

Evoluzione del profilo di spiaggia a seguito di un ripascimento artificiale in ghiaia su di una spiaggia altamente protetta

Pierluigi Aminti ¹, Filippo Pelliccia ² ed Enzo Pranzini ²

¹ Dipartimento di Ingegneria civile dell'Università degli Studi di Firenze,
Via Santa Marta 1, 50126 Firenze. aminti@dicea.unifi.it.

² Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università degli Studi di Firenze,
Via Jacopo Nardi 2, 50132 Firenze. epranzini@unifi.it.

Riassunto

Il tratto di litorale oggetto del presente studio è posto nel settore settentrionale della spiaggia di Marina di Massa (Toscana settentrionale) ed è costituito da una "cella" lunga 190 m delimitata da due pennelli collegati, alla loro estremità, da una scogliera soffolta. A differenza di quanto avviene in tutte le "celle" che costituiscono il sistema difensivo di questa zona, in quella qui considerata vi è una seconda scogliera soffolta interna, posta a circa 50 m da riva. Nel Maggio del 1999 il Comune di Massa ha qui realizzato un ripascimento artificiale con circa 18.000 m³ di ghiaia di diametro compreso tra i 30 ed i 70 mm e circa 2000 m³ di ghiaietto di diametro compreso tra i 3 ed i 7 mm.

A seguito del primo intervento, la linea di riva è avanzata di circa 7 m, ma si è formata una cresta di berma alta 2,5 m ed estremamente ripida, tale da limitare l'utilizzazione balneare della spiaggia. Nel Maggio del 2000 è quindi stato effettuato un secondo ripascimento, con materiale a granulometria minore (circa 2 mm), che ha determinato una ulteriore espansione dell'arenile di circa 9 m e la formazione di un profilo della spiaggia emersa più funzionale all'utilizzazione turistica. La successiva evoluzione granulometrica e morfologica della spiaggia ha comunque determinato la formazione di una berma ghiaiosa elevata ed a forte pendenza.

Parole chiave: difesa dei litorali, ripascimento artificiale, ghiaia, scogliere sommerse.

Abstract

The studied beach is located in the northern sector of the Marina di Massa beach (norther Tuscany) and constitutes a 190-meter-long compartment delimited by two groins connected at their tips by a submerged breakwater. This compartment differs from the others forming the defences of this coast in having a second internal submerged breakwater 50 m from the shoreline.

In May 1999, the local administration carried out a nourishment project with approximately 18.000 m³ of gravel with size ranging between 30 and 70 mm and with approximately 2.000 m³ of 3 to 7 mm granules. This work resulted in a beach expansion of 7 m but also in the formation of a 2.5 meter high gravel berm crest with a very steep offshore slope, thus preventing full recreational use of the beach.

In May 2000, a second nourishment was performed with finer sediments (approximately 2 mm), in order to flatten the beachface profile, obtaining a 9 meter wider beach with a more gentle slope. However, the sedimentary and morphological evolution which followed produced another steep high gravel berm.

Key-words: shore protection, beach nourishment, shingle beaches, submerged breakwaters.

Ubicazione e descrizione dell'area di studio

Il tratto di spiaggia oggetto del presente studio è posto nel settore settentrionale della spiaggia di Marina di Massa (Fig. 1), che fa parte dell'unità fisiografica Pisano-Versiliese (Gandolfi e Paganelli, 1975), ed è alimentato prevalentemente dal Fiume Magra, che sfocia circa 10 km più a nord.

I corsi d'acqua più prossimi alla zona qui considerata sono il Torrente Ricortola, che sfocia circa 800 m a nord, ed il Fosso Brugiano, che sfocia circa 350 m a sud; nessuno di questi possiede un trasporto solido rilevante ai fini dell'alimentazione del litorale (Aiello et al., 1975; Gandolfi e Paganelli, 1975).

La zona studiata consiste in un breve tratto di litorale, della lunghezza di circa 190 m, delimitato a nord ed a sud da due pennelli emersi collegati da due scogliere parallele soffolta; una unisce l'estremità dei due pennelli, come avviene in quasi tutte le "celle" che costituiscono il sistema di difesa di Marina di Massa, l'altra, posta a circa 50 metri da riva, forma una tipologia difensiva unica almeno in Toscana.

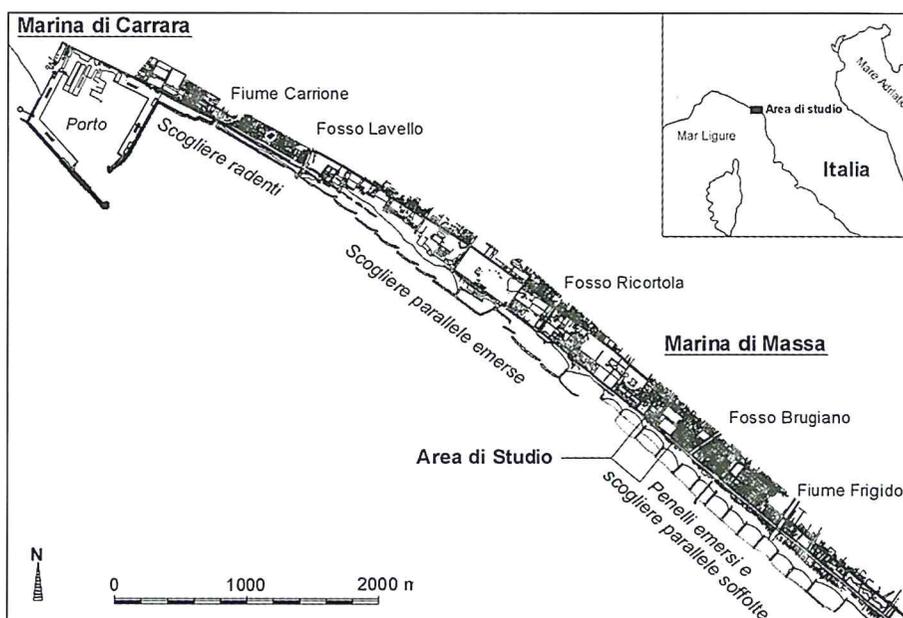


Figura 1 - Ubicazione dell'area di studio.

