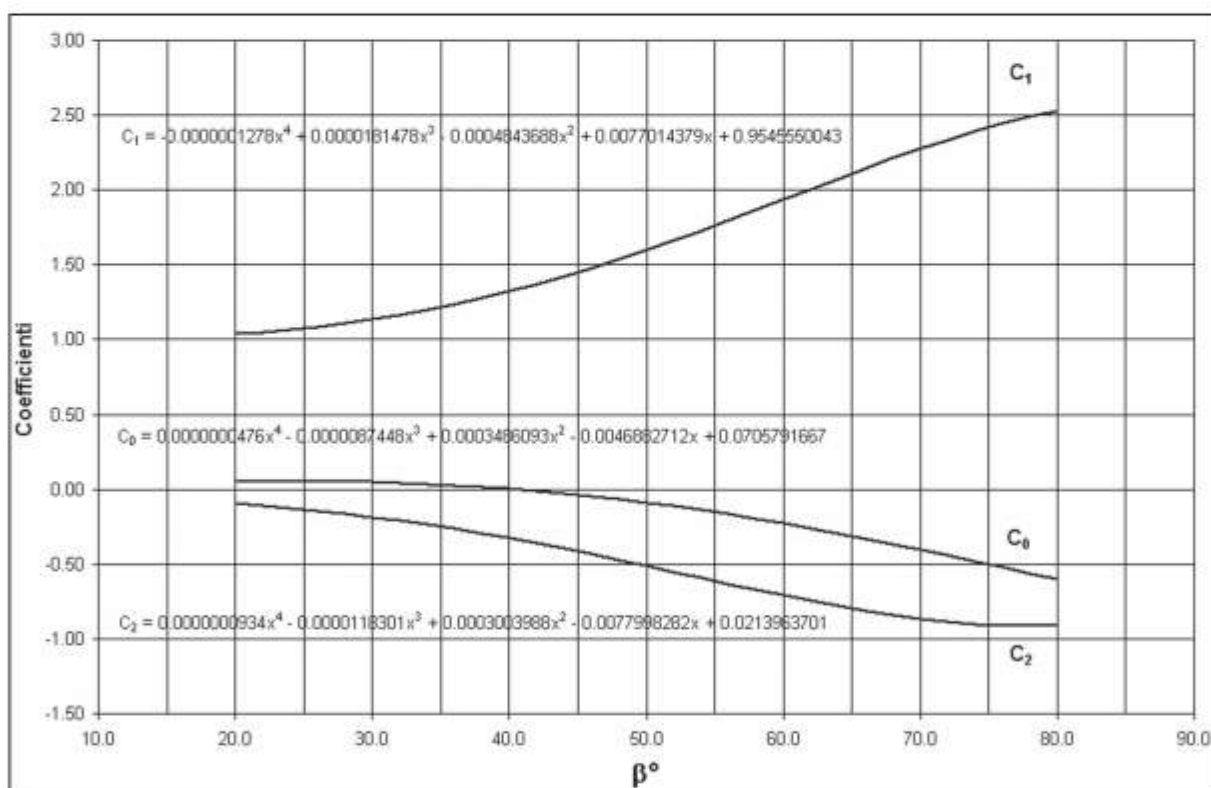


Figura 2 - Valore dei coefficienti C_0 , C_1 e C_2 secondo Hsu, Silvester e Xia (1989b).

In Figura 3 sono riportate le curve per θ costante ottenute da Hsu ed Evans con il valore dei coefficienti da loro determinati.

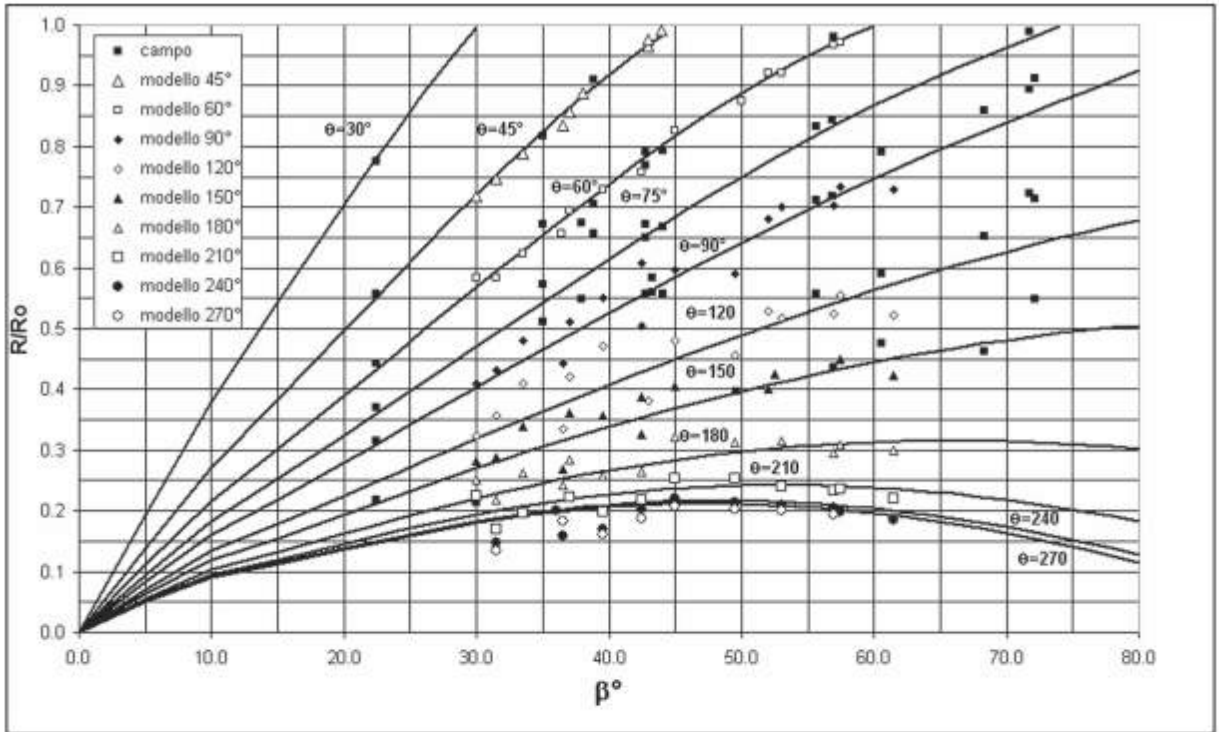


Figura 3 - Dati sperimentali e curve proposte da Hsu ed Evans (1989) per θ -cost in funzione dell'angolo β .

Tan e Chiew (1994) hanno osservato che utilizzando i valori dei coefficienti proposti da Hsu ed Evans non sono rigorosamente rispettate le condizioni teoriche valide nel punto P_o (per $\theta=\beta$) ovvero:

$$C_0 + C_1 + C_2 = 1 \quad (3)$$

$$C_1 + 2 C_2 = \beta \cotg(\beta) \quad (4)$$

dove la prima equazione esprime la condizione che $R=R_o$ nel punto P_o , mentre la seconda esprime la condizione di parallelismo tra le creste d'onda e la tangente alla curva nel punto P_o .

Tan e Chiew (1994), sostituendo le equazioni (3) e (4) nella (2) ed esplicitando rispetto a C_2 , hanno ricavato l'espressione:

$$R/R_o = [1 - \beta \cotg(\beta) + C_2] + [\beta \cotg(\beta) - 2C_2] (\beta/\theta) + C_2 (\beta/\theta)^2 \quad (5)$$

con $C_2 = f(\beta)$. L'espressione di $C_2 = C_2(\beta)$ è stata ricavata interpolando i dati sperimentali di Hsu ed Evans, ottenendo la relazione:

$$\log(0.277 - C_2) = \beta - 1.105 \quad (6)$$

I valori dei coefficienti $C_0=C_0(\beta)$, $C_1=C_1(\beta)$ e $C_2=C_2(\beta)$ ricavati da Tan e Chiew sono riportati in forma grafica in Figura 5, mentre nella Figura 6 sono riportate le curve per θ -cost ottenute con i valori così ricavati.

Confrontando le curve per θ -cost ottenute da Hsu ed Evans (Fig. 3) con quelle ricavate da Tan e Chiew (Fig. 5) si nota che estrapolando le curve per $\lim \beta \rightarrow 0$ risulta:

- per Hsu ed Evans $R/R_o = 0.00$
- per Tan e Chiew $R/R_o = 0.20$

Inoltre confrontando le due figure si evince che le curve di Hsu ed Evans si adattano meglio ai valori sperimentali soprattutto per valori di θ elevati e per valori di β piccoli (vedi ad es. i dati del prototipo di Ho $\beta=22,5^\circ$) ed elevati.

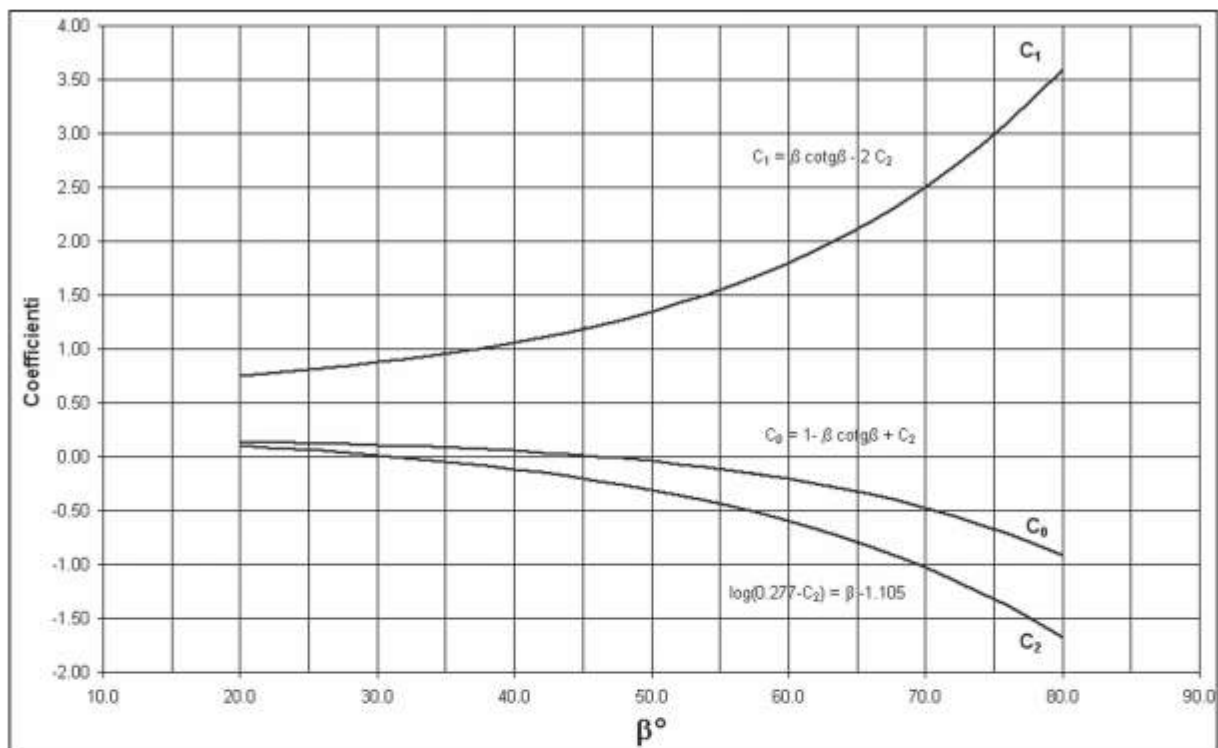


Figura 4 - Valore dei coefficienti C_0 , C_1 e C_2 secondo Tan e Chiew.

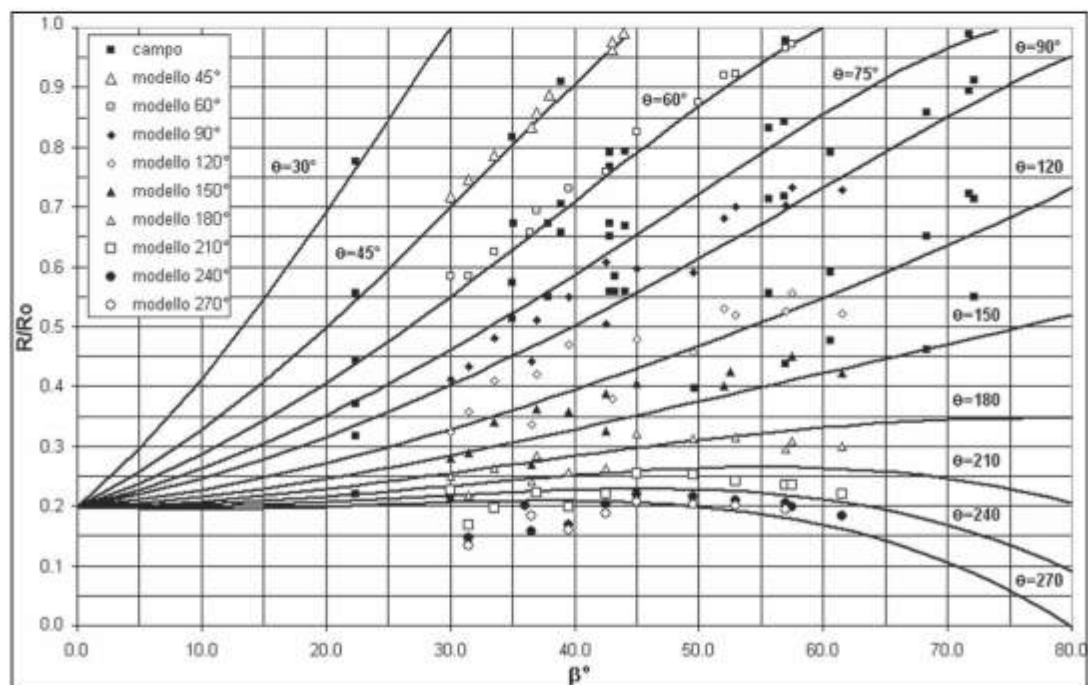


Figura 5 - Dati sperimentali e curve proposte da Tan e Chiew (1994) per θ -cost in funzione dell'angolo β .

In realtà i coefficienti di Hsu ed Evans e quelli di Tan e Chiew dovrebbero soddisfare anche l'equazione (1) dell'angolo critico.

In questo articolo si descrive la procedura seguita per determinare analiticamente la funzione $C_2=C_2(\beta)$ che soddisfa tale condizione.

Espressione analitica del coefficiente C_2 in base all'angolo critico.

Per determinare l'espressione di $C_2=C_2(\beta)$ che soddisfi la condizione (1) del valore dell'angolo critico si definiscono le funzioni:

$$\omega = \theta_c/\beta \quad (7)$$

$$\psi = \beta \cotg(\beta) \quad (8)$$

$$\chi = \theta_c \cotg(\theta_c - \beta) \quad (9)$$

La condizione di tangenza alla curva per $\theta=\theta_c$ è espressa dalla (24) di Appendice, che con l'uso delle funzioni sopra definite può anche essere scritta come:

$$\omega f'(\beta/\theta) = \omega^2 (R/R_0) \chi \quad \text{per } \theta=\theta_c \quad (10)$$

Essendo:

$$f'(\beta/\theta) = C_1 + 2C_2 (\beta/\theta_c) \quad \text{per } \theta=\theta_c \quad (11)$$

sostituendo la (11) e la (2) nella (10) risulta:

$$C_1 \omega + 2C_2 = (C_0 \omega^2 + C_1 \omega + C_2) \chi \quad (12)$$

Dovendo essere per la (4):

$$C_1 = \psi - 2C_2 \quad (13)$$

e per la (3) esprimendo C_1 con la (13):

$$C_0 = 1 - \psi + C_2 \quad (14)$$

Sostituendo la (14) e la (13) nella (12) dopo alcuni passaggi risulta:

$$C_2 = [\chi(\psi-1) \omega^2 - \psi(\chi-1) \omega] / [\chi \omega^2 - 2(\chi-1)\omega + (\chi-2)] \quad (15)$$

Sostituendo nella (14) e nella (13) la (15), sostituendo poi nella (2) le espressioni dei tre coefficienti così ricavate con le notazioni (7), (8) e (9) ed esprimendo θ_c con la (1) si ottiene l'espressione analitica della funzione R/R_0 per valori di dell'angolo β fissati come polinomio di secondo grado in (β/θ) , qui non riportata per motivi di sintesi.