Caratteristiche meteomarine dell'area di studio

La ricostruzione delle caratteristiche meteomarine al largo della zona di studio è possibile grazie alla presenza, dal 1989, dell'ondametro di La Spezia (Rete Ondametrica Nazionale), posto ad Ovest dell'area di studio in corrispondenza della batimetrica dei 70 m. Di esso sono stati elaborati i dati raccolti nel periodo compreso fra il 1 luglio 1989 ed il 30 giugno 2000, per un totale di 32134 registrazioni.

È stata quindi effettuata l'analisi direzionale del moto ondoso (Fig. 2) dalla quale risulta che le onde più alte ($H_s > 2$ m) provengono tutte da un settore ben definito e compreso fra le direzioni 210° e 270° N; questo settore si riduce ulteriormente all'aumentare dell'altezza d'onda considerata, tanto che le mareggiate più intense provengono da una sola direzione (nell'intorno dei 240° N).

Ancor più selettiva è la distribuzione direzionale dell'energia del moto ondoso (Fig. 2) che mostra come la gran parte dell'energia provenga dalle direzioni 230° e 240° N.

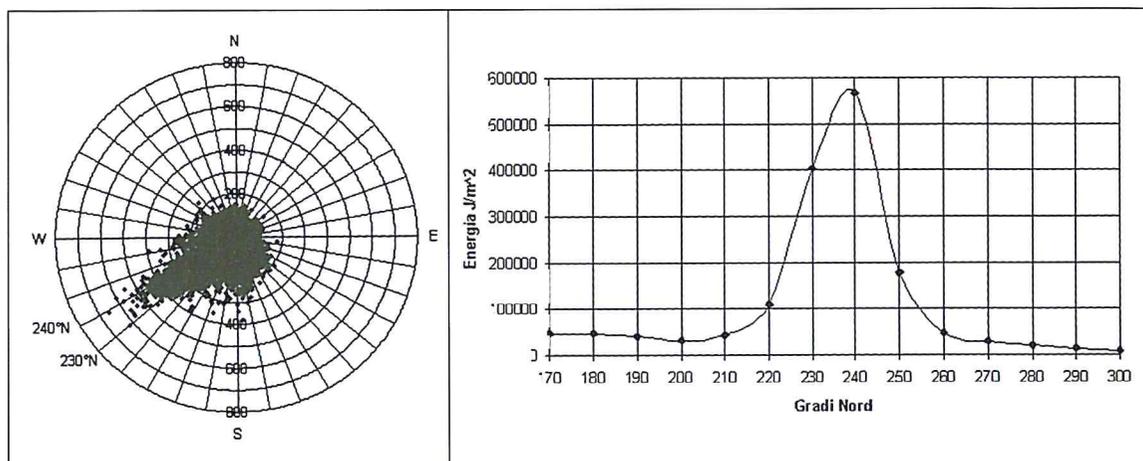


Figura 2 - A sinistra: Grafico polare della distribuzione direzionale delle altezze d'onda (in cm). A destra: Distribuzione direzionale del flusso di energia. Dati dell'ondametro di La Spezia per il periodo 1989-2000).

Stima del trasporto solido potenziale

Per la stima del trasporto solido potenziale nell'area di studio si sono utilizzate sia le formulazioni empiriche del CERC (1984), che tendono a sovrastimare il trasporto, che la relazione proposta da Kamphuis (1991) e ricalibrata da Schoonees e Theron (1996).

La determinazione degli angoli di incidenza α è stata condotta tenendo conto che l'orientamento della linea di costa, a Marina di Massa, è circa 312°N .

In Tabella 1 sono riportati i valori del trasporto solido potenziale associato alle diverse direzioni di provenienza del moto ondoso, calcolati con le due relazioni indicate.

Le due relazioni, pur evidenziando una significativa differenza sui valori assoluti, mostrano che sul litorale in esame il trasporto litoraneo è nettamente prevalente nella direzione da Nord verso Sud.

Tabella 1 – Valori del trasporto solido calcolati con le formule del CERC (1984) e di Kamphuis (1991) recentemente ricalibrata da Schoonees e Theron (1996). Convenzionalmente viene definito positivo il trasporto in direzione Nord-Sud.

CERC		Kamphuis	
Trasporto medio annuo - totale (mc/anno)		Trasporto medio annuo - totale (mc/anno)	
Q da Sud	-80000	Q da Sud	-31500
Q da Nord	310000	Q da Nord	146800
Qnet	230000	Qnet	115300
Qtot	390000	Qtot	178300

L'evoluzione recente del litorale di Marina di Massa e la proliferazione delle difese costiere

Il litorale di Marina di Massa, in lenta progradazione negli ultimi secoli (Mazzanti e Pasquinucci, 1983), è entrato in una fase erosiva agli inizi del '900, a causa della riduzione dell'input sedimentario del Fiume Magra e dello sbarramento che il porto di Marina di Carrara esercita nei confronti del trasporto litoraneo (Cipriani et al., 2000). La costruzione del porto iniziò nel 1920, e già nel 1930 si rese necessaria la costruzione, a sud di esso, delle prime scogliere aderenti.