Risultati

I valori dei coefficienti $C_0=C_0(\beta)$, $C_1=C_1(\beta)$ e $C_2=C_2(\beta)$ ricavati utilizzando le espressioni (14), (13) e (15) sono riportati in forma numerica in Tabella I ed in forma grafica in Figura 6.

In Figura 7 si riportano insieme ai dati sperimentali di Hsu ed Evans anche le curve per $\theta=\text{cost}$ ottenute utilizzando le espressioni (14), (13) e (15).

Dall'analisi della Figura 7 si nota che:

- per \lim di $\beta \rightarrow 0$ risulta $R/R_0 = 0.00$, come per le curve di Hsu ed Evans di Figura 3;
- le curve per $\theta=\text{cost}$ sono sempre crescenti anche per $\theta > 150^\circ$.

Tabella 1 - Valori dei coefficienti C_0 , C_1 e C_2 che soddisfano le condizioni delle baie in equilibrio per diversi valori di β .

β	C_0	C_1	C_2	R/Ro per $\theta=\beta$	α per $\theta=\beta$	θ_c
20	0.08539	0.87016	0.04444	1.000	20.0	83.80
22	0.08524	0.87915	0.03561	1.000	22.0	85.88
24	0.08409	0.89101	0.02491	1.000	24.0	87.96
26	0.08195	0.90570	0.01235	1.000	26.0	90.04
28	0.07884	0.92321	-0.00206	1.000	28.0	92.12
30	0.07477	0.94356	-0.01833	1.000	30.0	94.20
32	0.06971	0.96678	-0.03649	1.000	32.0	96.28
34	0.06367	0.99289	-0.05656	1.000	34.0	98.36
36	0.05662	1.02196	-0.07858	1.000	36.0	100.44
38	0.04853	1.05405	-0.10258	1.000	38.0	102.52
40	0.03939	1.08923	-0.12861	1.000	40.0	104.60
42	0.02915	1.12758	-0.1567..	1.000	42.0	106.68
44	0.01778	1.16920	-0.18699	1.000	44.0	108.76
46	0.00525	1.21419	-0.21944	1.000	46.0	110.84
48	-0.00848	1.26264	-0.25416	1.000	48.0	112.92
50	-0.02346	1.31467	-0.29121	1.000	50.0	115.00
52	-0.03974	1.37041	-0.33067	1.000	52.0	117.08
54	-0.05736	1.42997	-0.37261	1.000	54.0	119.16
56	-0.07638	1.49351	-0.41713	1.000	56.0	121.24
58	-0.09685	1.56116	-0.46430	1.000	58.0	123.32
60	-0.11884	1.63307	-0.51424	1.000	60.0	125.40
62	-0.14239	1.70942	-0.56703	1.000	62.0	127.48
64	-0.16759	1.79038	-0.62279	1.000	64.0	129.56
66	-0.19449	1.87612	-0.68163	1.000	66.0	131.64
68	-0.22318	1.96686	-0.74367	1.000	68.0	133.72
70	-0.25373	2.06279	-0.80906	1.000	70.0	135.80
72	-0.28622	2.16414	-0.87792	1.000	72.0	137.88
74	-0.32075	2.27116	-0.95041	1.000	74.0	139.96
76	-0.35741	2.38409	-1.02669	1.000	76.0	142.04
78	-0.39629	2.50322	-1.10693	1.000	78.0	144.12
80	-0.43751	2.62882	-1.19131	1.000	80.0	146.20

È significativo osservare che le espressioni dei coefficienti della curva ora proposta sono state ricavate indipendentemente dai dati sperimentali utilizzati da Hsu ed Evans, sebbene interpolino tali punti. Nelle formule proposte sono stati invece utilizzati i dati sperimentali che hanno condotto Hsu et al. a determinare l'espressione dell'angolo θ_c in funzione di β . Infatti gli unici dati sperimentali utilizzati per ricavare l'espressione di C_2 sopra riportata sono i valori dell'angolo $\theta_{co}=63^\circ$ e del coefficiente angolare $m=1.04$ della (1), ricavati dagli stessi Hsu et al.

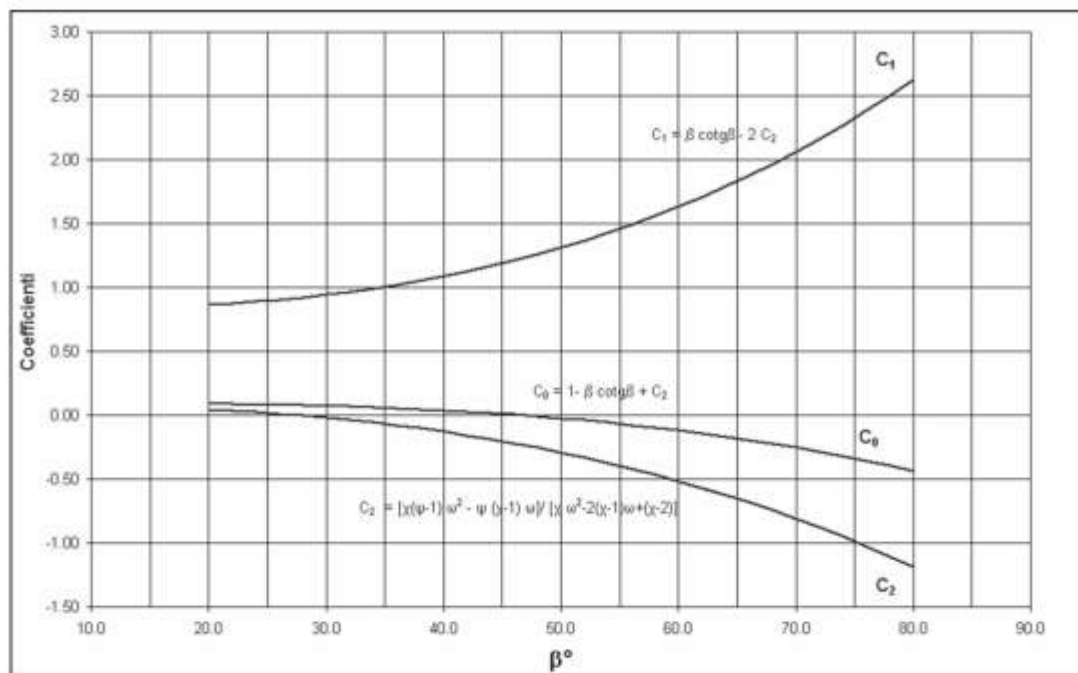


Figura 6 -Valore dei coefficienti C_0 , C_1 e C_2 che soddisfano le condizioni analitiche nel punto P_o e nel punto P_c .

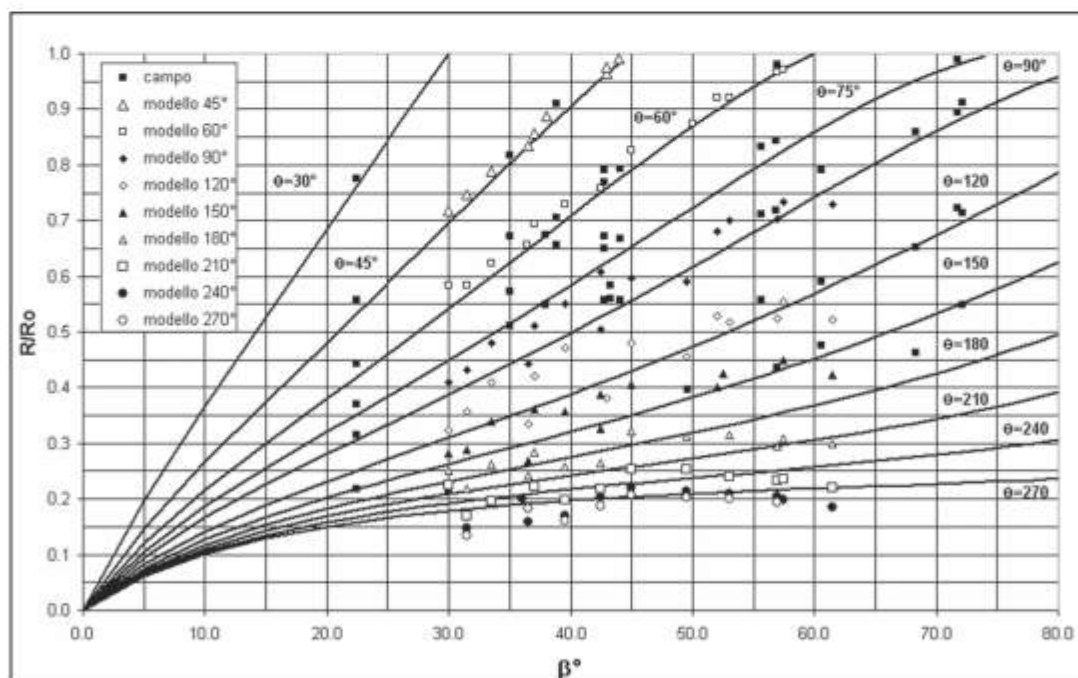


Figura 7 - Dati sperimentali e curve analitiche del polinomio di secondo grado per $\theta = \text{cost}$ in funzione dell'angolo β che soddisfano le condizioni analitiche nel punto P_o e nel punto P_c .

Rapporto di intaccatura

Per le applicazioni ingegneristiche, al fine di individuare la conformazione d'equilibrio di una spiaggia, Silvester (1970) ha suggerito di utilizzare il metodo del rapporto di intaccatura.

Il metodo può essere utilizzato per verificare l'instabilità della spiaggia anche senza tracciare la curva di equilibrio. Esso consiste nel misurare il rapporto di intaccatura e confrontarlo con quello della spiaggia di equilibrio. Se il rapporto di intaccatura è minore di quello di equilibrio la spiaggia risulta instabile.

Silvester ha osservato che il rapporto di intaccatura di una baia in equilibrio dipende unicamente dal valore dell'angolo β .

Infatti dalla Figura 1 si evince che il rapporto di intaccatura è legato al valore dell'angolo critico dalla relazione:

$$a/R_0 = \text{sen}(\theta_c - \beta) R_c / R_0 \quad (16)$$

$$\text{con } R_c/R_0 = f(\theta_c/\beta) \text{ e } \theta_c = f(\beta)$$

In base ai dati sperimentali su modello di Ho (1971) e a misure di campo di Vichetpan (1969) Silvester ha proposto i valori del rapporto di intaccatura di una baia in equilibrio riportati in Figura 8 (Hsu, Silvester e Xia, 1987).

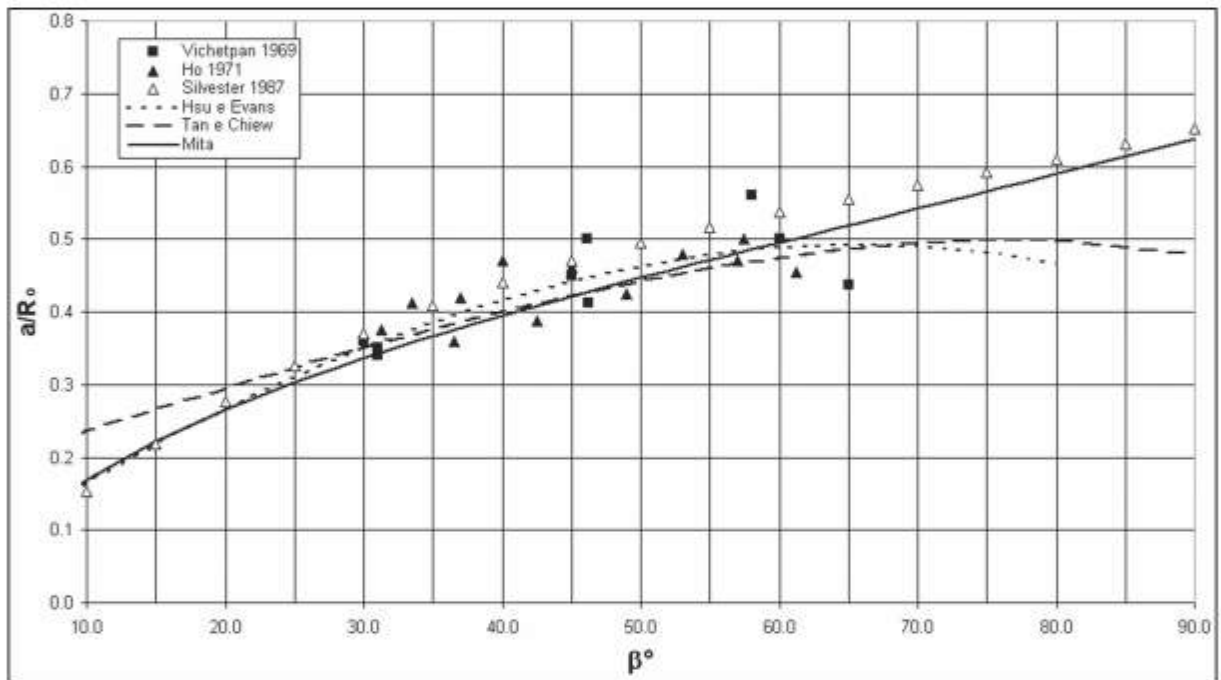


Figura 8 - Rapporto di intaccatura a/R_0 di una baia in equilibrio in funzione di β° per le diverse curve teoriche.

Esprimendo la (16) utilizzando le equazioni (1) e (2) con i valori dei coefficienti proposti da Hsu ed Evans, da Tan e Chiew e da questo articolo si ottengono le curve di Figura 8.

Dall'esame della figura si evince che con i valori dei coefficienti proposti da Tan e Chiew il rapporto di intaccatura si discosta maggiormente da quello proposto da Silvester per valori di $\beta < 25^\circ$ e $\beta > 50^\circ$.

La curva che meglio interpola i valori proposti da Silvester nell'intero intervallo $10^\circ < \beta < 90^\circ$ risulta quella calcolata con i valori dei coefficienti proposti in questo articolo.

Conclusioni

E' stata analizzata l'equazione parabolica in (β/θ) di Hsu ed Evans che fornisce la forma assunta da baie in equilibrio.

L'espressione si adatta bene ai dati sperimentali a disposizione, ma non rispetta rigorosamente le condizioni di:

- 1) passaggio nel punto P_o ;
 - 2) parallelismo alla direzione delle creste d'onda nel punto P_o ;
 - 3) valore dell'angolo θ_c nel punto critico che individua il rapporto di intaccatura.
- Tan e Chew hanno proposto l'espressione che, rispettando le condizioni di:

- passaggio nel punto P_o ;
- parallelismo alla direzione delle creste d'onda nel punto P_o .

meglio si adatta ai dati sperimentali, pur non rispettando la condizione sul valore dell'angolo θ_c nel punto critico. E' stata qui presentata l'espressione parabolica in (β/θ) che ottempera le tre condizioni caratteristiche sopra dette per le baie in equilibrio.

Per le applicazioni ingegneristiche, al fine di individuare la conformazione d'equilibrio di una spiaggia, le equazioni paraboliche che hanno un rapporto di intaccatura più prossimo a quello proposto da Silvester nell'intero dominio $10^\circ < \beta < 90^\circ$ risultano quelle calcolate con i valori dei coefficienti proposti in questo articolo.

Appendice: condizione di tangenza alla curva di equilibrio

In questa sessione si determina la condizione di tangenza alla curva:

$$R = R_o f(\beta/\theta) \quad (17)$$

con β e R_o valori fissati.

Si consideri un punto P appartenente alla curva tale che il segmento FP formi un angolo θ con l'asse delle ascisse. Si consideri ora il punto P' sempre appartenente alla curva tale che il segmento FP' formi un angolo $\theta + d\theta$ con l'asse delle ascisse (vedi Fig. 9).

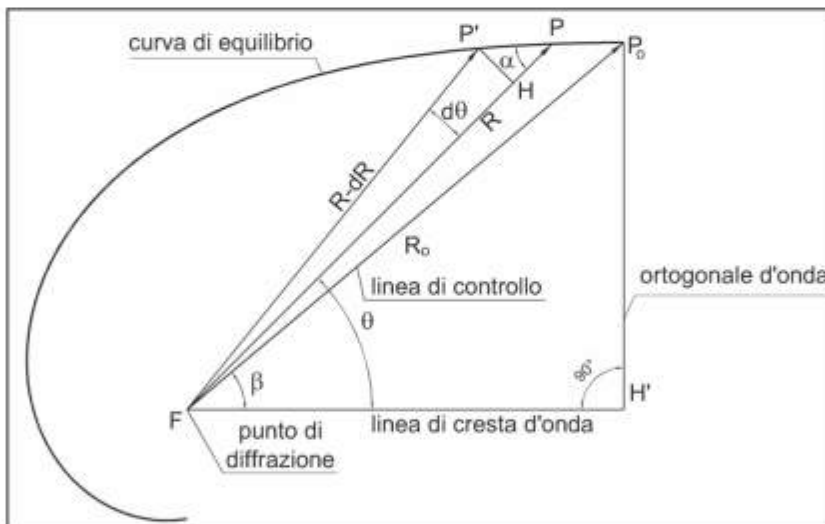


Figura 9 - Determinazione delle condizione di tangenza alla direzione d'onda.

Indicata con H la proiezione di P' sul segmento FP risulta:

- $HP' = R d\theta$
- $HP = dR$

Derivando l'equazione (2) rispetto a θ risulta:

$$- dR/d\theta = - (\beta/\theta^2) R_o f'(\beta/\theta)$$

ovvero:

$$dR = - d\theta (\beta/\theta^2) R_o f'(\beta/\theta) \quad (18)$$

dove dR rappresenta un accorciamento ed è negativo, infatti $R' = R - |dR| < R$ per la natura a spirale dell'equazione (2).

L'angolo α compreso tra i segmenti P'P e HP è tale che:

$$\operatorname{tg}(\alpha) = HP' / HP = R d\theta / |dR| \quad (19)$$

ovvero:

$$|dR| = R d\theta / \operatorname{tg}(\alpha) \quad (20)$$

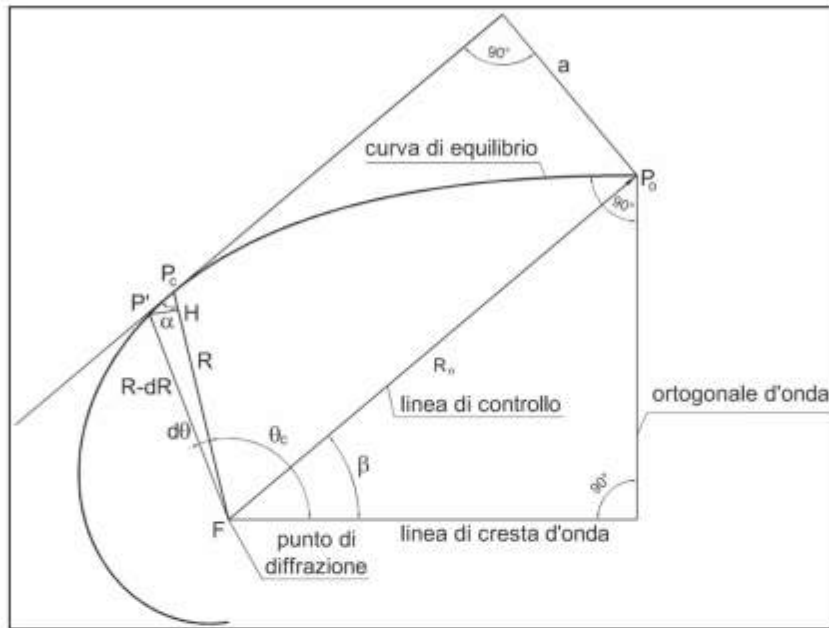


Figura 10 - Determinazione dell'angolo α nel punto critico.

Sostituendo nella (20) l'equazione (18) cambiata di segno risulta:

$$d\theta (\beta/\theta^2) R_0 f'(\beta/\theta) = R d\theta \operatorname{cotg}(\alpha) \quad (21)$$

ovvero:

$$f'(\beta/\theta) = (\theta^2/\beta) (R/R_0) \operatorname{cotg}(\alpha) \quad (22)$$

Nel caso in cui il punto P coincide con il punto P₀ risulta $\theta = \beta$, $R = R_0$ e $\alpha = \beta$, pertanto la (22) si riduce alla:

$$f'(\beta/\theta) = \beta \operatorname{cotg}(\beta) \quad \text{per } \theta = \beta \quad (23)$$

Nel caso in cui $\theta = \theta_c$ dalla Figura 10 risulta $\alpha = \theta_c - \beta$, infatti nel punto P_c dovendo essere il segmento P'P_c parallelo a segmento FP₀ si evince che l'angolo in P_c del triangolo P'P_cH e l'angolo in F = $\theta_c - \beta$ del triangolo P_cFP₀ risultano alterni interni.

La condizione di tangenza alla curva per $\theta = \theta_c$ è espressa dalla (22) sostituendo a θ il valore di θ_c e ad α il valore dell'angolo critico ($\theta_c - \beta$) ovvero:

$$f'(\beta/\theta) = (\theta_c/\beta)^2 (R/R_0) \beta \operatorname{cotg}(\theta_c - \beta) \quad \text{per } \theta = \theta_c \quad (24)$$

Ringraziamenti

Un vivo ringraziamento al prof. Ing. A. Noli per i preziosi suggerimenti.

Bibliografia

- Ho S. K. (1971) - *Cranulate shaped bays*. Asian Inst. Tech Master Eng. Thesis, No 346.
- Hsu J. R., Silvester R. e Xia Y. M. (1987) - *New characteristics of equilibrium shaped bays*. Proc. 8th Aust. Conf. Coast. and Oc. Engrg.: 140-144.
- Hsu J. R. e Evans C. (1989) - *Parabolic bay shapes and applications*. Proc., Institution of Civil Engineers, London, England, Vol. 87: 557-570.
- Hsu J. R., Silvester R. e Xia Y. M. (1989a) - *Generalities on static equilibrium bays*. Coast. Eng., 12: 353-369.
- Hsu J. R., Silvester R. e Xia Y. M. (1989b) - *Static equilibrium bays: new relationships*. J. Wtrwy., Port, Coast., and Oc. Engrg., ASCE, 115: 285-298.
- Krumbein W. C. (1947) - *Shore processes and beach characteristics*. Tech Memo 3, U.S. Army Beach Erosion Board, Washington, D.C.
- Silvester R. (1970) - *Development of cranulate shaped bays to equilibrium*. J. Wtrwy. and Hrbrs Divn., ASCE 96: 275-287.
- Tan S. K. e Chiew Y. M. (1994) - *Analysis of bayed beaches in static equilibrium*. J. Wtrwy., Port, Coast., and Oc. Engrg., ASCE, 1120: 145-153.
- Vichetpan N. (1969) - *Equilibrium shores and coastal design*. Proc. Coast. Sediments '77, ASCE: 1-16.

Ricevuto il 10/01/2008, accettato il 13/03/2008.

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

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

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

Riassunto

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

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

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

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

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

Abstract

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

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

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

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

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

Introduzione

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

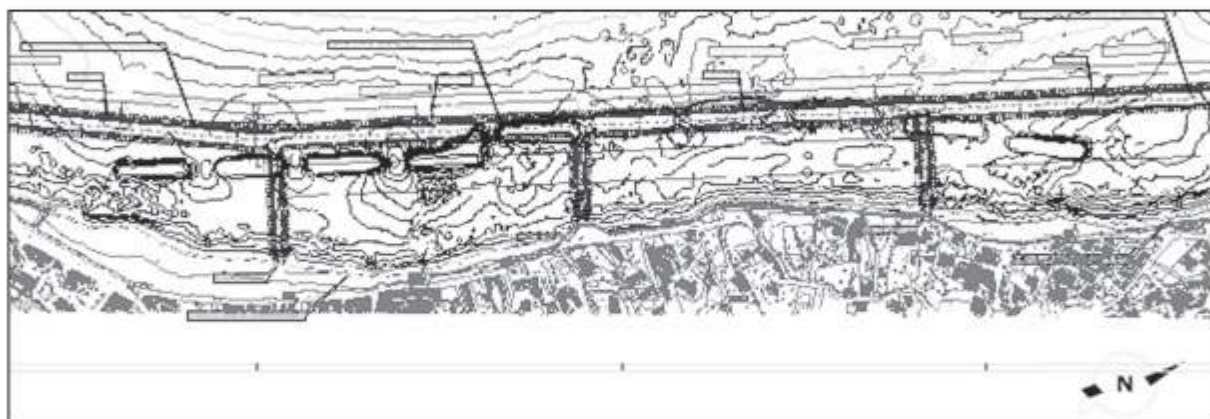


Figura 1 - Parti dell'opera di difesa delle spiagge.

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

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

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

Per la misura dinamica dei livelli idrici, la vasca ondogeno è attrezzata con un sistema di sensori costituito da 20 sonde resistive mobili. La misura delle componenti di velocità media temporale è stata effettuata mediante un velocimetro 3D ad ultrasuoni (ADV).

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

Le condizioni ondose assunte per le prove eseguite sono rappresentate da un'onda morfologica, definita come l'altezza d'onda cui corrisponde un flusso di energia annuo pari a quello risultante dalle varie direzioni di provenienza delle onde, e da un'onda di progetto, di altezza pari all'onda frangente sul fondale su cui verrà realizzata l'opera.

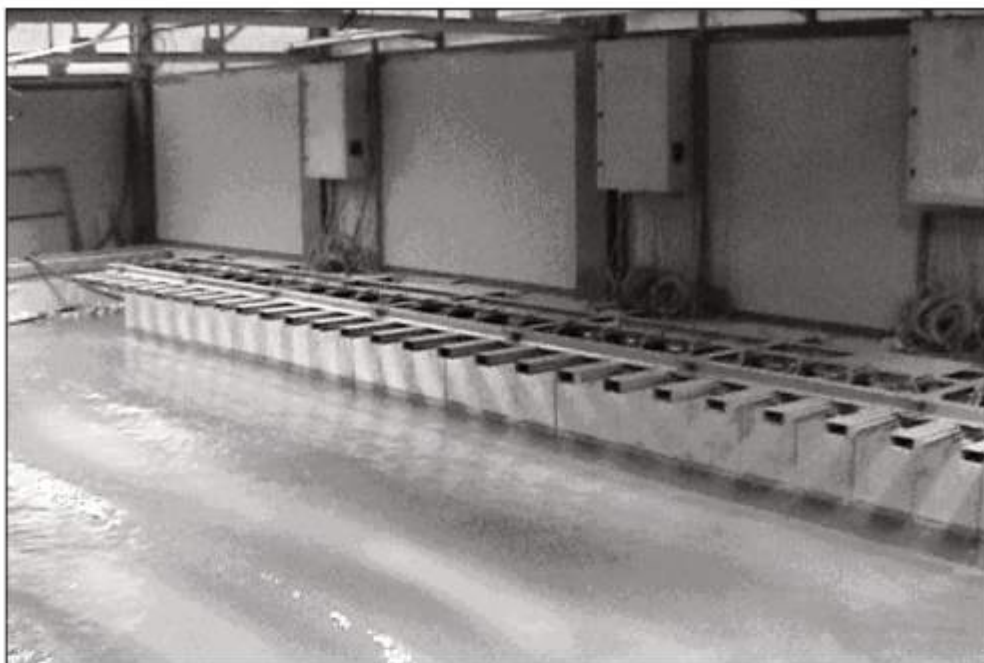


Figura 2 - Vasca ondogena tridimensionale.

Dall'analisi dei risultati ottenuti si è evinto che il fattore di trasmissione dell'altezza d'onda a tergo del sistema di scogliere sommerse è minore per effetto della mareggiata di progetto rispetto a quello dell'onda morfologica. Il danneggiamento dell'opera per effetto dell'onda di progetto può essere ritenuto trascurabile. I valori delle velocità misurate a tergo delle scogliere sono risultati contenuti; valori più elevati, ma comunque trascurabili, si stabiliscono per effetto della mareggiata di progetto in corrispondenza dei varchi; il contributo alla circolazione idrica dovuto all'escursione dell'onda di marea è stato trascurato visto il valore dell'ampiezza troppo modesta, situazione tipica di molti paraggi delle coste italiane.

La perdita di materiale in prossimità della linea di riva a seguito della sequenza temporale riprodotta sembra rimanere contenuta all'interno del sistema di scogliere sommerse.

Impostazione e realizzazione delle prove

Realizzazione del modello

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

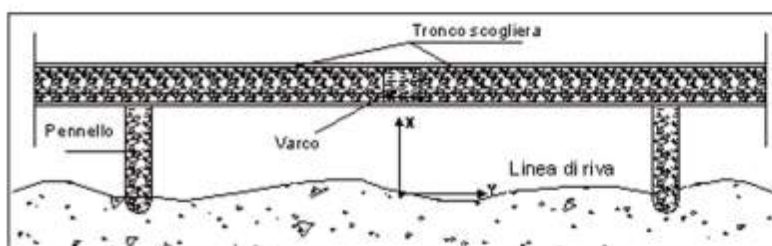


Figura 3 - Schema del modello dell'opera di difesa e sistema di riferimento orizzontale.

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

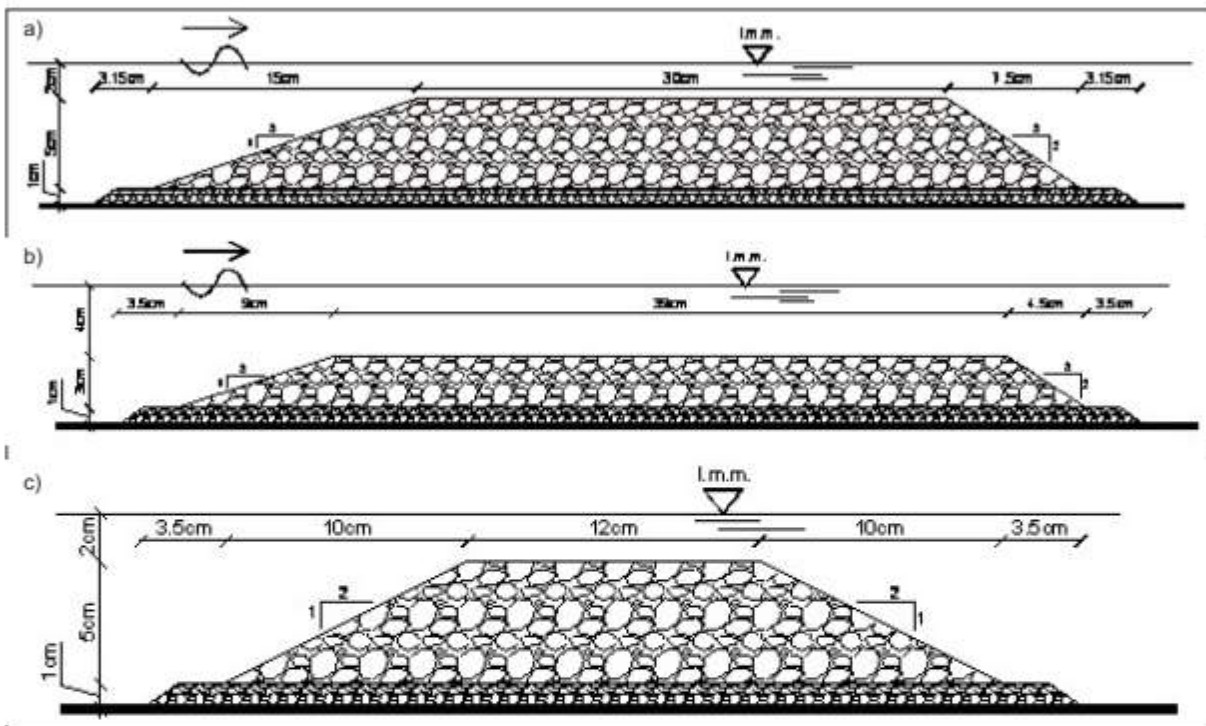


Figura 4 - Schema delle sezioni realizzate nel modello: a) tronco scogliera; b) varco; c) pennello.

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

Prove eseguite

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

In particolare le prove sperimentali con l'onda morfologica sono state protratte per una durata sufficiente al raggiungimento di un configurazione in equilibrio dinamico della spiaggia, pari a circa a otto ore nel modello corrispondenti nella scala dei tempi del prototipo a circa 56 ore (Di Natale et al., 2004, 2005). Per le prove con onda di progetto si è invece stabilita una durata di un'ora, che corrisponde nella scala dei tempi alla Froude alla durata di circa sette ore ed alla generazione di circa 3000 onde. In Tabella 1 sono riportate le prove sperimentali eseguite.