Nei decenni successivi furono sperimentate varie tipologie di difesa, aggiungendo e modificando scogliere senza un piano organico, tanto che i primi 6,7 km di costa posti sottoflutto al porto sono oggi difesi da 9,3 km di scogliere (Rapporto di protezione 1.4; Aminti et al., 1999a).

Attualmente, il sistema difensivo del litorale di Marina di Massa si basa su “celle” costituite da pennelli distanti circa 180 metri l’uno dall’altro, collegati alla testata da scogliere soffolte con sommergezza pari a circa 0,8 metri.

Il litorale di Marina di Massa reagì positivamente a questo intervento, tanto che fra il 1985 e il 1997 la zona protetta con le “celle” registrò una espansione dell’arenile che localmente toccò i 50 m, pur incentivando i processi erosivi sulla spiagge poste sottoflutto.

La cella oggetto di questo studio (Fig. 3), protetta da due soffolte, non ebbe una risposta simile a quella data dalle celle chiuse da una sola soffolta e l’erosione è proseguita fino alla fine degli anni ’90. Dallo schema generale si discosta anche la cella posta immediatamente a nord, dove esistono due soffolte, di cui quella esterna non raggiunge il pennello settentrionale.

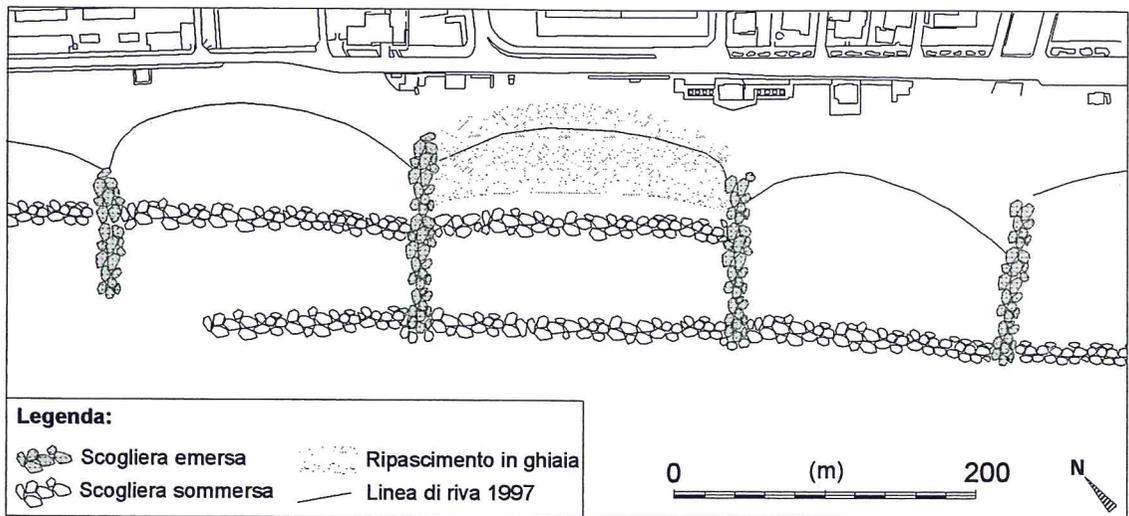


Figura 3 - Configurazione delle opere di difesa presenti nella zona di studio.

Interventi eseguiti

Allo scopo di proteggere le strutture balneari e di creare una spiaggia fruibile per la balneazione, il Comune di Massa realizzò, nel 1999, un progetto di ripascimento con materiale ghiaioso di dimensioni 30-70 mm ed in quantitativi tali da permettere la progradazione della linea di riva fino al raggiungimento della prima scogliera soffolta. In quella occasione furono versate 28.850 tonnellate di ghiaia, di granulometria compresa tra i 30 ed i 70 millimetri (Tab. 2), corrispondenti a circa 18.200 m³ di materiale (peso specifico calcolato = 1,585 t/m³), e 2.000 m³ di ghiaietto di dimensioni comprese fra 3 e 7 mm, coperti successivamente da un sottile strato di sabbia i cui volumi risultano essere irrilevanti per le considerazioni che andremo a fare.

In realtà, a fine lavori la situazione differiva da quella ipotizzata nel progetto, dato che non si era ottenuto l’avanzamento previsto e la scogliera interna si trovava ancora ad alcuni metri dalla battigia, con notevoli problemi di sicurezza per la balneazione. Inoltre, la ghiaia, sebbene stesa “in profondità” a costituire una piattaforma al livello del mare fino alla prima soffolta (Fig. 4 in alto) aveva subito costituito una cresta di berma elevata ed a forte pendenza verso il mare (Fig. 4 in basso), cosa che rendeva difficile l’accesso al mare da parte dei bagnanti ospiti dello stabilimento che ha in concessione questa spiaggia.

Nel Maggio 2000, ad un anno di distanza dal primo ripascimento, è stato perciò effettuato un secondo versamento, con circa 10.400 m³ di materiale di diametro nominale pari a 2 mm, ma contenente molti residui di frantumazione di dimensioni inferiori, tanto che il valore della Media è risultato pari a 0,76 mm (0,39 phi) (Tab. 2). Questo intervento prevedeva anche lo spostamento, al di là della prima soffolta, di circa 2.000 m³ di materiali versati nel 1999.

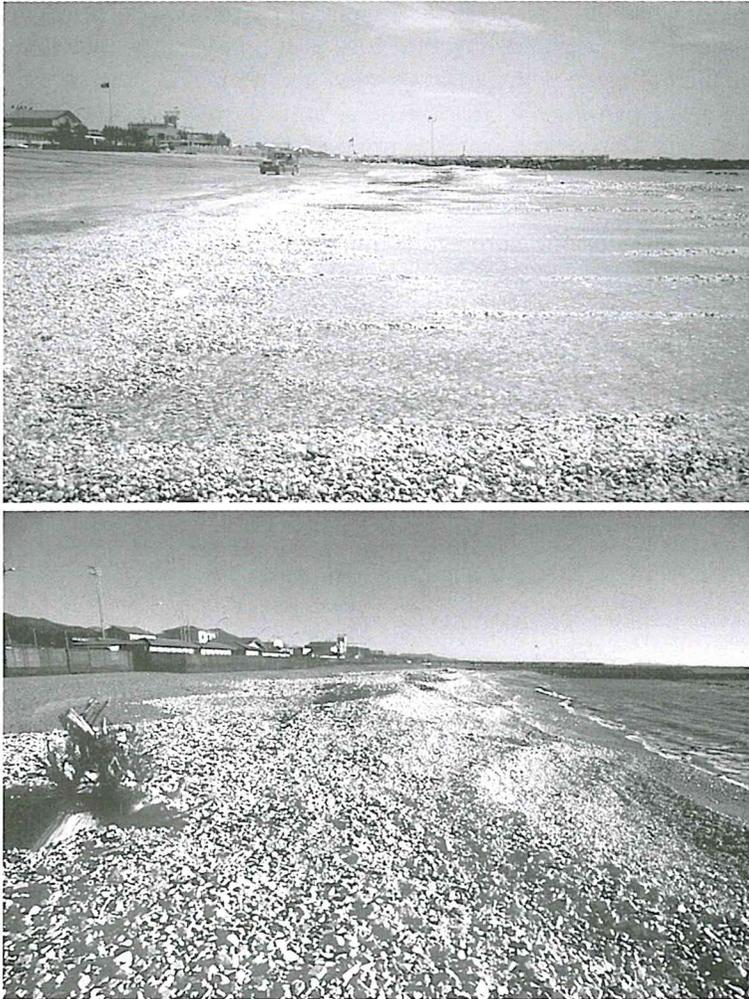


Figura 4 - Stendimento della ghiaia nel Maggio 1999 (in alto) e cresta della berma in ghiaia nel Dicembre 1999 (in basso). È evidente il movimento on-shore del materiale grossolano.

Tabella 2 - Parametri statistici dei sedimenti utilizzati per il ripascimento.

Data	Dimensioni nominali	Mz (phi)	Mz (mm)	σ_1 (phi)	% < 63 μ	D ₁ (phi)
Maggio 1999	3-7 mm	-2,28	4,85	0,48	0,00	-3,07
Maggio 1999	30-70 mm	-5,62	49,15	0,43	0,00	-6,13
Maggio 2000	2 mm	0,39	0,76	2,28	1,24	-3,08

Risposta della spiaggia all'immissione di materiale grossolano

Evoluzione morfologica

L'evoluzione del profilo della spiaggia interessata dal versamento è stata studiata con due campagne di rilievi batimetrici eseguite nell'Ottobre del 1999 e nel Novembre del 2000. I dati così ottenuti sono stati confrontati con quelli relativi ad una campagna eseguita nel Gennaio 1997 nell'ambito di un progetto di ricerca finanziato dalla Regione Toscana e che aveva in questa "cella" un profilo di controllo (Fig. 5).

È stato inoltre eseguito, nel Marzo 2002, un rilievo della sola spiaggia emersa in contemporanea con il prelievo di campioni.

Dalla sovrapposizione del profilo del Gennaio 1997 con quello corrispondente effettuato nell'Ottobre del 1999, dopo il primo intervento, si rileva come i fondali compresi tra le due soffolte abbiano subito un abbassamento medio di circa 70 cm, mentre il materiale versato è ancora per la quasi totalità sulla spiaggia emersa determinandone una espansione di circa 7 m (Fig. 5). Dal confronto tra il rilievo del 1999 e quello del 2000 si è registrata un ulteriore avanzamento della linea di riva di circa 9 m. Dall'analisi della variazione volumetrica registrata (Tab. 3) risulta, tra il 1997 ed il 1999, un incremento della spiaggia emersa pari a circa 3.500 m³ (18 m³/m), cui fa riscontro una perdita di quasi 2.000 m³ fra la linea di riva e la prima soffolta, e di altri 6.200 m³ fra le due soffolte, con una riduzione complessiva di circa 4.600 m³ di sedimento, che sommata ai circa 18.500 mc di materiale versato ci permette di quantificare la perdita di volume totale in circa 23.000 m³ (121 m³/m). È evidente comunque che una parte consistente delle perdite deve essere avvenuta fra il 1997 e il momento del ripascimento.

Nel Dicembre 1999 si è avuta una mareggiata eccezionale (Hs = 6,20 m e Ts = 10 s), che si colloca al secondo posto per altezza d'onda significativa nella serie degli eventi registrati dal momento dell'installazione dell'ondametro.