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

Tabella 1 - Principali parametri delle prove sperimentali eseguite.

Test	Condizione moto ondoso	H_s prototipo [m]	H_s modello [m]	T_p prototipo [s]	T_p modello [s]	DD (°N)	Angolo di attacco	Durata prova [ore]
1	Onda morfologica	1.50	0.03	5.1	0.75	290	90	8
2	Onda di progetto	3.0	0.06	7.2	1.0	290	90	1
3	Onda morfologica	1.50	0.03	5.1	0.75	290	90	8
4	Onda di progetto	3.0	0.06	7.2	1.0	280	80	1

Analisi dei risultati

Analisi del comportamento idraulico delle scogliere sommerse

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

Tabella 2 - Principali parametri relativi al comportamento idraulico della scogliera sommersa.

Test	Condizione moto ondoso	Angolo di attacco	H_s target [cm]	T target [s]	H_s (dom. freq.) [cm]	T_p (dom. freq.) [s]	H_s (dom. tempo) [cm]	T_s (dom. tempo) [s]	H_t (dom. freq.) [cm]	H_t (dom. tempo) [cm]	K_{t1} (dom. freq.)	K_{t2} (dom. tempo)
1	Onda morfologica	90°	3.0	0.75	3.1	0.72	2.9	0.71	1.9	1.7	0.62	0.59
2	Onda di progetto	90°	6.0	1.0	6.4	1.04	6.2	0.90	3.1	2.9	0.48	0.47

Analisi della stabilità delle scogliere sommerse

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

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

Onde di mareggiata H=6.0 cm	Lato struttura	Attacco 90°	Attacco 80°
Mantellata	Mare	0.46%	0.31%
	Terra	0.28%	0.16%
Attacco pennello destro	Mare	0.56%	0.37%
	Terra	0.41%	0.0%
Attacco pennello sinistro	Mare	0.75%	0.94%
	Terra	0.81%	0.61%
Attacco pennelli	Mare	0.66%	0.61%
	Terra	0.61%	0.31%
Testata destra	Mare	0.69%	0.46%
	Terra	0.25%	0.75%
Testata sinistra	Mare	0.69%	0.46%
	Terra	0.50%	0.38%
Testate destra e sinistra	Mare	0.69%	0.46%
	Terra	0.38%	0.56%
Varco	Mare	1.61%	1.15%
	Terra	0.78%	0.52%

Le Figure 5 e 6 riportano alcune immagini delle varie parti della struttura prima e dopo la prova con attacco obliquo, durante la quale si sono riscontrati i massimi valori del danneggiamento. Durante le prove sperimentali, sono state eseguite anche misure dell'escavazione al piede della struttura dal lato mare in corrispondenza dei punti riportati in Figura 7.

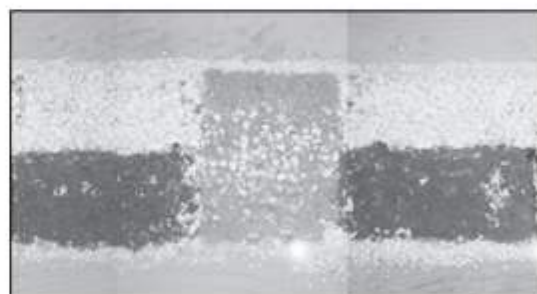
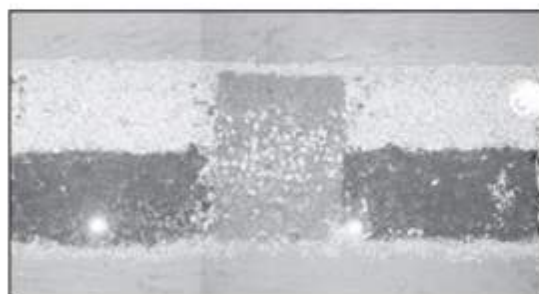


Figura 5 - Vista dall'alto della zona della scogliera prossima al varco centrale: prima della prova con onda di progetto, a sinistra; dopo la mareggiata di progetto con angolo di attacco di 80°, a destra.

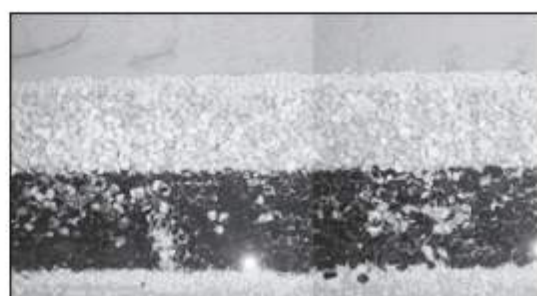
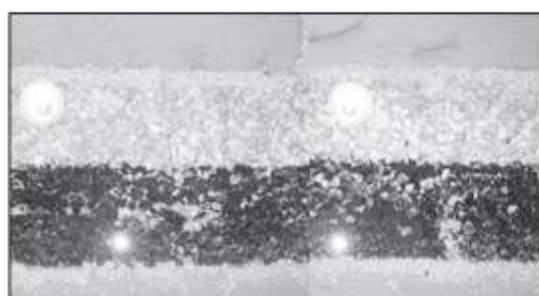


Figura 6 - Vista dall'alto del tratto della mantellata prossimo al pennello: prima della prova con onda di progetto, a sinistra; dopo la mareggiata di progetto con angolo di attacco di 80°, a destra.

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

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

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

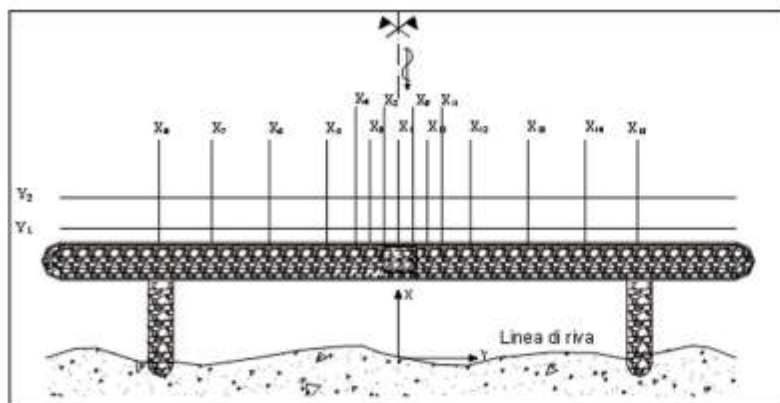


Figura 7 - Schema del modello con l'indicazione dei punti in cui è stata misurata l'erosione.

Analisi della circolazione idrodinamica

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

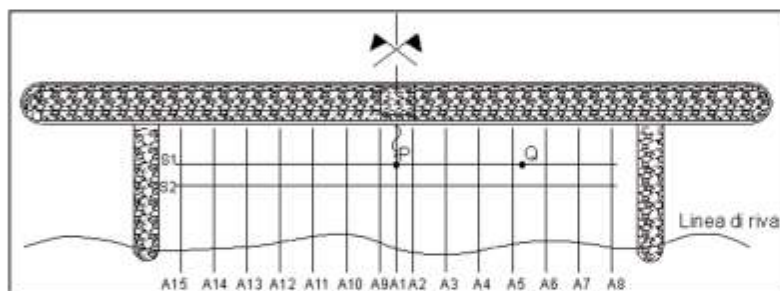


Figura 8 - Ubicazione dei punti in cui è stata effettuata la misura delle componenti della velocità.

Tabella 5 - Coordinate dei punti di misura della velocità.

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

Onda morfologica

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

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

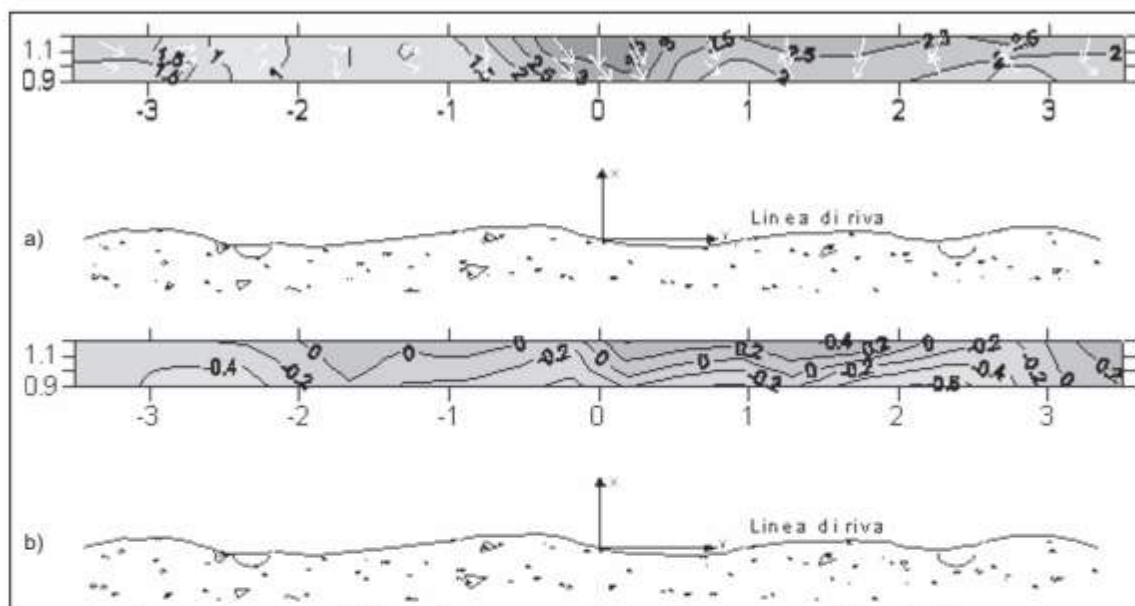


Figura 9 - Circolazione idrica a tergo della scogliera sommersa: (a) circolazione orizzontale [cm/s]; (b) componente verticale, assunta positiva verso l'alto [cm/s].

Onda di progetto

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

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

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

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

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

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

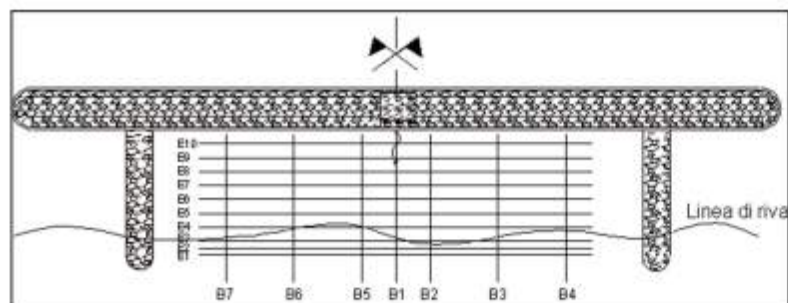


Figura 10 - Ubicazione dei punti in cui è stato effettuato il rilievo della quota del fondale.

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

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

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

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

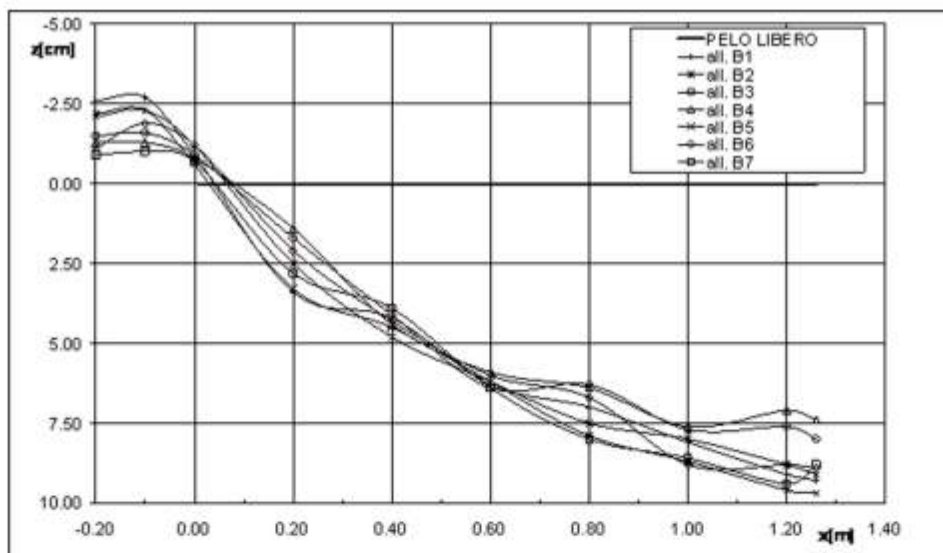


Figura 11 - Profili di equilibrio dinamico sotto l'azione della prima onda di modellamento.

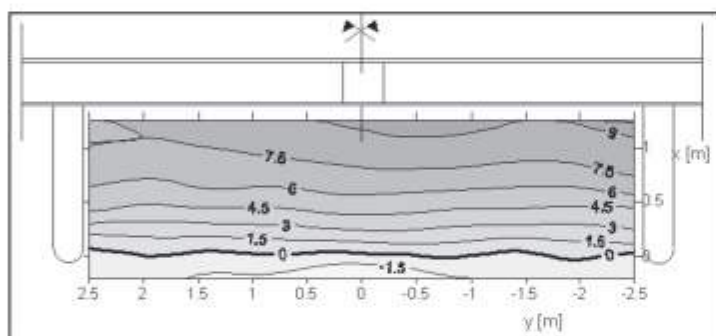


Figura 12 - Batimetria di equilibrio all'interno della cella di ripascimento dopo l'azione della prima onda di modellamento.

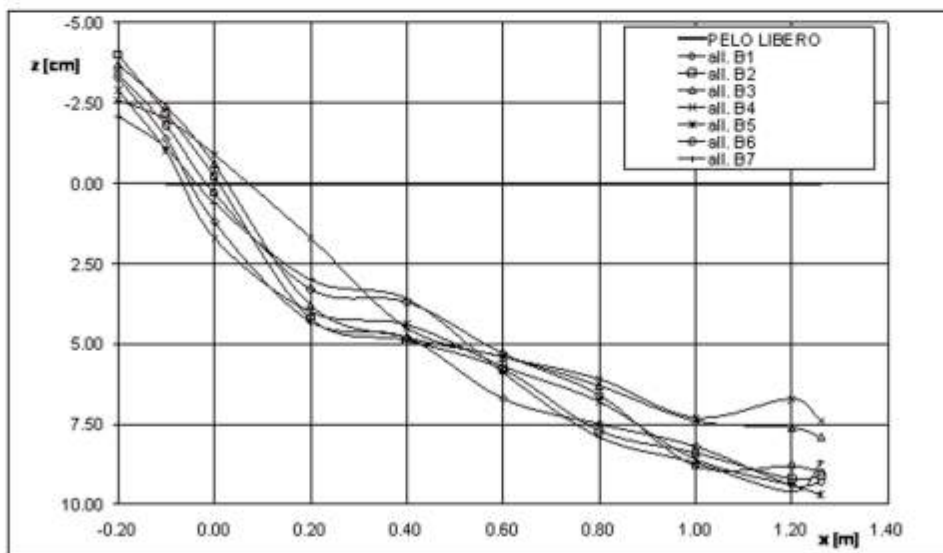


Figura 13 - Profili trasversali della spiaggia al termine della mareggiata.

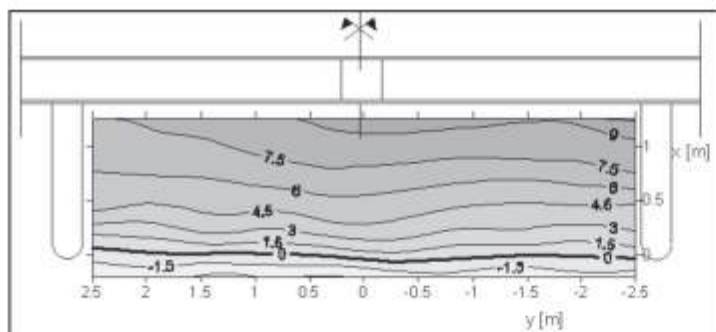


Figura 14 - Batimetria all'interno di una cella di ripascimento al termine della mareggiata.

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

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

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

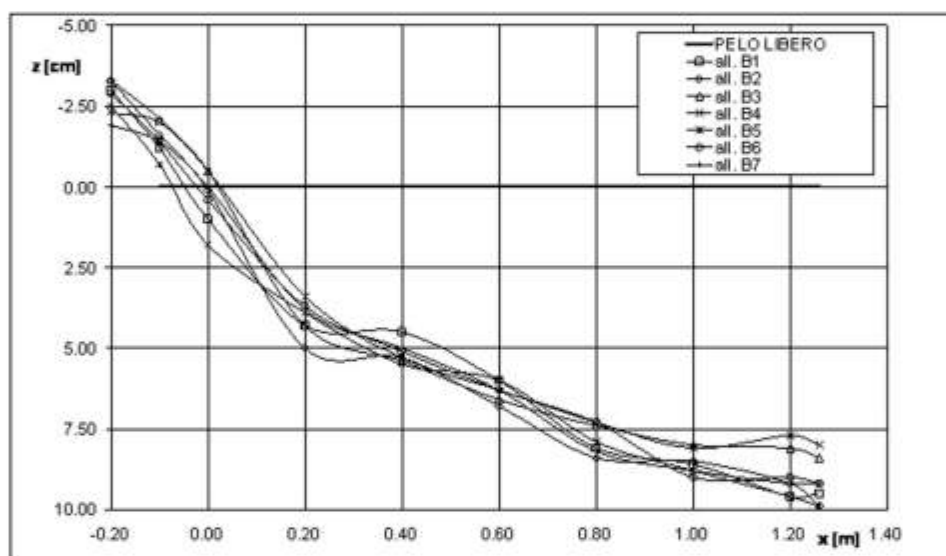


Figura 15 - Profili di equilibrio dinamico dopo l'azione della seconda onda di modellamento.

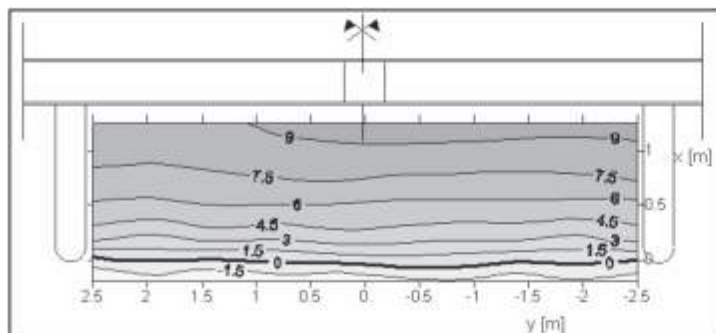


Figura 16 - Batimetria di equilibrio in una cella di ripascimento dopo l'azione della seconda onda di modellamento.

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

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

Considerazioni conclusive

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

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

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

Bibliografia

- Benassai E., Gentilomo M., Ragone A., Setaro F. e Tomasicchio U. (1997) - *Littoral restoration by means of protected beach nourishment. Recent italian works. Venetian and Tyrrhenian-Calabrian Coasts*. Bulletin n° 94, AIPCN.
- Benassai E., Calabrese M., Ragone A. e Sorgenti degli Uberti G. (2001) - *Un esempio di analisi di affidabilità di un ripascimento artificiale*. Giornate Italiane di Ingegneria Costiera, Salerno, Italia.
- Burchart H.F., Kramer M., Lamberti A. e Zanuttigh B. (2006) - *Structural stability of detached low crested breakwaters*. Coastal Engineering, Volume 53: 381-394.
- Di Natale M., Di Ronza S. e Vicinanza D. (2004) - *Sul problema della doppia riflessione nelle vasche per la simulazione del moto ondoso tridimensionale*. XXIX Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche, Trento.
- Di Natale M., Eramo C. e Vicinanza D. (2004) - *Realizzazione di un impianto sperimentale per lo studio degli effetti della subsidenza sulla dinamica di una spiaggia emersa*. XXIX Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche, pp. 761-768, Trento.
- Di Natale M., Eramo C. e Vicinanza D. (2008) - *Experimental investigation on beach morphodynamics in presence of subsidence*. Journal of Coastal Research.
- Frigaard P. e Christensen M. (1994) - *An absorbing wave-maker based on digital filters*. Proceeding of Int. Symp. Waves - Physical and Numerical Modelling, Vancouver.
- Frigaard P. e Brorsen M. (1995) - *A time domain method for separating incident and reflected Irregular waves*. Coastal Engineering, Volume 24, n. 3-4.
- Hughes S.A. (1993) - *Physical Models and Laboratory Techniques in Coastal Engineering*. Advanced Series on Ocean Engineering, Volume 7, World Scientific.
- Kamphuis J.W. (1991) - *Alongshore Sediment Transport*. SJ. Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng. ASCE, Volume 117: 624-640.
- Kamphuis J.W. (2000) - *Introduction to Coastal Engineering and Management*. Advanced Series on Ocean Engineering, Volume 16, World Scientific.

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

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

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

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

Riassunto

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

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

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

Abstract

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

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

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

Introduzione

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

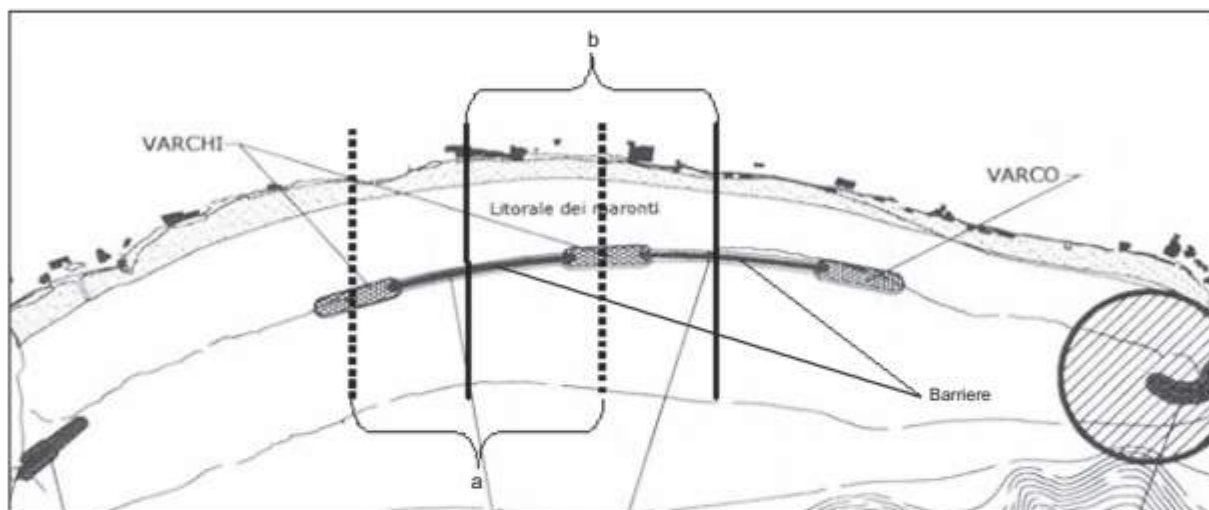


Figura 1 - Parti delle opere di difesa realizzate: (a) modello 1; (b) modello 2.

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

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

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

Installazione sperimentale

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

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

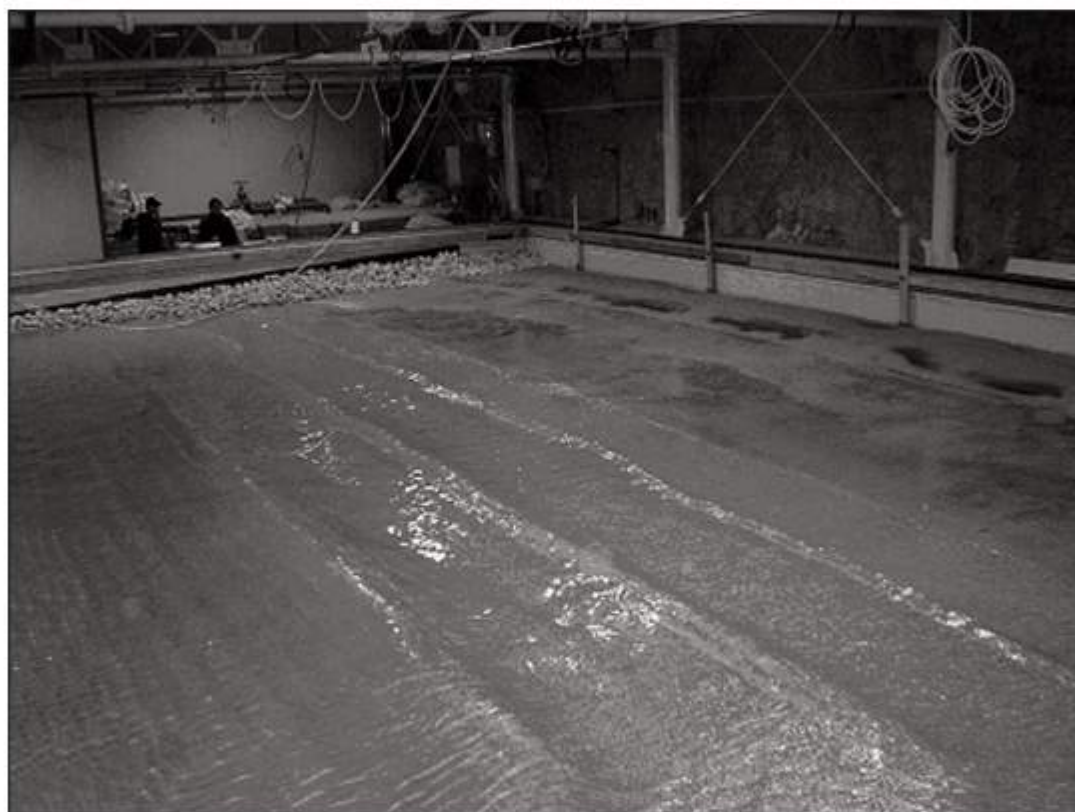


Figura 2 - Vasca ondogeno tridimensionale.

Programma delle prove

Realizzazione del modello fisico

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

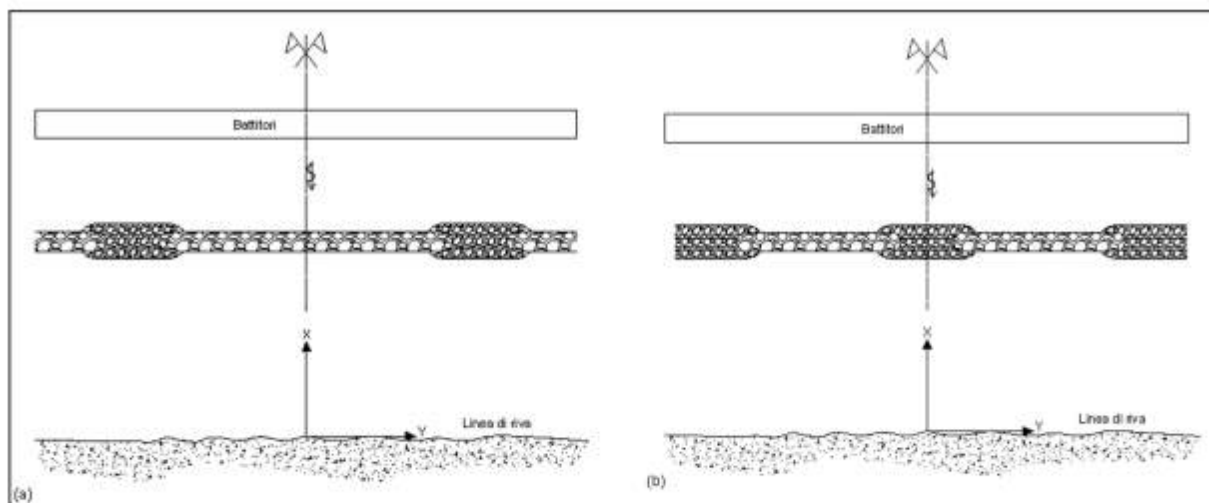


Figura 3 - Schema delle due configurazioni di modello: a) modello1; b) modello 2.

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

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

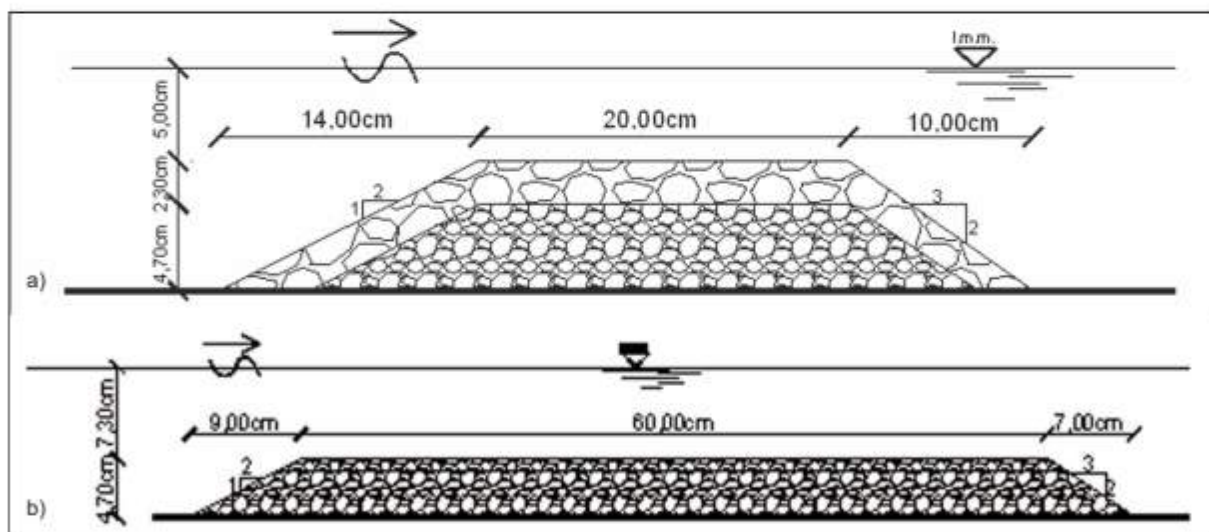


Figura 4 - Schema delle sezioni realizzate nel modello: a) scogliera sommersa; b) protezione del fondo dei varchi.

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

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

Condizioni ondose di prova

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

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

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

Programma delle prove sperimentali

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

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

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

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

Tabella 1 - Prove sperimentali eseguite.

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

Risultati della sperimentazione

Analisi del comportamento idraulico delle scogliere sommerse

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

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

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

Analisi della stabilità delle scogliere sommerse (modello 1)

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

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

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

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

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

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

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

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

Analisi della circolazione idrodinamica

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

Modello 1 (onda morfologica)

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

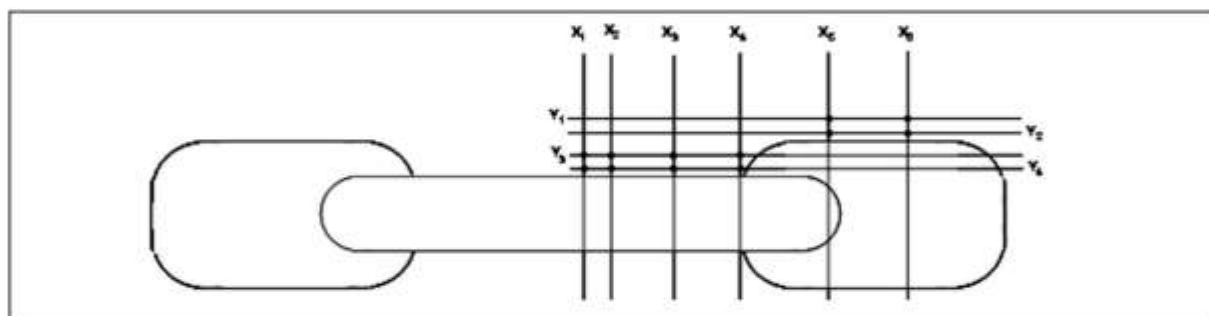


Figura 5 - Schema del modello 1 con l'indicazione dei punti in cui è stata misurata l'escavazione.

Tabella 5 - Coordinate dei punti di misura della velocità.