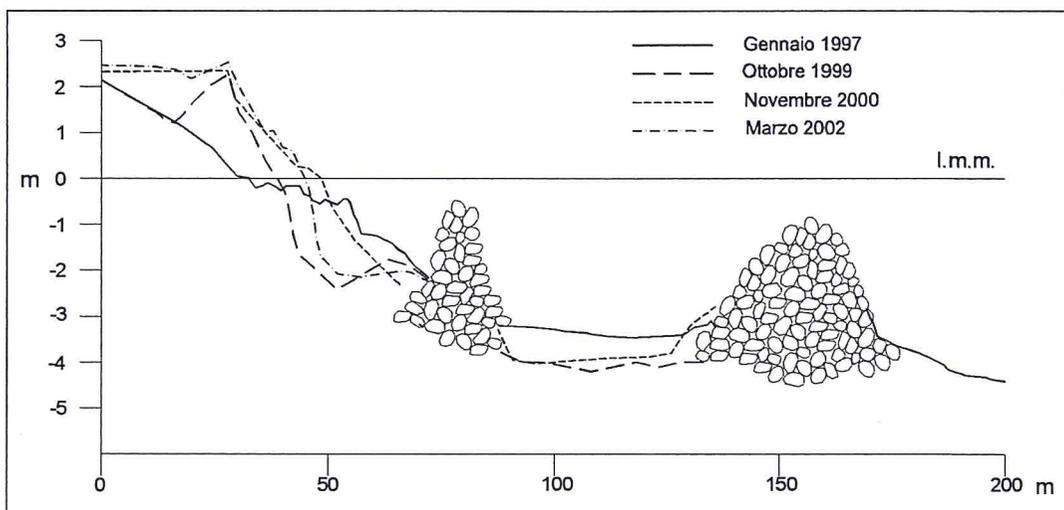


Figura 5 - Confronto tra i rilievi effettuati nel 1997, 1999 e 2000.

Tabella 3 - Variazioni volumetriche delle spiagge all'interno della cella.

Vengono riportati solo i dati relativi ai rilievi estesi anche alla parte sommersa della spiaggia.

	mc			m ³ /m		
	1997/1999	1999/2000	1997/2000	1997/1999	1999/2000	1997/2000
Spiaggia Emersa	3498	3635	7133	18,4	19,1	37,5
Linea di riva / 1° soffolta	-1925	610	-1315	-10,1	3,2	-6,9
1° soffolta / 2° soffolta	-6203	2362	-3842	-32,6	12,4	-20,2
Totale	-4630	6606	1976	-24,4	34,8	10,4

Subito dopo quell'evento è stato rilevato il profilo della spiaggia emersa, che presentava una cresta di berma assai elevata (+2,27 m s.l.m.) ed una forte pendenza sul lato offshore (21,2%).

I dati dell'ondametro sono stati utilizzati per derivare l'altezza dell'onda al piede della spiaggia, oltre la soffolta più esterna e, tramite il modello di Van der Meer (1988) si è ottenuto, con la procedura

proposta da Aminti et al. (1999b), il profilo della spiaggia, che viene ad avere una cresta della berma a quota 2.80 m ed una pendenza analoga a quella del profilo in natura. La piccola differenza di quota fra modello e prototipo può essere dovuta all'effetto, non simulato sul modello, della soffolta interna posta al piede della spiaggia.

Il rilievo del Novembre 2000, effettuato alcuni mesi dopo il secondo ripascimento, indica un incremento volumetrico di circa 6.600 m³, a fronte di un ripascimento di 10.400 m³: La cella avrebbe quindi perso circa 3.800 m³ in un anno.

Il profilo della spiaggia emersa è stato nuovamente rilevato dopo la mareggiata del 6 Novembre 2000, anch'essa di forte intensità (Hs = 5,8 m e Ts = 11,1 s).

Anche questa volta la cresta della berma è elevata (2,34 m s.l.m.), ma la morfologia della spiaggia è più dolce, con una minore pendenza della battigia (11,2%).

Nel Marzo 2002 è stato rilevato nuovamente il profilo della spiaggia emersa, che è risultato essere ancora caratterizzato da una cresta elevata (2,17 m s.l.m.) con una pendenza maggiore (13,8%) di quella misurata nel rilievo precedente.

Lo studio delle caratteristiche granulometriche dei sedimenti di spiaggia spiega, come vedremo, questa variazione del profilo topografico della spiaggia emersa.

Evoluzione granulometrica

Lo studio dell'evoluzione granulometrica dei sedimenti di spiaggia emersa è stato effettuato sulla base di campioni prelevati in posizioni significative sul profilo di spiaggia in occasione dei rilievi condotti nel Gennaio 1997, Ottobre 1999, Novembre 2000 e Marzo 2002. Ogni volta è stata campionata la battigia, la cresta della berma di tempesta e la parte più interna della spiaggia (Tab. 4, Fig. 6).

Tabella 4 - Parametri statistici dei sedimenti di spiaggia nel momento dei tre rilievi.