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

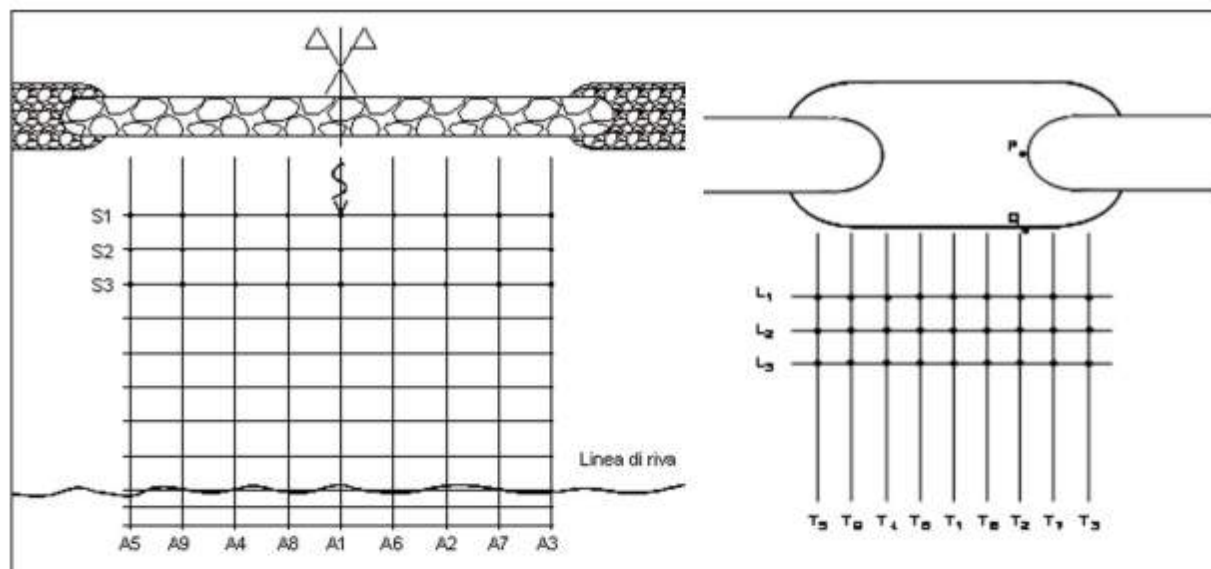


Figura 6 - Ubicazione dei punti in cui è stata effettuata la misura delle componenti della velocità media temporale: modello 1, a sinistra; modello 2, a destra.

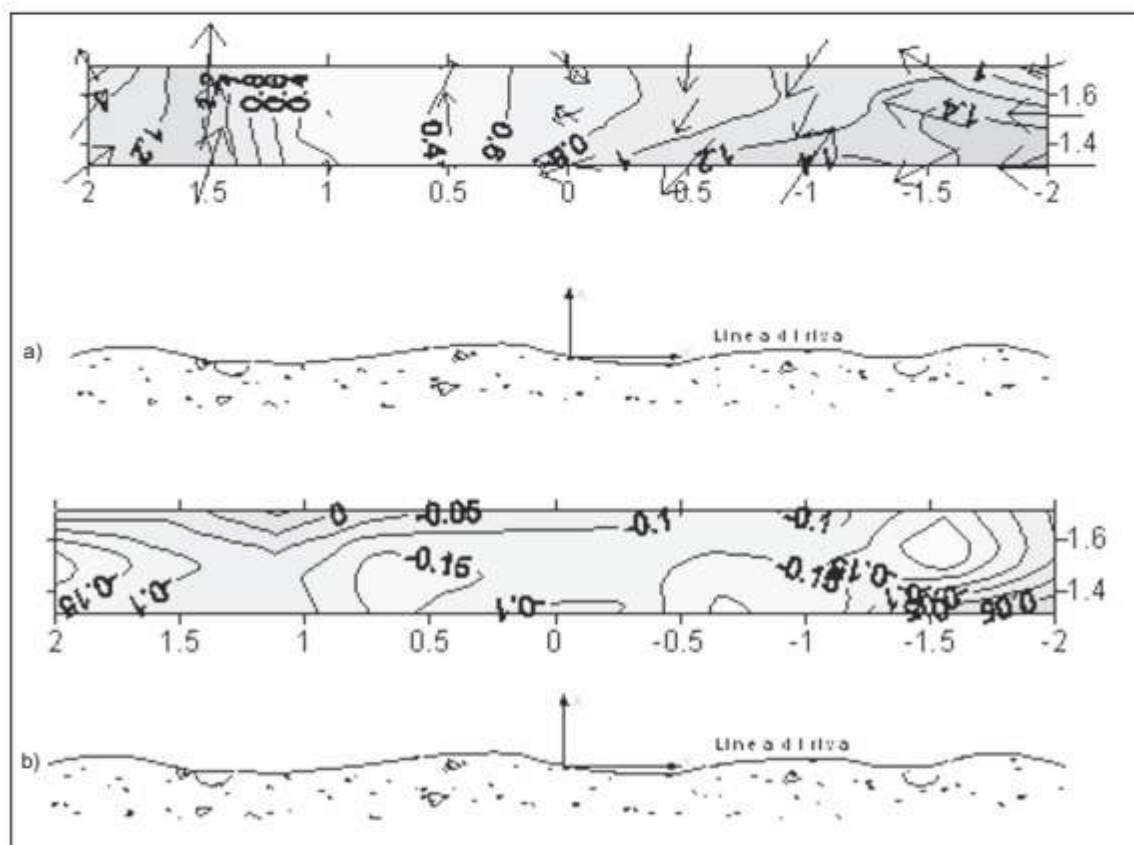


Figura 7 - Circolazione idrica a tergo della scogliera sommersa (modello 1): a) circolazione orizzontale [cm/s]; b) componente verticale, assunta positiva verso l'alto [cm/s].

Modello 2 (onda morfologica)

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

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

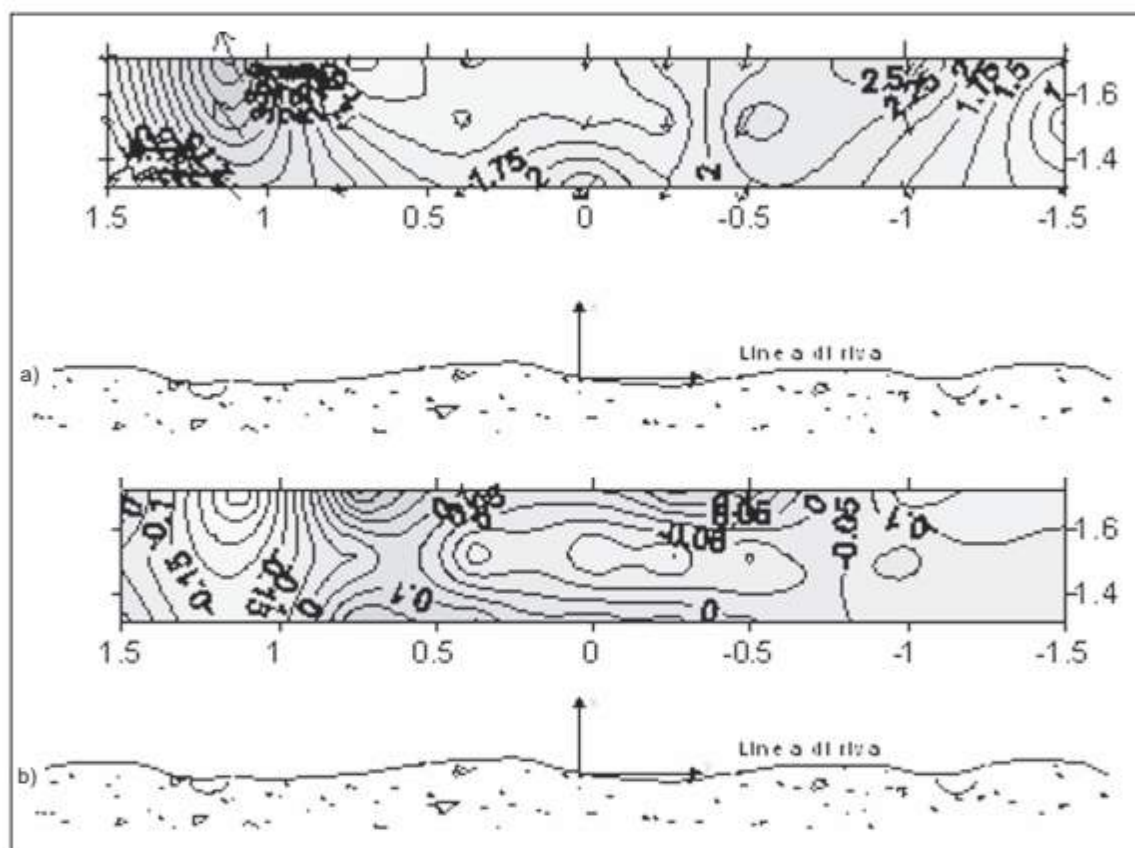


Figura 8 - Circolazione idrica a tergo del varco tra le scogliere sommerse (modello 2): a), circolazione orizzontale [cm/s]; b), componente verticale, assunta positiva verso l'alto [cm/s].

Modello 1 (onda di progetto)

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

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

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

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

Analisi della evoluzione della morfobatimetria a tergo delle opere

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

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

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

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

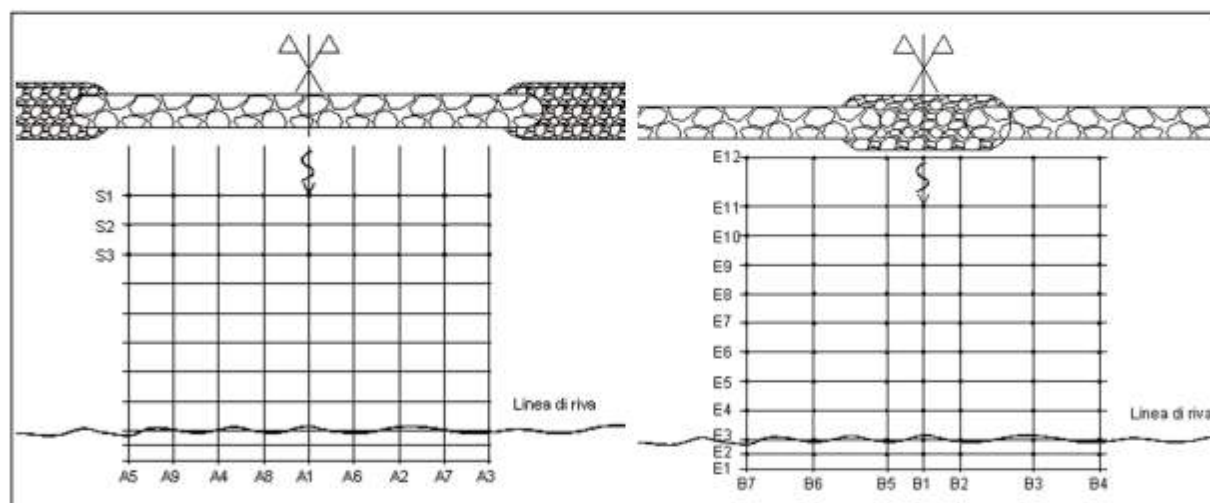


Figura 9 - Ubicazione dei punti in cui è stato effettuato il rilievo della quota del fondale: modello 1, a sinistra; modello 2, a destra.

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

Modello 1

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

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

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

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

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

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

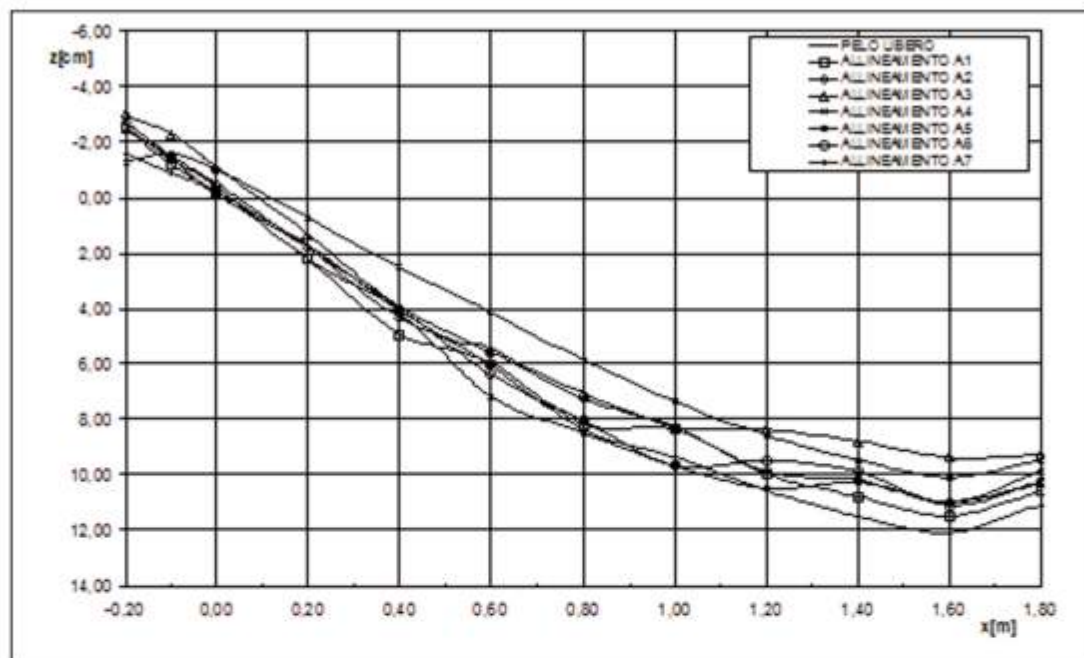


Figura 10 - Profili di equilibrio dinamico sotto l'azione della prima onda di modellamento (modello 1).

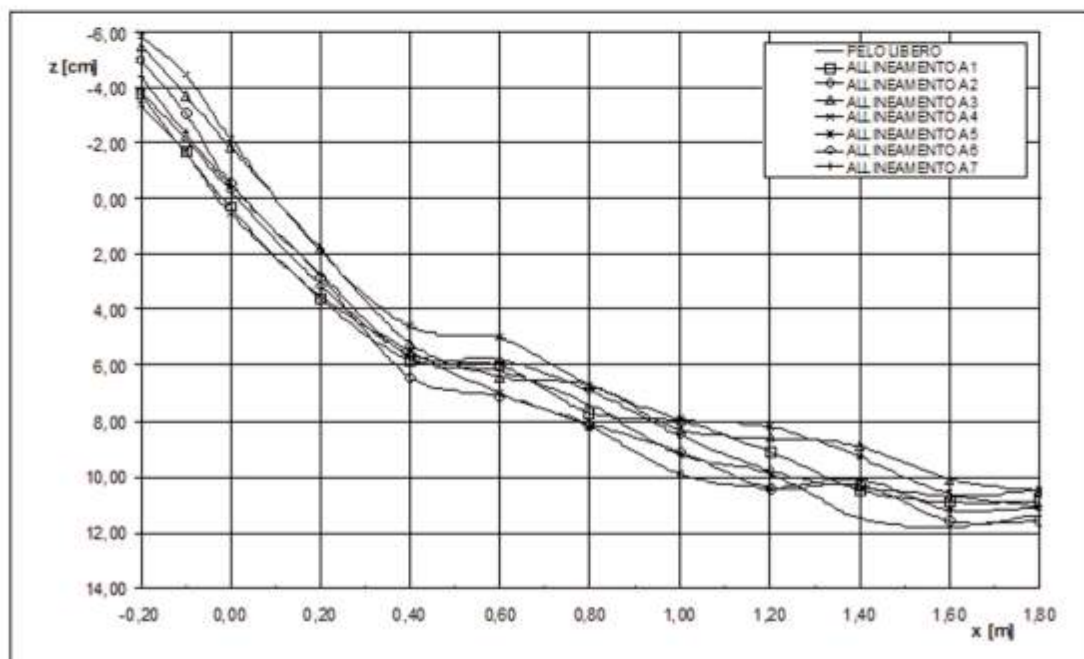


Figura 11 - Profili trasversali della spiaggia al termine della mareggiata (modello 1).

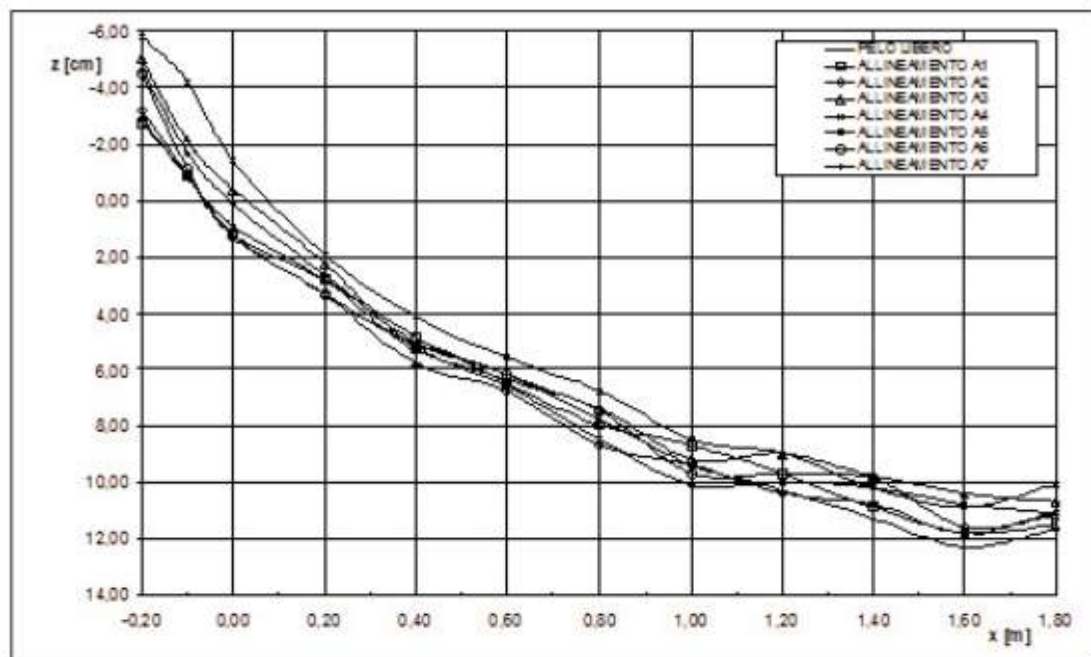


Figura 12 - Profili di equilibrio dinamico sotto l'azione della seconda onda di modellamento (modello 1).

Modello 2

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

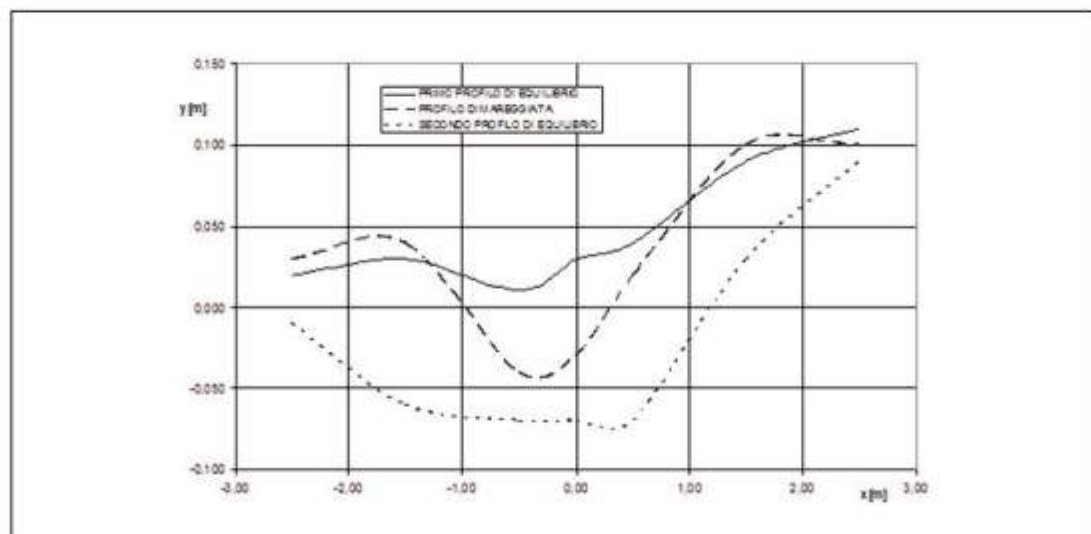


Figura 13 - Dinamica della linea di riva durante il ciclo di prove sul modello 1.

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

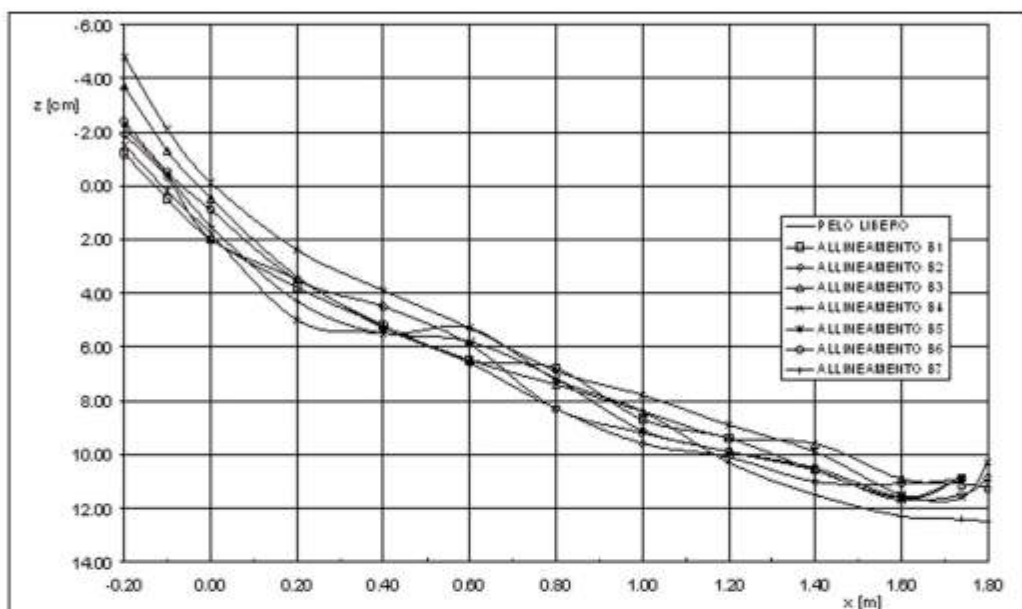


Figura 14 - Profili di equilibrio sotto l'azione della prima onda di modellamento (modello 2).

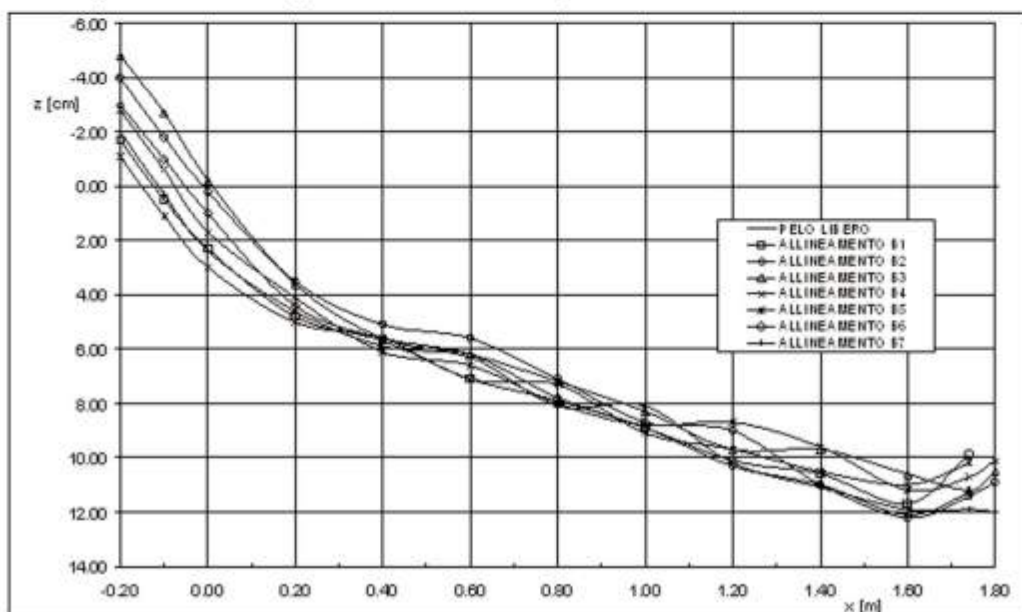


Figura 15 - Profili di spiaggia assunti al termine della mareggiata (modello 2).

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

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

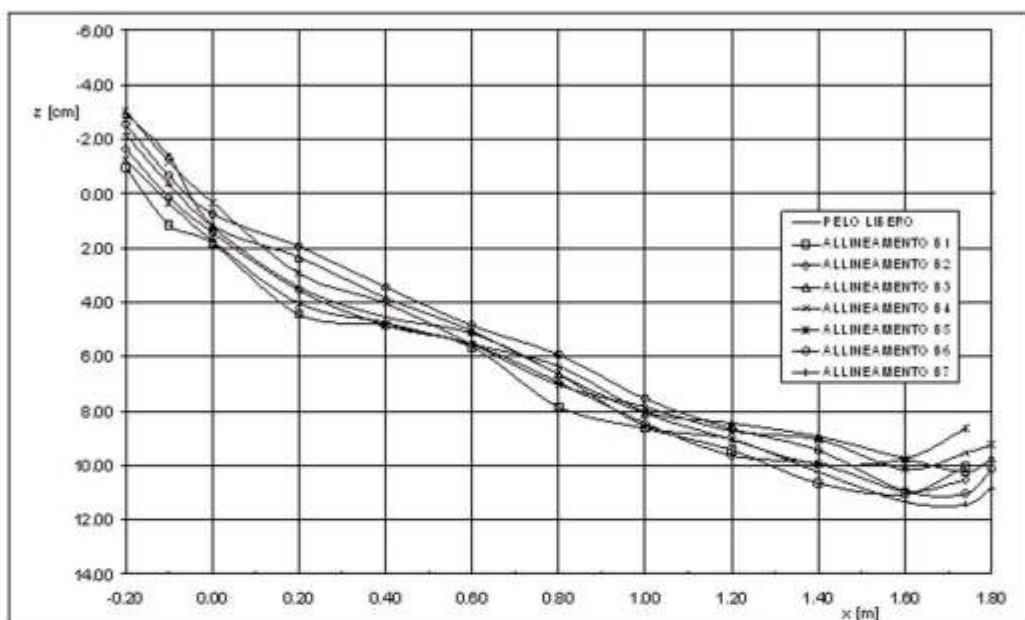


Figura 16 - Profili di equilibrio sotto l'azione della seconda onda di modellamento (modello 2).

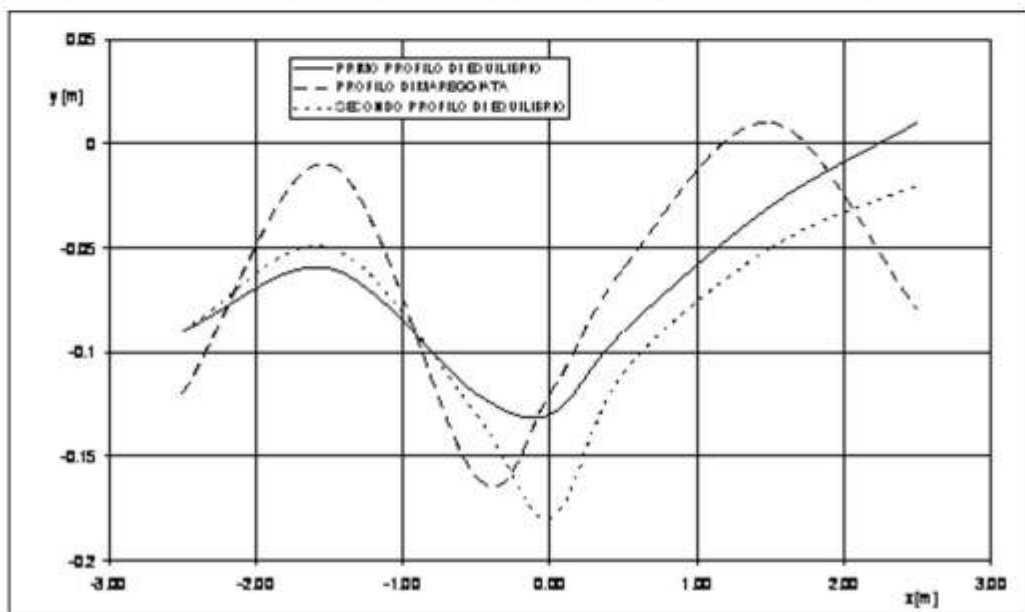


Figura 17 - Dinamica della linea di riva durante il ciclo di prove sul modello 2.

Considerazioni conclusive

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

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

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

- a) valutazione del comportamento idraulico:
 - il fattore di trasmissione dell'altezza d'onda a tergo del sistema di scogliere sommerse è pari a circa il 60% in corrispondenza della mareggiata di progetto, mentre assume valori superiori al 90% in corrispondenza dell'onda di modellamento;
- b) valutazione della stabilità del manufatto:
 - il grado di danneggiamento delle opere a seguito dell'azione della mareggiata di progetto, con periodo di ritorno di 50 anni è compreso tra 0.0% e 6.9%;
 - in seguito alla suddetta mareggiata, si osservano escavazioni del fondale prossime a 1m di profondità nel prototipo localizzate in prossimità dell'imbasamento delle scogliere, dal lato mare, dove non è previsto in progetto alcun tipo di protezione;
- c) valutazione della circolazione idrica a tergo delle opere:
 - le velocità residue nello specchio d'acqua a tergo del sistema di scogliere sono contenute tra 0.10 m/s e 0.20 m/s nel prototipo;
 - durante la mareggiata di progetto si stabiliscono in corrispondenza dei varchi correnti di intensità comprese tra 0.33 m/s e 0.47 m/s nel prototipo;
- d) valutazione della stabilità del ripascimento in sabbia:
 - le modificazioni subite dalla batimetria della spiaggia durante un ciclo di prove rappresentativo di una mareggiata estrema (tempo di ritorno 50 anni) preceduta e seguita da eventi ordinari di intensità pari alla media annua, mostrano un arretramento medio della linea di riva compreso tra 1.0 m e 3.5 m nel prototipo;
 - il materiale asportato dall'azione dinamica delle onde di mareggiata si accumula nella zona compresa tra la linea di riva e le scogliere.

Bibliografia

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

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

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

Valutazione dell'apporto sedimentario dalla spiaggia alla duna nella Tenuta Presidenziale di Castelporziano al fine di individuare la tendenza evolutiva dell'ambiente litorale

Tesi di Dottorato di: Valerio Minorenti

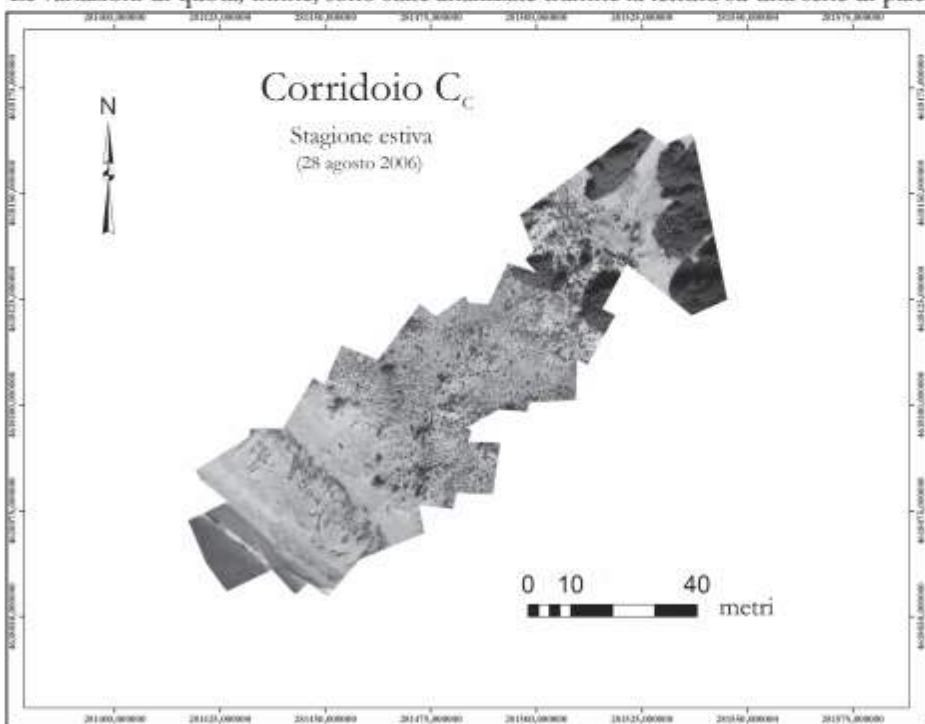
Docente guida: Prof. Giovanni Battista La Monica

Università di Roma "La Sapienza", Dipartimento di Scienze della Terra

Dottorato di Ricerca in Scienze della Terra, XX Ciclo.