		Mz (phi)	Mz (mm)	σ_1 (phi)	% < 63 μ	D ₁ (phi)
1997	Spiaggia alta	1,79	0,29	0,52	0,53	0,53
	Cresta della berma	1,25	0,42	0,92	0,15	-1,61
	Battigia	0,94	0,52	0,98	0,02	-1,78
1999	Spiaggia alta	1,78	0,29	0,51	0,35	0,58
	Cresta della berma	-5,66	50,56	0,43	0,00	-6,14
	Battigia	-3,66	12,68	1,39	0,00	-5,59
2000	Spiaggia alta	-0,50	1,41	2,22	0,15	-4,07
	Cresta della berma	-4,91	30,05	0,56	0,00	-5,63
	Battigia	0,02	0,99	1,74	0,04	-3,52
2002	Spiaggia alta	-0,86	1,81	1,83	0,31	-4,55
	Cresta della berma	-5,56	47,31	0,46	0,00	-6,12
	Battigia	-1,39	2,63	1,72	0,00	-3,59

Nel 1997 la spiaggia emersa è caratterizzata da una pendenza regolare con una cresta di berma poco pronunciata. I sedimenti presenti, sia sulla spiaggia alta che sulla cresta della berma, sono costituite da *sabbia media* (Krumbein, 1934) con dimensioni medie comprese tra 1,79 e 1,25 phi, mentre sulla battigia si ritrovano *sabbie grossolane* (Mz = 0,94 phi). I campioni prelevati sulla battigia e sulla cresta delle berma si presentano come *moderatamente classati* (Folk e Ward, 1957), con valori di σ_1 pari a 0,98 e 0,92, mentre quelli presenti sulla spiaggia alta sono *moderatamente ben classati* ($\sigma_1 = 0,52$) e, anche in considerazione del valore di Mz (Friedman, 1967), si può pensare che si tratti di depositi nei quali l'apporto eolico è prevalente.

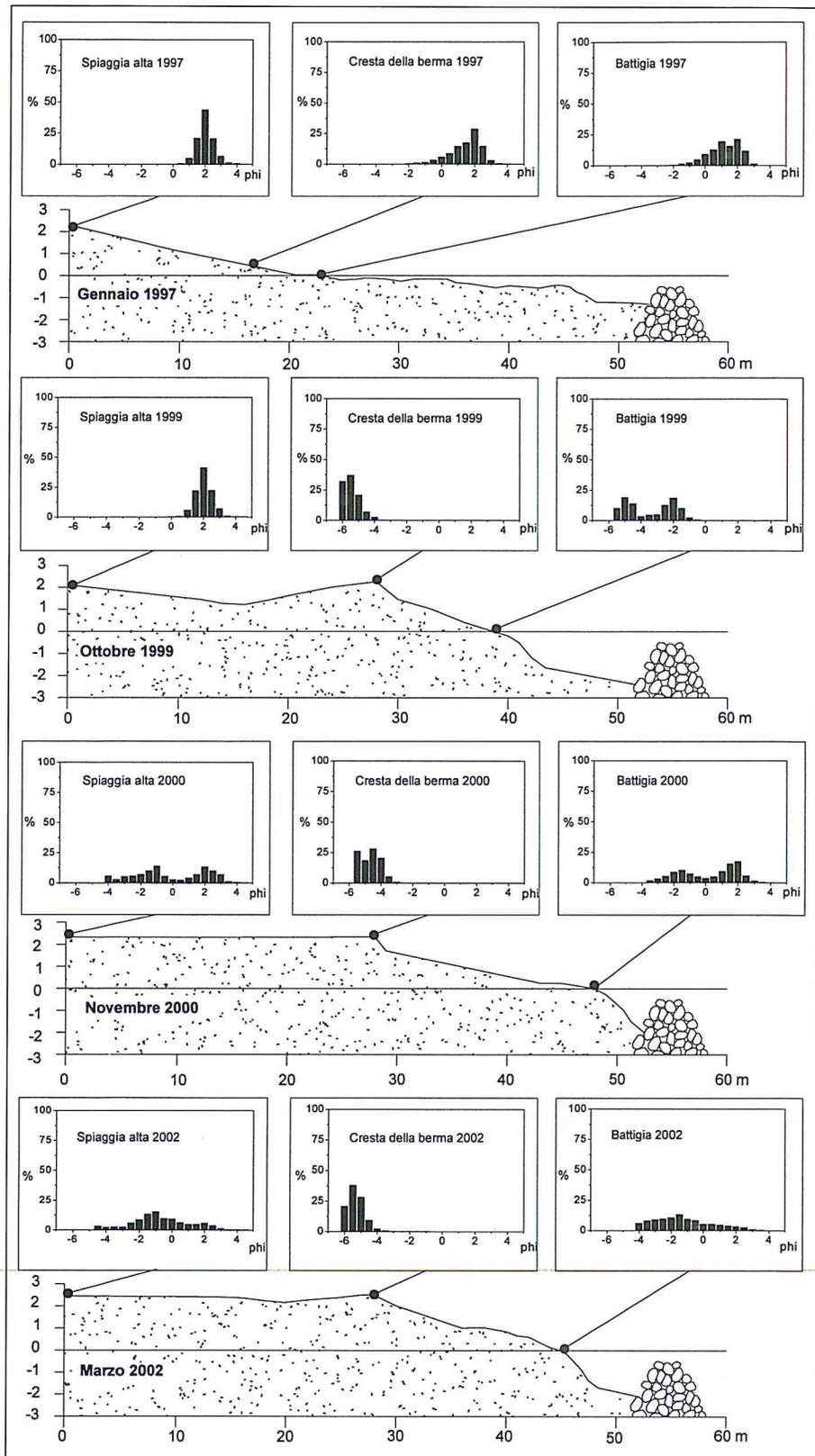


Figura 6 - Sintesi dell'evoluzione morfologica e sedimentologica della spiaggia emersa.

Nel 1999, dopo il ripascimento con materiale grossolano, la battigia è costituita da *ciottoli poco classati* ($Mz = -3,66$; $\sigma_1 = 1,39$), mentre sedimenti di dimensioni ancora maggiori e meglio classati vanno a costituire la cresta della berma di tempesta ($Mz = -5,66$; $\sigma_1 = 0,43$) che, ricordiamo, raggiunge una quota di 2,27 m nonostante la doppia protezione delle due soffolte. La spiaggia alta ospita ancora i sedimenti originari, che non mostrano segni di inquinamento da parte dei nuovi materiali immessi. Nel Novembre 2000 i sedimenti di battigia hanno dimensioni medie minori ($Mz = 0,02$ phi) ed una classazione ancora peggiore ($\sigma_1 = 1,74$), conseguenze queste del nuovo versamento di materiale più fine misto sabbia più ghiaia. La cresta della berma di tempesta è ancora costituita dagli elementi più grossolani immessi sulla spiaggia con il primo ripascimento ($Mz = -4,91$ phi) che in questa posizione costituiscono un deposito *moderatamente ben classato* ($\sigma_1 = 0,56$). I lavori connessi al secondo ripascimento hanno determinato un rimodellamento dell'intero profilo della spiaggia emersa, con il rimescolamento dei depositi eolici originari con i nuovi materiali, tanto che le dimensioni medie (Mz) dei sedimenti qui presenti risultano pari a $-0,50$ phi, con una classazione (σ_1) che raggiunge il valore di 2,22 phi.

Nel Marzo del 2002 la spiaggia si mostra nella configurazione conferitagli dalle mareggiate invernali, con più creste di berma, delle quali la più interna raggiunge una quota di 2,34 metri, ma le caratteristiche granulometriche dei sedimenti, nella parte morfologicamente attiva, non mostrano significative variazioni rispetto a quanto rilevato nel Novembre 2000 (Battigia: $Mz = -1,39$; $\sigma_1 = 1,72$; Cresta della berma: $Mz = -5,56$; $\sigma_1 = 0,46$). I sedimenti presenti sulla spiaggia alta non risultano rimaneggiati in modo significativo e mantengono caratteristiche tessiturali simili a quelle mostrate nel Novembre 2000 ($Mz = -0,86$; $\sigma_1 = 1,83$).

Discussione e Conclusioni

I dati raccolti nel corso del monitoraggio di questa spiaggia consentono di riconoscere qui i processi che caratterizzano le spiagge miste sabbia più ghiaia (Kirk, 1980) e la presenza delle due scogliere soffolte non sembra un elemento sufficiente a ridurre l'energia del moto ondoso incidente sulla battigia, almeno di quel tanto necessario per produrre una cresta della berma poco elevata e costituita da elementi di dimensioni minori. Al contrario, una cresta a quota 2,5 m e costituita da ciottoli di dimensioni medie superiori a $-5,66$ phi (50,6 mm) con un primo percentile pari a $-6,14$ phi (7,5 mm) è certamente indice di elevata energia. In aggiunta a ciò si rileva che questo *gravel ridge* subisce, durante le mareggiate più intense, fenomeni di *overwashing* con la formazione di evidenti *washover fans* (Carter, 1988), che portano materiali grossolani verso la parte mediana della spiaggia (Figg. 7 e 8).



Figura 7 - Ripresa aerea del Novembre 1999 in cui si vedono i *washover fans* di ghiaia che risalgono verso la parte più alta della spiaggia costituita da sabbia (Foto: Comando base aeromobili del Corpo delle Capitanerie di Porto, Luni-Sarzana; Autor. R.G.S. n. 134 del 15/5/2000).

In queste condizioni, il rimaneggiamento da parte del moto ondoso dei materiali versati rimane consistente, con una progressiva selezione dei sedimenti nella quale la frazione più grossolana si posizionerà sempre sullo *step*, dove tutte le osservazioni effettuate dopo il ripascimento hanno rilevato la presenza di ghiaia, e sulla cresta della berma di tempesta, con la formazione di una battigia a forte pendenza.

La presenza delle due soffolte limita enormemente lo scambio *onshore-offshore* dei sedimenti, con il risultato che le condizioni di *swell*, successive alle mareggiate, non determinano la progradazione della spiaggia con la formazione di berme sabbiose a quote decrescenti, tali da raccordare il *gravel ridge* con la battigia di mare calmo.

Si ritiene che la demolizione delle scogliere soffolte, o un loro consistente abbassamento, non dovrebbe costituire un elemento di rischio per questa spiaggia mista, in cui la ghiaia è in grado di assorbire la gran parte dell'energia incidente, andando a formare una cresta alta e porosa; al contrario, un aumento dei flussi *cross-shore* potrebbe favorire la formazione di una battigia in sabbia a pendenza minore, con un aumento della fruibilità della spiaggia ai fini della balneazione.