Le dune costiere sono caratterizzate da un elevato grado di complessità legato ai processi di feedback non lineari esistenti tra i parametri caratterizzanti il sistema. Tale complessità è stata valutata all'interno del sistema naturale della Tenuta Presidenziale di Castelporziano (Roma), analizzando le trasformazioni evolutive dell'ambiente dunare e correlando un'analisi sedimentologica d'estremo dettaglio con il grado di copertura vegetazionale e il regime del vento registrato da una centralina posizionata sulla spiaggia. All'interno della Tenuta sono stati individuati tre corridoi ampi 20 m: il corridoio A_C insiste su un tratto di spiaggia semi-naturale, il corridoio B_C ricade in coincidenza di un *saucer blowout* posto sul lato sopravvento del cordone esterno stabilizzato, mentre il corridoio C_C su di un tratto affatto antropizzato e caratterizzato da una ampia copertura vegetazionale. La campionatura delle sabbie è stata condotta su una maglia regolare all'interno del corridoio partendo dal retroduna fino alla battigia. I tassi teorici di trasporto sono stati determinati utilizzando diverse equazioni procedendo, per la loro validazione, ad un confronto con i tassi dedotti sperimentalmente sul campo utilizzando un modello modificato di trappola orizzontale. Il trasporto eolico è stato integrato con gli aspetti vegetazionale tramite l'interpretazione di ortofotomosaici a elevata risoluzione spaziale; i rilievi fotogrammetrici sono stati prodotti tramite una metodologia sperimentale (Fig. 1).

Le variazioni di quota, infine, sono state analizzate tramite la lettura su una serie di paletti graduati a scala millimetrica



posizionati sulla linea mediana dei tre corridoi. Dall'analisi complessiva dei dati raccolti, si può osservare come le variazioni topografiche riscontrate alla Tenuta Presidenziale di Castelporziano siano state di entità diversa all'interno dei tre corridoi. Le variazioni granulometriche dei sedimenti campionati sono state esaminate tramite una analisi di tipo *cluster* basata sulle deviazioni standard (Std) per i valori di Mean Size.

Figura 1 - Esempio di ortofotocarta prodotta tramite la strumentazione proposta.

La distribuzione dei valori di deviazione standard lungo il corridoio A_C evidenzia come le maggiori variazioni a carattere granulometrico si siano verificate lungo il tratto di spiaggia dominata dalle dune incipienti. La zona più interna del retrospiaggia e la duna consolidata presentano, invece, variazioni assai modeste. Le maggiori variazioni al corridoio B_C si sono osservate, invece, in corrispondenza del *blowout* posizionato sulla duna stabilizzata e nell'immediato retroduna e in corrispondenza del contatto transizionale tra la spiaggia e i primi cordoni dunari incipienti. Infine, al profilo C_C , le variazioni a carattere granulometrico sono minime e verificate in prossimità della linea di riva e sulla sommità della duna. La copertura vegetazionale è sensibilmente diversa per i tre corridoi. Il corridoio A_C mostra una prima fascia dunare incipiente a debole copertura, con un aumento progressivo della densità della vegetazione fino alla duna stabilizzata.

La fascia di retrospiaggia al corridoio B_C mostra una transizione da una modesta ad una elevata copertura; la presenza del *blowout* ha determinato una diminuzione nella copertura vegetazionale alla cresta della duna stabilizzata e nel suo immediato retroduna. Il corridoio C_C ricade in una unica classe: elevata copertura vegetazionale che è massima al retroduna. I tassi di trasporto teorici ottenuti sono stati normalizzati con quelli osservati e riportati in percentuale. Per tutti i profili, ad eccezione del *blowout*, le variazioni registrate dalla lettura dei paletti graduati sono state minime, generalmente inferiori ai 5 cm analizzati. Il corridoio A_C è stato interessato dai processi di deflazione non solo in prossimità dei cordoni dunari incipienti più prossimi alla riva, ma anche per quelli più interni. Il cordone stabilizzato sembra essere ormai isolato dalle dinamiche d'interazione tra spiaggia e duna, mentre appare essere in via di sviluppo un nuovo cordone ampio circa 40 m. All'interno del corridoio B_C , l'elevato grado di copertura vegetazionale, non permette un trasporto alle zone più interne. La zona di retrospiaggia è quindi in uno stadio di generale stabilità, contrariamente alla duna stabilizzata che è dinamicamente attiva a causa della presenza del *blowout*. Questo non è più in collegamento dinamico con la spiaggia; inoltre si ipotizza che il *blowout* stia esaurendo la sua disponibilità sedimentaria, esponendo gli strati più antichi non di genesi eolica. Il corridoio C_C è complessivamente stabile (Fig. 2).

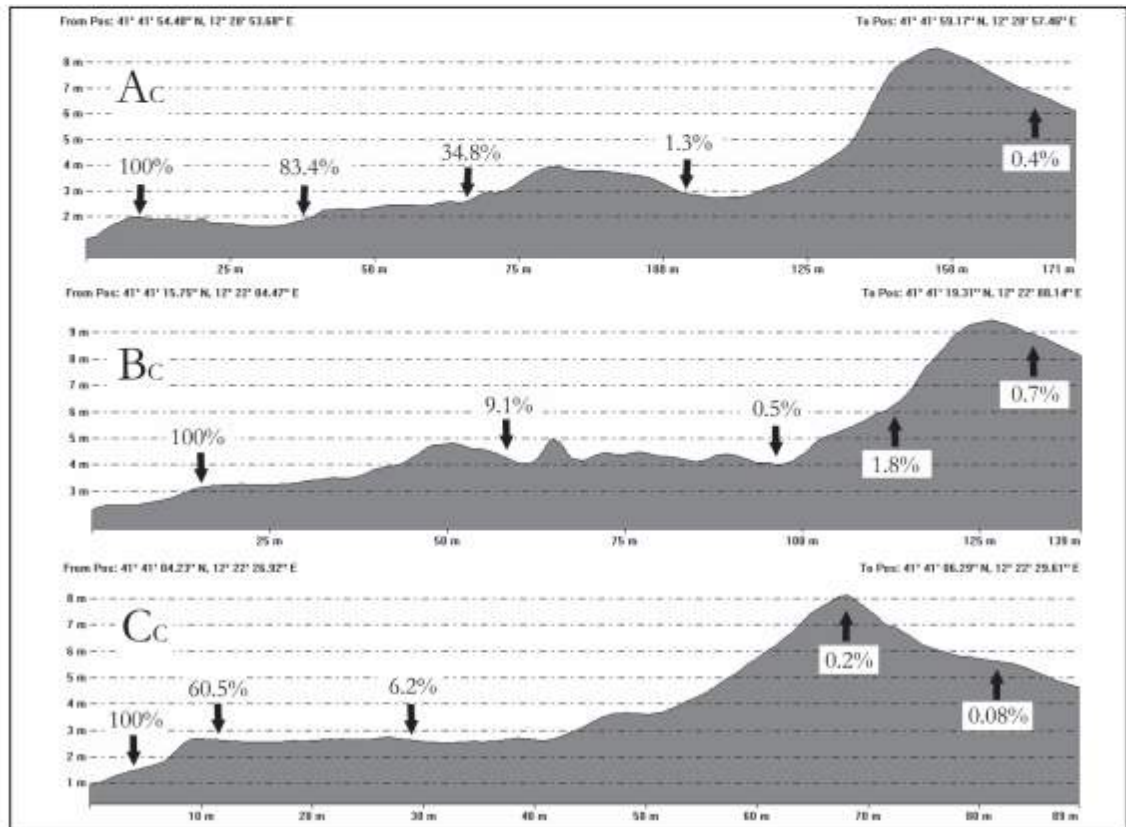


Figura 2 - Distribuzione in percentuale del tasso di trasporto eolico osservato nei tre corridoi per la stagione primaverile.

L'elevato numero di fattori di controllo rende il sistema notevolmente complesso. Tuttavia, dai risultati ottenuti, le equazioni in cui la velocità di soglia è espressa esplicitamente sono quelle in grado di predire tassi di trasporto molto più prossimi alla realtà. In base alle metodologie proposte in questa ricerca nessun modello teorico appare attualmente soddisfacente per una esaustiva determinazione dei volumi di sedimento trasportati dalla spiaggia alla duna. L'analisi delle variazioni topografiche fanno supporre che il sistema dunare, e più complessivamente il sistema spiaggia/duna all'interno della Tenuta Presidenziale di Castelporziano, stia sperimentando uno stadio di relativa stabilità, ma con stadi evolutivi differenti per i diversi corridoi.

Per brevità non si ritiene necessario di citare i riferimenti bibliografici che nella tesi sono costituiti da 141 voci a coprire un arco temporale dal 1934 al 2006.

Metodologia GIS per il monitoraggio dell'erosione costiera

Tesi di Master di: Niccolò Iandelli

Relatore: Paolo Mogorovich

Correlatrice: Dott.ssa Silvia Castelli

Università IUAV di Venezia, Dipartimento di Pianificazione

Master Universitario di II Livello in "Sistemi Informativi Territoriali e Telerilevamento"

Anno Accademico 2005 - 2006.

La gestione dei dati relativi alla fascia costiera e la loro elaborazione finalizzata alla comprensione dei dinamismi in atto oggi e nel passato, nonché la previsione della loro evoluzione futura, ha trovato grandi potenzialità nei Sistemi Informativi Territoriali e nelle possibilità di "calcolo" con estensione "geografica" che questi sistemi permettono. Lo studio dell'evoluzione dei litorali è fondamentale per la pianificazione di questa zona densamente popolata, economicamente interessante e nel contempo complessa e dinamica. Diventano così fondamentali il monitoraggio e le tecniche di stima e calcolo dell'erosione a cui un litorale è sottoposto. Scopo di questa tesi è l'utilizzo di metodologie GIS per rendere accurato, veloce e automatico il calcolo dei parametri che caratterizzano una costa in erosione o in accumulo e la presentazione di una nuova metodologia per migliorare la precisione del calcolo e diminuire la probabilità di errore. L'automatizzazione del calcolo delle variazioni areali della spiaggia emersa permette la standardizzazione delle procedure, l'abbattimento dei tempi di elaborazione dei dati e la riduzione dell'errore; i benefici sono sia in termini di tempo (attualmente l'analisi dello stato dei 200 km del litorale toscano richiede alcuni mesi di lavoro) sia in termini decisionali; una maggiore velocità nell'ottenere il "dato" permette una stima più veloce della "salute" del litorale e quindi la possibilità di decidere le strategie di intervento nell'area indagata.

Per questo lavoro di tesi oltre all'automatizzazione del metodo SVA (Surface Variation Analysis) con strumenti GIS, è stata realizzata una nuova procedura, denominata BSVA (Buffered Surface Variation Analysis).

Le procedure utilizzate sono state 3: PBA (Profile Based Analysis - procedura basata sui profili, metodo lineare), SVA (procedura basata su differenze areali), BSVA (nuova procedura proposta). Per la procedura PBA è stata utilizzata un'estensione realizzata dalla USGS (software DSAS) mentre per le altre due (SVA e BSVA) è stata realizzata una Toolbox dedicata utilizzando più estensioni messe a disposizione dal software ArcGIS ESRI:

-programmazione con ArcObjects in VBA;

-strumenti di Geoprocessing utilizzando l'estensione di ArcGIS chiamata Model Builder.

Prima di applicare i tre metodi ad un tratto del litorale toscano, questi sono stati testati su una "costa teorica" per evidenziarne il comportamento e valutare eventuali comportamenti nel calcolo.

La costa "teorica" utilizzata (Fig.1) è composta da una prima parte rettilinea di lunghezza pari a 1 km ed una parte curva che è stata realizzata con tre diversi raggi di curvatura (250 m, 500 m, 1000 m). Le tre metodologie (PBA, SVA, BSVA) sono state applicate al litorale di Punta Ala (Toscana meridionale) e i risultati ottenuti sono stati confrontati con quelli ottenuti con la tradizionale procedura manuale. Sia i dati sia le elaborazioni create sono state raccolte all'interno di un piccolo SIT chiamato "Erosione Costiera Punta Ala". Da quanto emerge dall'analisi effettuata, il metodo SVA è da considerarsi il migliore poiché presenta dei margini di errore più bassi del metodo BSVA.

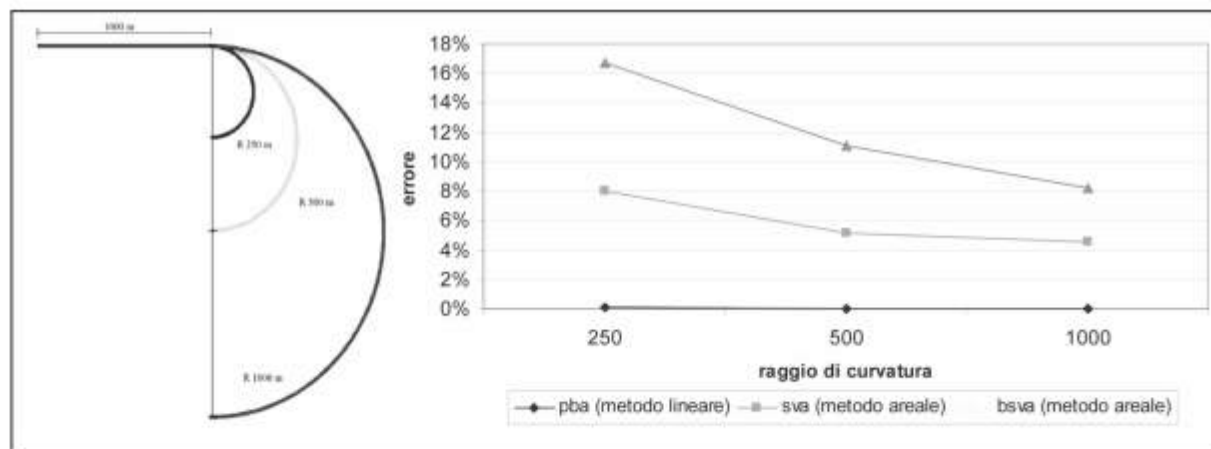


Figura 1 - Riva teorica e relazione tra raggio di curvatura ed errore.

Quest'ultimo è sicuramente una strada da percorrere per realizzare una metodologia che unisca la precisione della misura effettuata sui transetti (metodo PBA) integrata con la "memoria" di quel che avviene nell'intorno del transetto stesso (metodi areali). La variabilità morfologica tipica della linea di riva, che si manifesta con irregolarità, rende infatti indispensabile considerare una misura areale e non valutare solamente quello che accade in corrispondenza del singolo transetto. Le procedure realizzate in modo automatico portano ad una forte diminuzione del tempo di stima degli spostamenti della linea di riva; inoltre, permettono di aggiungere nuove funzionalità all'interno di Sistemi Informativi Territoriali già strutturati. Ciò consente di creare strati informativi che convergano in un SIT Integrato di Gestione Costiera che contenga scenari temporali diversi, carte di uso del suolo, piani provinciali e comunali, ma anche dati e informazioni non prettamente spaziali, come la capacità di ricezione turistica, il valore paesaggistico o la stima del danno economico creato dall'erosione. Inoltre la creazione di una toolbox composta da toolset accuratamente descritti permette l'interscambio dello strumento creato.

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 allegate figure e tabelle. Dopo l'accettazione deve essere inviata la copia definitiva su dischetto 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. 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 (copro 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 11. 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) 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.

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 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
ri

c/o Dipartimento di Scienze della Terra
Borgo Albizi, 28 - 50122 Firenze
Tel. 055 2479241 - Fax 055 2001618
E-mail: epranzini@unifi.it

Segreteria del Comitato scientifico di Studi costieri

c/o Dipartimento di Ingegneria civile
Via Santa Marta, 4 - 50139 Firenze
Tel. 055 4796224 - Fax 055 495333
E-mail aminti@dicea.unifi.it

Finito di stampare
nel mese di aprile 2008
Nuova Grafica Fiorentina