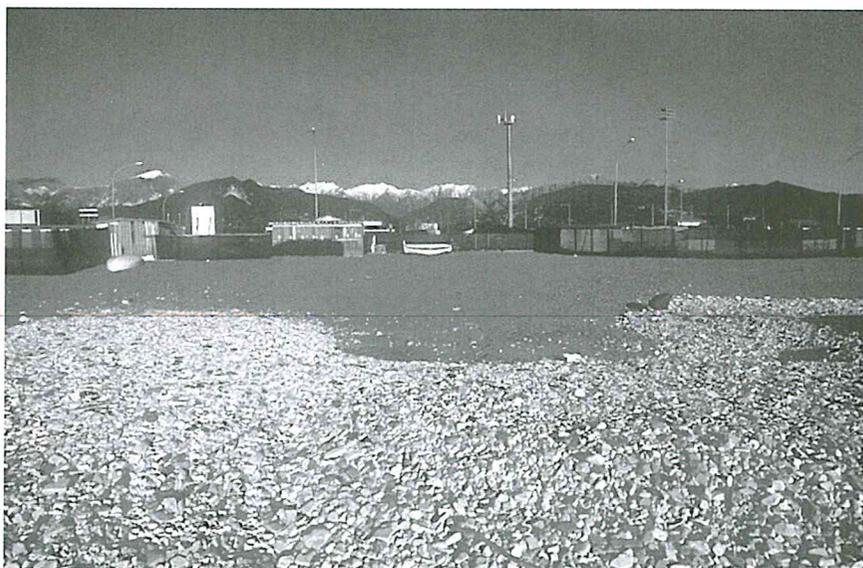


Figura 8 - *Washover fans*. - In alto: il ristagno di acqua dietro il *gravelridge* dimostra che i materiali grossolani sono migrati al di sopra dei sedimenti sabbiosi o misti a minore permeabilità. In basso: la regolarità spaziale dei *washover fans* dimostra la relazione che essi hanno con le cuspidi (le *swash cusps* di Guza e Inman, 1975).

In ogni caso la riduzione delle opere di protezione provocherebbe un incremento dell'altezza d'onda incidente durante le mareggiate. Ripetendo la simulazione con il modello numerico per la mareggiata del 1999 e con le stesse caratteristiche granulometriche, l'eliminazione della scogliera sommersa esterna determinerebbe la formazione di una cresta di berma a quota +3,2 m s.l.m.

La costruzione di spiagge di sola ghiaia in zone esposte dà quindi luogo ad una morfologia che presenta problemi di fruizione per la ripidità della fascia di battigia e per la notevole altezza delle creste che si formano durante le tempeste; al contrario, introducendo anche materiali più fini, pur rimanendo sostanzialmente invariata la quota della cresta di berma di tempesta, si ottengono pendenze in prossimità della riva compatibili con un normale uso turistico delle spiagge, almeno fino a che non si realizza la separazione granulometrica dei materiali, che comunque può essere gestita con modesti interventi.

Bibliografia

- Aiello E., Bartolini C., Caputo C., D'Alessandro L., Fanucci F., Fierro G., Gnaccolini M., La Monica G.B., Lupia Palmieri E., Piccazzo M. e Pranzini E. (1976) - *Il trasporto litoraneo lungo la costa toscana tra la foce del Fiume Magra ed i Monti dell'Uccellina*. Boll. Soc. Geol. It., 94: 1519-1571.
- Aminti P., Iannotta P. e Pranzini E. (1999a) - *Morfodinamica di un sistema costiero intensamente protetto: il litorale di Marina di Massa*. Atti dei Conv. Lincei, 154: 263-270.
- Aminti P., Pranzini E. e Tecchi M.G. (1999b) - *Modello di previsione del profilo di una spiaggia artificiale in ghiaia per la protezione di litorali o di opere costruite sulla costa*. Atti dei Conv. Lincei, 154: 257-262.
- Carter R.W.B. (1988) - *Coastal environments*. Academic press, London, pp. 617.
- CERC (1984) - *Shore Protection Manual*. U.S. Army Coastal Engineering Research Center, Fort Belvoir, Virginia, USA.
- Cipriani L.E., Ferri S., Iannotta P., Paolieri F. e Pranzini E. (2000) - *Morfologia e dinamica dei sedimenti del litorale della Toscana settentrionale*. Studi costieri, 4: 119-156.
- 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.
- Friedman G.M. (1967) - *Dynamic processes and statistical parameters compared for size frequency distribution of beach and river sands*. J. Sediment. Petrol. 37: 327-354.
- Gandolfi G. e Paganelli L. (1975) - *Il litorale pisano-versiliese (Area campione Alto Tirreno). Composizione, provenienza e dispersione delle sabbie*. Boll. Soc. Geol. It., 94: 1273-1295.
- Guza e Inman (1975) - *Edge waves and beach cusps*. Journ. Coastal Research, 86: 4125-4132.
- Kamphuis J.W. (1991) - *Alongshore Sediment Transport Rate*. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng, 117: 624-640.
- Kirk R.M. (1980) - *Mixed sand and gravel beaches: morphology, processes and sedimentation*. Progress in Physical Geography, 4: 189-210.
- Krumbein W.C. (1934) - *Size frequency distribution of sediments*. J. Sedim. Petrol., 4: 65-77.
- Mazzanti R. e Pasquinucci M. (1983) - *The evolution of the Luni-Pisa coastline (II cent. B.C. - second half of the XIX cent.)*. In: Coastal problems in the Mediterranean Sea, E.C.F. Bird and P. Fabbri Eds, IGU, Commission on Coastal Environment, Bologna 10-14 May 1982.
- Schoonees J.S. e Theron A.K. (1996) - *Improvement of the Most Accurate Longshore Transport Formula*. ASCE, Proc. Coastal Engineering, 3: 3652-3665.
- van der Meer J. (1988) - *Rock slopes and gravel beaches under wave attack*. Delf Tech. Univ. Pubbl. n. 396.

Manoscritto ricevuto il 10/6/2001, accettato il 15/9/2002.